

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

Журнал заснований у 1918 році

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

Серія: Технічні науки

Том 31 (70) № 2 2020

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2020

Головний редактор:

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

Члени редакційної колегії:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 7 від 27.04.2020 року)**

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

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

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

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

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

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Гупало Ю.Ю. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА.....	1
---	---

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В., Ковальчук А.О., Садовий К.В. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ІЗ ЧАВУНУ.....	7
--	---

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Водяницький Г.П., Мамчур В.А., Слюсаренко І.П., Тимків В.В. ДО МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КОРМОРОЗДАВАЧА ЗМІШУВАЧА-ПОДРІБНЮВАЧА	13
--	----

Voitik A.V., Kravchenko V.V., Kutkovetska T.O., Pushka O.S. ANALYSIS OF STRIP CULTIVATORS FOR TILLAGE ON THE TECHNOLOGY OF STRIP-TILL.....	22
---	----

Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТА ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ РЕЧОВИН У РУХОМИХ РОБОЧИХ МІСТКОСТЯХ (ЧАСТИНА 1: СПОСОБИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ)..	29
---	----

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Владов С.І., Шмельов Ю.М., Пилипенко Л.М., Назаренко Н.П., Тугова Н.В., Дерев'янка І.Г., Пономаренко А.В. РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВЗ-117 НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОЇ МЕРЕЖІ.....	35
---	----

Морозов А.В. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОСПРЯМОВАНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ.....	44
---	----

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Сотніченко Ю.О. МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ НА ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ СПОРУДАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	52
--	----

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Гайтан О.М. АВТОМАТИЗАЦІЯ ГЕНЕРАЦІЇ РОЗКЛАДУ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ УНІВЕРСИТЕТУ.....	58
---	----

Говорущенко Т.О., Чубатий М.А., Шуригін А.С. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ WEB-СИСТЕМИ БОТАНІЧНОГО САДУ ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ.....	67
---	----

Голуб Т.В., Зеленьова І.Я., Грушко С.С., Павлішин М.А. ПІДСИСТЕМА АПАРАТНОГО ПРИСКОРЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТІВ У БАЗИСІ FPGA.....	73
---	----

Грбар О.І., Лисогор Ю.І., Скачков В.О. АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВІЗУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ СОРТІВ РОСЛИН ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВЕБСЕРВІСУ.....	80
---	----

Доля К., Доля О.Є. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ МІЖМІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....	85
---	----

Єрмакова Д.Г., Лисюк Г.П. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В ТОПЦІ ПАРОВОГО КОТЛА.....	91
Іванчук О.В., Завгородній В.В., Козел В.М., Дроздова Є.А. АНАЛІЗ ПРОТОКОЛІВ ОБМІНУ ДАНИМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	99
Киричек Г.Г., Тимошенко В.С. СИСТЕМА АНАЛІЗУ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСІВ.....	105
Лабжинський В.А. НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ.....	111
Лобачев М.В., Мещеряков Д.В. ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.....	116
Марчук Г.В., Лисогор Ю.І., Мисливий М.В. РОЗПІЗНАВАННЯ РОЗМІННИХ МОНЕТ УКРАЇНИ РІЗНОГО НОМІНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ.....	123
Нікулін Д.С. ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ЖИВЛЕННЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000.....	128
Новіков П.В., Бунке О.С. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ НА БАЗІ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА.....	132
Павлов В.Г. ЗАСТОСУВАННЯ ДІАГРАМ ГАНТА ДЛЯ ІЛЮСТРАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДІНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ	140
Політанський Р.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ МЕТОДОМ БУЛЕВОГО ГІПЕРКУБУ.....	145
Портянко Т.М., Кучеренко В.С. РОЛЬ ПЛАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОСТІ БІЗНЕСУ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	152
Приходько С.Б., Приходько Н.В., Смикодуб Т.Г. ЧОТИРЬОХФАКТОРНА НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ JAVA-ЗАСТОСУНКІВ З ВІДКРИТИМ КОДОМ.....	157
Романюк А.Н., Вяткин С.И., Войтко В.В., Романюк О.В. РЕКОНСТРУКЦІЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	163
Сабодашко Д.В., Хома Ю.В., Хома В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВОЇ СТІЙКОСТІ СИГНАЛУ ЕКГ ЯК БІОМЕТРИЧНОГО МАРКЕРА В СИСТЕМІ АВТЕНТИФІКАЦІЇ.....	170
Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. РОЗРОБКА АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕСЗ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т» (ЧАСТИНА 2).....	181
Снитюк В.Є., Сорока П.М., Ткаченко О.В. ПРОБЛЕМА РОЗБИТТЯ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ НА КЛАСТЕРИ З МЕТОЮ ПРОВЕДЕННЯ РЕГІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ПОЛІТИКИ.....	187
Струзік В.А., Грибков С.В., Чобану В.В. СПЕЦИФІКАЦІЯ СЕМАНТИЧНОГО ВЕРСІОНУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ.....	196

Терещенко Д.О., Пелих С.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ПРОТЯГОМ КАМПАНІЇ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА.....	202
Тіменко А.В., Шкарупило В.В., Скрупський С.Ю., Смолій В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПІДСИСТЕМИ ПАМ'ЯТІ СУЧАСНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	208
Токайчук Т.М., Сьомкіна О.В., Смирнова О.Л., Панчева Г.М., Пилипенко О.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ОКСИДНИХ ПЛІВОК НА СПЛАВІ ТІ6АL4V У ЕЛЕКТРОЛІТАХ НА ОСНОВІ ЕТИЛЕНГЛІКОЛЮ.....	213
Чорнофостова К.В., Беглов К.В. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ В ТЕПЛОНОСІЇ ПЕРШОГО КОНТУРУ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000.....	217
Ячменьов Я.О., Левківський В.Л., Кравченко С.М., Гришкун Є.О. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНТЕГРАЦІЇ MAGENTO 2 У WORDPRESS ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАГІНУ.....	223
ЕНЕРГЕТИКА	
Беднарська І.С., Шелешей Т.В., Риндюк Д.В., Беднарська Я.С. ОЦІНКА ВПЛИВУ МАРКИ МАЗУТУ НА ВИКИДИ СІРЧИСТОГО АНГІДРИДУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ.....	231
Денисюк С.П., Рибій М.В. ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕДУР В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ З ГНУЧКОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА АКТИВНИМИ СПОЖИВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ.....	237
Калінчик В.П., Буравльова М.Т., Калінчик В.В., Скосирев В.Г. ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ГЕНЕРАЦІЇ І ВАРТОСТІ ОТРИМАНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	243
Кулик М.П. ЗАХИСТ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ.....	250
Сінчук О.М., Бойко С.М., Некрасов А.В., Ножнова М.О., Онищенко А.О. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ОСНОВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ	256
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	262

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Hupalo Yu.Yu.

IMPROVING RELIABILITY OF PLUNGER PUMP1

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Kovalchuk Yu.O., Pushka O.S., Voitik A.V., Kovalchuk A.O., Sadovyi K.V.

APPLICATION OF LASER-PLASMA HARDENING METHOD
OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES PARTS FROM CAST IRON7

INDUSTRIAL ENGINEERING

Vodyanitsky G.P., Mamchur V.A., Slyusarenko I.P., Tymkiv V.V.

TO THE METHOD OF SIMULATING THE WORKING PROCESS
OF THE FEEDER OF THE MIXER-SHREDDER13

Voitik A.V., Kravchenko V.V., Kutkovetska T.O., Pushka O.S.

ANALYSIS OF STRIP CULTIVATORS FOR TILLAGE ON THE TECHNOLOGY OF STRIP-TILL.....22

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

PERSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR PART PROCESSING AND MIXING OF BULK MATTERS
INTO MOBILE WORKING CAPACITIES (PART 1: METHODS OF TECHNICAL OPERATIONS)29

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Vladov S.I., Shmelov Yu.M., Pylypenko L.M., Nazarenko N.P.,

Tutova N.V., Derevyanko I.G., Ponomarenko A.V.

IMPLEMENTATION OF COMPONENT MATHEMATICAL MODELS
OF TV3-117 AIRCRAFT ENGINE BASED ON SEMANTIC NETWORK35

Morozov A.V.

DETERMINATION OF EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS
OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITE MATERIAL.....44

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Sotnichenko Yu.O. METHOD OF DYNAMIC PROTECTION OF INFORMATION
ON OPTICAL LINEAR STRUCTURES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE52

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Haitan O.M.

THE UNIVERSITY COURSE TIMETABLING AUTOMATION58

Hovorushchenko T.O., Chubatyi M.A., Shurygin A.S.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TOOLS FOR DEVELOPING THE WEB-SYSTEM
OF THE BOTANICAL GARDEN OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY.....67

Golub T.V., Zeleneva I.Ya., Hrushko S.S., Pavlishyn M.A.

THE SUBSYSTEM OF HARDWARE ACCELERATION OF TEXT CLASSIFICATION
IN THE FPGA BASIS73

Grabar O.I., Lysogor Yu.I., Skachkov V.O.

ANALYSIS OF ALGORITHMS OF VISUAL SYSTEM RECOGNITION SORTS OF PLANTS
FOR DEVELOPMENT THE WEB-SERVICE80

Dolia K., Dolia O.Ye.

DETERMINATION OF THE GRAVITATIONAL MODEL AND ITS PARAMETERS FOR FORECASTING
THE NUMBER OF VISITORS TO TRADE OBJECTS BY THE EXAMPLE OF KHARKOV85

Yermakova D.G., Lysyuk H.P. AUTOMATIC SYSTEM FOR CONTROLLING THE EFFICIENCY OF COMBUSTION OF FUEL IN THE FURNACE OF A STEAM BOILER	91
Ivanchuk O.V., Zavhorodnii V.V., Kozel V. M., Drozdova Ye.A. ANALYSIS OF DATA SHEET PROTOCOLS FOR CONTROL OF THE INTERNET OF THINGS.....	99
Kirichek G.G., Timoshenko V.C. SYSTEM OF ANALYSIS OF INTERNET RESOURCES USE	105
Labzhynskiy V.A. NEURAL NETWORK METHODS FOR DIAGNOSING THE STATE OF POWER ASSETS	111
Lobachov M.V., Mescheryakov D.V. INFLUENCE OF DELAY ON THE STABILITY OF A REGULATORY SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK.....	116
Marchuk G.V., Lysogor Iu.I., Myslyvyi M.V. COMPUTER VISION IN RECOGNITION OF UKRAINIAN COINS OF DIFFERENT DENOMINATION .	123
Nikulin D.S. STUDY OF THE POWER SUPPLY SECTION OF THE STEAM GENERATOR OF A NUCLEAR POWER UNIT WITH A VVER-1000 REACTOR	128
Novikov P.V., Bunke A.S. MODELING OF CONTROL SYSTEM OF TEMPERATURE MODE OF DIRECT-FLOW STEAM BOILER BASED ON TWO-CHANNEL FUZZY CONTROLLER	132
Pavlov V.G. GANTT CHART APPLICATION FOR ILLUSTRATION OF PROCESS OF DYNAMIC LOAD BALANCING OF COMPUTING DEVICES.....	140
Politanskyi R.L. INVESTIGATION OF THE PERIODICITY OF PSEUDORANDOM SEQUENCES BY THE BOOLEAN HYPERCUBE METHOD	145
Portianko T.M., Kucherenko V.S. THE ROLE OF THE BUSINESS CONTINUITY PROTECTION PLAN IN THE IMPLEMENTATION OF COMPUTERIZED SYSTEMS AT PHARMACEUTICAL ENTERPRISES	152
Prykhodko S.B., Prykhodko N.V., Smykodub T.G. FOUR-FACTOR NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SIZE OF OPEN SOURCE JAVA-BASED APPLICATIONS.....	157
Romanyuk O.N., Vyatkin S.I., Voitko V.V., Romanyuk O. V. RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SCENES BASED ON IMAGES.....	163
Sabodashko D.V., Khoma Yu.V., Khoma V.V. STUDY OF TIME STABILITY OF ECG SIGNAL AS A BIOMETRIC MARKER IN AUTHENTICATION SYSTEM	170
Sychylo A.A., Beglov K.V., Lysyuk H.P. DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE (PART 2)	181
Snytyuk V.Ye., Soroka P.M., Tkachenko O.V. THE DISTRIBUTION PROBLEM OF REGIONS OF UKRAINE INTO CLUSTERS FOR THE PURPOSE OF CONDUCTING REGIONALLY ORIENTED ECONOMIC POLICY	187
Struzik V.A., Hrybkov S.V., Chobanu V.V. SEMANTIC VERSIONING OF DATABASE SCHEMA.....	196
Tereshchenko D.O., Pelykh S.N. RESEARCH NUCLEAR FUEL PROPERTIES IN A VVER-1000 REACTOR DURING A CAMPAIGN AND A COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM CONTROLLING THE FUEL PROPERTIES	202

Timenko A.V., Shkarupylo V.V., Skrupsky S.Yu., Smolii V.V. A RESEARCH ON THE WAYS OF MODERN COMPUTING SYSTEM'S MEMORY SUBSYSTEM THROUGHPUT INCREASE	208
Tokaichuk T.M., Semkina O.V., Smirnova O.L., Pancheva H.M., Pilipenko O.I. STUDY OF THE DYNAMICS OF FORMATION OXIDE FILMS ON Ti6Al4V ALLOY IN ETHYLENE GLYCOL BASED ELECTROLYTES.....	213
Chornofostova K.V., Behlov K.V. MODELING OF CHANGE OF BORIC ACID CONCENTRATION IN THE FIRST CIRCUIT OF THE POWER PLANT OF WWER-1000 POWER PLANT	217
Yachmenov Ya.O., Levkivskiy V.L., Kravchenko S.M., Grishkun E.O. AUTOMATIZATION OF THE INTEGRATION PROCESS MAGENTO 2 TO WORDPRESS WITH THE HELP OF A PLUGIN	223
POWER ENGINEERING	
Bednarska I.S., Sheleshei T.V., Ryndiuk D.V., Bednarska Ya.S. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE FUEL OIL BRAND ON THE SULFUR ANGRIDES EMISSIONS IN ENERGY SITES.....	231
Denysiuk S.P., Rybii M.V. FORMATION OF COMPONENT OPTIMIZATION PROCEDURES IN ENERGY SYSTEMS WITH FLEXIBLE GENERATION AND ACTIVE ENERGY CONSUMERS	237
Kalinchuk V.P., Buravlova M.T., Kalinchuk V.V., Skosyrev V.H. FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION, ENERGY GENERATION AND VALUE OF ENERGY RECEIVED	243
Kulyk M.P. ATMOSPHERIC AIR PROTECTION DURING LOW-QUALITY ORGANIC FUEL BURNING.....	250
Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Onichenko A.O. ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCE ON BASIC ENERGY CHARACTERISTICS OF WIND POWER PLANTS OPERATED IN MINING ENTERPRISES	256
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	262

УДК 621.65

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/01>**Гупало Ю.Ю.**

Днепропетровский государственный технический университет

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА

У статті розглядалася температура підшипників як основоположний параметр оцінки поточного стану насосного обладнання, інформуючи про стан підшипників при повній або частковій завантаженості агрегату. Передбачається можливість скорочення часу на ремонтпридатність за допомогою нового методу вимірювання, обробки і отримання поточної інформації. Новий метод полягає у застосуванні цифрової обробки даних з термопари за допомогою модуля аналого-цифрового перетворювача термоЕРС, що сприяє підвищенню швидкості і точності вимірювань. Точка вимірювання температури розташована в місці опори підшипника на поверхні корпусу, оскільки прямий метод вимірювання неможливий. Для експерименту була використана сталь, товщина якої відповідала вимогам технічної документації для застосування в плунжерних насосах. Дослідження проводилося шляхом нагрівання сталі електричним нагрівальним елементом зі стабілізацією і контролем температури. Під час проведення експерименту були отримані температурні характеристики, що визначають три функціональні позиції насоса: включення, вихід на робочий режим і робота за максимально допустимого навантаження. Доведено, що під час часткової або повної завантаженості агрегату шляхом механічного тертя робочих елементів відбувається підвищення температури підшипників, що призводить до тріщин у самому матеріалі підшипника і надалі зносу. Аналізуючи отримані результати, можна зазначити про залежність температури підшипників від продуктивності насоса і кількості оборотів на хвилину.

Визначено природу взаємозв'язку температури підшипників і числа оборотів насоса за шкалою Чеддока, обчислено лінійне рівняння регресії, коефіцієнт еластичності, що виражає безперервність зв'язку між параметрами і так само пропорційність. Порахована помилка апроксимації, що показує, наскільки розрахункові значення відрізняються від фактичних. Перевірено гіпотезу про нульовий коефіцієнт регресії і статичної залежності зв'язку між параметрами.

Виведено графічні залежності температури від поточного часу експлуатації, що сприяють поліпшенню швидкості, якості та інформативності стану обладнання.

Ключові слова: плунжерний насос, температура підшипників, кореляційний аналіз, число оборотів насоса, рівняння регресії, шкала Чеддока, точність вимірювань.

Постановка проблеми. Потенциал химической индустрии является общепризнанным критерием развития государственной экономики в целом. На сегодняшний день актуальной остается внедрение программы «Химическая индустрия 4.0.», которая подразумевает некий симбиоз новых инновационных технологий и информационно-коммуникационных систем в химическую индустрию с целью выведения продукции на качественно новый уровень. Но, к сожалению, из-за устаревшего оборудования, частых ремонтных работ, высокой энергозависимости это не представляется возможным.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросом повышения надежности насосного оборудования ученые занимаются на протяжении

многих лет. Каждый рассматривал различные перспективы усовершенствования оборудования методом резервирования, повышения уровня герметичности с помощью реконструкции клапана. Значительными недостатками данных способов была недостаточная информативность о состоянии насоса, узко направленная специфика, погрешность измерений, затратность методов. Также были созданы различные методики по измерению состояния оборудования. По такому принципу используются манометры, уровнемеры, газоанализаторы, пьезодатчик и так далее. В последнее время часто применяются уровнемеры. Относительно уровнемеров, то это приборы для измерения предельного значения (уровня) или контроля емкости в сыпучих, жидких, агрессивных средах [4, с. 210].

В агрессивных средах используют бесконтактный метод, где велика вероятность засорения или коррозии устройства [1, с. 99]. Ультразвуковые уровнемеры основаны на поглощении колебаний при возвращении от отраженного сигнала среды [2, с. 35]. Преимущества: многофункциональность устройства, отсутствие контакта со средой, измерение давления на результат не влияет. Существенными же недостатками являются: погрешность сигнала зависит от внешних источников (пыль, пар, газовая смесь), ограниченный диапазон для высоких давлений и температур [3, с. 193]. Микро-волновые уровнемеры построены на принципе измерения отраженных радиоволн от поверхности системы «газ – контролируемая среда» [5, с. 113]. Высокая точность измерений, применимость в различных жидкостях, отсутствие погрешности давления и температуры являются преимуществами радарных уровнемеров, к недостаткам относятся: дороговизна, ограничения по диэлектрической проницаемости. Также существенный вклад вносят газоанализаторы – устройства для контроля количества вредных примесей в воздухе [7, с. 154]. Часто применяются на предприятиях термохимические газоанализаторы для сигнализации пропусков паров химического вещества из оборудования. Они работают на принципе восприятия химически чувствительной пленки примесей окружающей среды [6, с. 58–60]. Преимущества устройства: низкая инерционность [8, с. 157], низкая стоимость, а недостатки: пониженная износостойкость сенсора, задержка данных, низкая чувствительность. Тензодатчики, необходимые для измерения уровня вибрации агрегатов, предотвращают износ подшипников. Измерение деформаций – статических и динамических, крепления датчиков к изделию,

простота методики измерений являются неотъемлемыми преимуществами, но недостатками остаются большая погрешность из-за воздействия на датчики температуры. Повышенные нагрузки на оборудование, значительные потери человеко-часов на текущие ремонты приводят к понижению износостойкости оборудования. Поэтому проблема повышения надежности эксплуатационных условий работы насосного оборудования остается актуальной на сегодняшний день.

Постановка задания. Целью данной работы являлось повышение надежности эксплуатационных условий работы плунжерного насоса путем определения его текущего состояния.

Изложение основного материала исследования. Температура подшипников является одним из критериев, способствующих показать информативность состояния насоса при полной или частичной загруженности агрегата. Из-за интенсивности работы, отсутствия прерывания технологического процесса путем внедрения в структурный элемент цепочки нет возможности непосредственного измерения температуры подшипников. Решением данной проблемы является измерение бесконтактным методом температуры корпуса в месте опоры подшипника. Для повышения точности измерений используется цифровой метод обработки данных с термодатчиков с помощью модуля аналого-цифрового преобразователя термоЭДС.

Для эксперимента была использована сталь, толщина которой соответствовала требованиям технической документации по применению плунжерных насосов. Исследования проводилось путем нагрева стали электрическим нагревательным элементом со стабилизацией и контролем температуры.

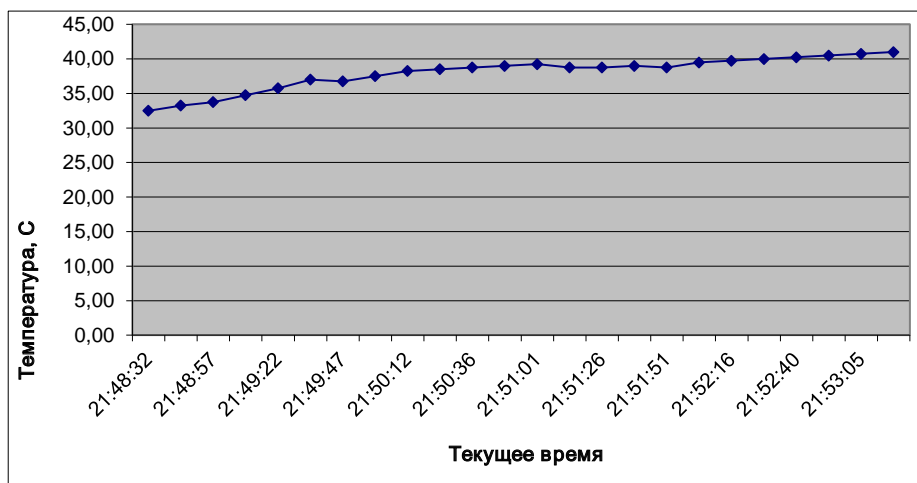


Рис. 1. Выход на рабочий режим насосного оборудования

Получены температурные характеристики в режиме реального времени, показывающие три функциональные позиции насоса: включение, выход на рабочий режим и работу при максимально допустимой нагрузке. Был экспериментально подтвержден факт зависимости температуры подшипников от производительности насоса в результате повышения нагрузки основной продукции. На основе ряда экспериментов получены следующие графики (рис. 1, 2, 3).

Анализируя полученные результаты, наблюдается зависимость температуры подшипников от производительности насоса и количества оборотов в минуту.

Для уточнения тесноты взаимосвязи между температурой подшипников Q и частотой оборотов n необходимо рассчитать парный показатель корреляции:

$$r = \frac{2542.374 - 65.618 \cdot 38.69}{2.4603 \cdot 1.5696} = 0.9215$$

По шкале Чеддока [9, с. 10] связь между признаками $0.9 < r_{xy} < 1$ весьма высокая и прямо пропорциональная, при этом ковариация будет равна:

$$cov(x, y) = 2542.374 - 65.618 \cdot 38.69 = 3.5587$$

Линейное уравнение регрессии имеет вид: $y = 0.588x + 0.114$. Определим коэффициент эластичности, отображающий процентное соотношение изменения результата Y при изменении X на 1% от среднего своего значения:

$$E = 0.588 \cdot \frac{65.618}{38.69} = 0.9972$$

Коэффициент эластичности почти равен 1. Из этого следует, что при изменении X на 1%, Y

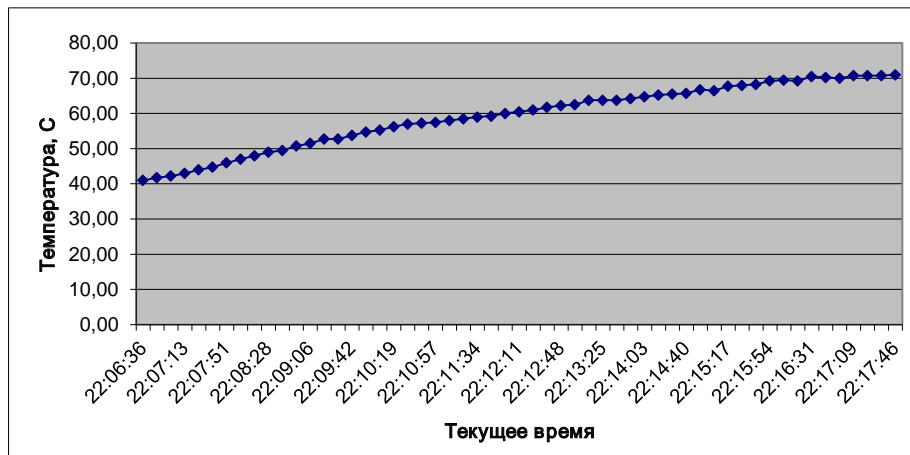


Рис. 2. Состояние подшипников при максимальной нагрузочной способности насоса

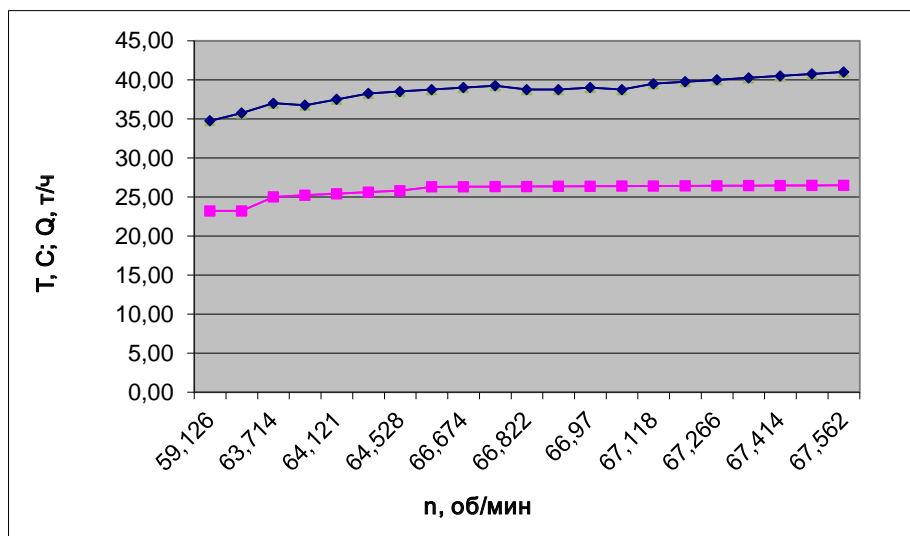


Рис. 3. График зависимости температуры подшипников и производительности насоса от количества оборотов

изменится на 1%. То есть связь неразрывная и равнопропорциональная.

Найдем коэффициент детерминации, показывающий варьирование результирующего признака:

$$R^2 = 0.9972^2 = 0.8491$$

Исходя из расчета, в 84,9% случаев изменение X приводит к изменению Y. Точность подбора уравнения регрессии высокая.

Средняя ошибка аппроксимации будет равна:

$$\bar{A} = 0.01367 * 100\% = 1.367\%$$

Ошибка аппроксимации показывает, насколько расчетные значения отличаются от фактических. Поскольку ошибка составляет меньше 7%, уравнение регрессии считается справедливым.

Для определения статической значимости коэффициента корреляции найдем величину случайной ошибки:

$$t_{набл} = 0.9215 * \frac{\sqrt{21-2}}{\sqrt{1-0.8491}} = 10.34$$

По таблице Стьюдента с уровнем значимости $\alpha=0.025$ и степенями свободы $k=19$ находим $t_{крит}$:

$$t_{крит} = (19; 0.025) = 2.093$$

Так как $|t_{набл}| > t_{крит}$, то гипотеза о нулевом коэффициенте регрессии отклоняется. Коэффициент статически значим, связь между переменными линейна.

Доверительный интервал находится в диапазоне:

$$\left(0.9215 - 2.093 * \sqrt{\frac{1-0.8491}{21-2}}; 0.9215 + 2.093 * \sqrt{\frac{1-0.8491}{21-2}} \right) = (0.735; 1)$$

Коэффициент парной корреляции входит в доверительный интервал и рассчитан верно.

Для определения точности оценки коэффициентов уравнения регрессии необходимо найти необъясненную дисперсию и стандартную ошибку отклонения:

$$S^2 = \frac{7.8034}{19} = 0.4107$$

$$S = \sqrt{0.4107} = 0.6408$$

Тогда стандартное отклонение случайной величины а:

$$S_a = 0.6408 * \frac{\sqrt{90548.99}}{21 * 2.4603} = 3.7323$$

Стандартное отклонение случайной величины b будет равно:

$$S_b = \frac{0.6408}{\sqrt{21} * 2.4603} = 0.057$$

$$t_a = \frac{0.114}{3.7323} = 0.177$$

$$t_b = \frac{0.588}{0.0568} = 10.34$$

Равенство $t_b^2 = t_{набл}^2$ подтверждает парность линейной регрессии и сущность линейного уравнения регрессии.

Проверка значимости модели регрессии в целом выполняется на основе дисперсионного анализа с помощью критерия Фишера (F – критерия) [10, с. 17].

$$R^2 = 1 - \frac{51.73}{7.8034} = 0.8491$$

Определение фактического значения F-критерия:

$$F_{факт} = \frac{0.8491}{1-0.8491} * \frac{(21-1-1)}{1} = 106.99$$

F табл – это максимально возможное значение критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости α [10, с. 18].

Табличное значение критерия со степенями свободы $k_1=1, k_2=19, \alpha=0.01$:

$$F_{табл} = 4.38$$

Исходя из того, что фактическое значение $F > F_{табл}$, то найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Для проверки взаимосвязи между $t_b = \sqrt{F}$; $10.34 = 10.34$, а значит связь доказана, равенство коэффициентов.

Для проведения анализа качества модели регрессии применяют теорему о разложении дисперсии. Суть ее заключается в том, что общая дисперсия результирующего признака раскладывается на две части – необъясненную и объясненную дисперсии уравнением регрессии.

Определяем дисперсию зависимой переменной:

Таблица 1

Характеристика модели уравнения регрессии

Критерий	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия на 1 степень свободы	F-критерий
Модель (объясненная)	0	1	0	106.99
Остаточная	43.9	19	7.8	1
Общая	51.8	21-1		

$$\sum (y_i - y_{cp})^2 = \sum (y(x) - y_{cp})^2 + \sum (y - y(x))^2,$$

где $\sum (y_i - y_{cp})^2$ – общая сумма квадратов отклонений;
 $\sum (y(x) - y_{cp})^2$ – факторная сумма квадратов отклонений;
 $\sum (y - y(x))^2$ – остаток суммы квадратов отклонений.

$$51.7 = 7.8 + 43.9$$

Необходимым также считается введение результирующего показателя на основе теории нечеткой логики. Результирующая функция принадлежности будет равна [11, с. 71]:

$$\mu_1^n = \min\{\mu_1(e_{t1}, e_{t2})\} = \min\{\mu_1(e_{t1}, e_{t2}), \mu_{ps}(y)\}$$

Выводы. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

- изменение температуры подшипников зависит от производительности насоса;
- между температурой подшипников и числом оборотов насоса существует тесная и прямо пропорциональная взаимосвязь по шкале Чеддока;
- коэффициент детерминации $R^2 = 0.8491$, корреляции $r = 0.9215$, эластичности, показывающий процентное изменение результирующего параметра от факторного $E = 0.9972$, средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 1.367\%$;
- выведены графические зависимости изменения температуры подшипников с течением времени;
- введен результирующий показатель системы диагностирования.

Список литературы:

1. Винокуров Б.Б. Современная уровнеметрия жидких сред. Томск : Томский политехнический университет, 2014. С. 118.
2. Вильнина А.В. Вильнин А.Д., Ефремов Е.В., Современные методы и средства измерения уровня в химической промышленности. Томск : Томский политехнический университет, 2011. С. 207.
3. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. 3-е изд. перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1983. 424 с.
4. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник В.Я. Баранов Ленинград : Машиностроение, 1987. 840 с.
5. Винокуров Б.Б. Метрология и измерительная техника. Уровнеметрия жидких сред : учеб. пособие для академического бакалавриата. Москва : Издательство Юрайт, 2016. 187 с.
6. Павленко В.А. Газоанализаторы. Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1965. 58–60 с.
7. Емельянов А.И. Практические расчеты в автоматике Москва : Машиностроение, 1967. 154 с.
8. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. Москва, 2003.
9. Ишханян М.В., Карпенко Н.В. Эконометрика. Часть 1. Парная регрессия : учебное пособие. Москва : МГУПС (МИИТ), 2016. 117 с.
10. Козина А.Т. Практикум по эконометрике : учебное пособие. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2011. 96 с.
11. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств : учеб. пособие Владим. гос. ун-та. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 96 с.

Hupalo Yu.Yu. IMPROVING RELIABILITY OF PLUNGER PUMP

The article considered the bearing temperature as a fundamental parameter for assessing the current state of pumping equipment, informed about the condition of the bearings at full or partial load of the unit. It is possible to reduce the time for repair due to a new method of measuring, processing and obtaining current information. The new method involves the use of digital processing of data from a thermocouple using the module of the analog - digital thermoelectric converter, helping to increase the speed and accuracy of

measurements. The temperature measuring point is located in the bearing support on the housing surface, since a direct measurement method is not possible. For the experiment, steel was used, the thickness of which corresponded to the requirements of technical documentation for the use of plunger pumps. The research was carried out by heating steel with an electric heating element with stabilization and temperature control. During the experiment, temperature characteristics were obtained that determined the three functional positions of the pump: switching on, reaching the operating mode and working at the maximum allowable load. It is proved that during partial or full load of the unit by mechanical friction of the leading elements, the temperature of the bearings increases, which leads to cracks in the bearing material itself and further wear. Analyzing the results obtained, the dependence of the bearing temperature on the pump performance and the number of revolutions per minute is observed.

The nature of the relationship between the temperature of the bearings and the number of revolutions of the pump on the Cheddock scale is determined, the linear regression equation is calculated, the elasticity coefficient expressing the continuity of the relationship between the parameters and equal proportionality. The approximation error calculated shows how much the calculated values differ from the actual ones. The hypothesis of a zero regression coefficient and a static relationship between the parameters has been tested.

Graphical dependencies of temperature on the current operating time are derived, which contribute to improving the speed, quality and information content of the equipment condition.

Key words: *plunger pump, bearing temperature, correlation analysis, pump speed, regression equations, Cheddock scale, measurement accuracy.*

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/02>

Ковальчук Ю.О.

Уманський національний університет садівництва

Пушка О.С.

Уманський національний університет садівництва

Войтік А.В.

Уманський національний університет садівництва

Ковальчук А.О.

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Садовий К.В.

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ІЗ ЧАВУНУ

Наводяться результати розробки лазерно-плазмового методу для зміцнення поверхні металів. Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду. Розряд запалюється повторюваними з високою частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променя CO₂ лазера. Для утворення плазми в обробній головці створюється високошвидкісний потік газу: аргону, азоту, кисню. Потік плазмоутворюючого газу в плазмохімічній камері має швидкість до 500 м/с і тиск до 0,5 МПа.

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 з традиційним лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вища, ніж у традиційного лазерного гартування. Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Для підвищення зносостійкості сірого чавуну в парах тертя методом лазерної обробки створена структура з високотвердим (12-20 ГПа) наноструктурованим поверхневим шаром товщиною до 1 мкм, який прилягає до шару товщиною близько 100 мкм з локально загартованими навколо графітових включень ділянками. Отримана структура поверхні забезпечує зниження коефіцієнта тертя на 30% і 20-кратне збільшення зносостійкості в умовах рідинного тертя. Це зумовлено створенням мікрорельєфу пар тертя, що включає капілярні канали, які акумулюють мастило по місцях розташування графіту, і тверді складники – ледебурит і мартенсит, які оточують ці мікроканавки.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при лазерно-плазмовій обробці чавуну, на властивості міцності проведені випробування на статичний згин і ударну в'язкість. Отримані результати не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після застосування лазерно-плазмового методу обробки.

Ключові слова: лазерна плазма, оптичний пульсуючий розряд, гартування, мікротвердість, зносостійкість.

Постановка проблеми. Серед виробників сільськогосподарської техніки особливої актуальності набуло питання покращення механічних властивостей і збільшення ресурсу виробітку деталей двигунів внутрішнього зго-

рання, багато з яких виготовляються із чавуну. Перед ними стоїть задача забезпечення високих експлуатаційних характеристик тих деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять із ладу.

Одним із можливих методів зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння є лазерно-плазмова обробка, яка поки що майже не застосовується виробниками. Для ефективного застосування цього методу модифікації поверхонь металевих виробів необхідно враховувати внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, які відбуваються внаслідок впливу лазерно-плазмового струменю, а також залежність властивостей зміцнюваного зразка від заданих параметрів лазерно-плазмової обробки.

Правильний підбір параметрів процесу зміцнення під час застосування лазерно-плазмового методу (далі – ЛПМ) забезпечуватиме значно вищі показники міцності та зносостійкості оброблюваних зразків, ніж можуть забезпечити інші методи. Тому системне дослідження особливостей впливу лазерно-плазмового струменю на зміцнювану поверхню матеріалу натеper є актуальним і важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішення задач, пов'язаних із визначенням властивостей сталей, які зазнають впливу лазерно-плазмового струменю, привертає увагу багатьох науковців і вчених. Цим питанням вчені почали займатися ще за радянських часів (Н.Н. Рикалін та А.А. Углов) [1]. В наш час цими питаннями займалися С.Н. Багаєв, Г.Н. Грачов, А.Л. Смирнов та інші, які вивчали вплив лазерно-плазмового потоку на поверхню зразків у різних випадках та для різних сплавів [2–3].

Існуючі дослідження впливу параметрів процесу лазерно-плазмової обробки поверхні залізо-вуглецевих сплавів, з яких виготовляють деталі сільськогосподарських машин, здебільшого охоплюють обмежене коло випадків, тому отримані дані потребують подальшої систематизації та узагальнення.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерно-плазмової обробки на властивості чавуну, аналіз особливостей формування мікроструктури у відповідних зразках, визначення залежності глибини та мікротвердості зміцнюваної зони від різних параметрів цього процесу, дослідження зносостійкості та інших механічних властивостей оброблених лазерно-плазмовим методом зразків із чавуну.

Виклад основного матеріалу дослідження. Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду (далі – ОПР), який запалюється повторюваними з високою частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променя

CO₂-лазера в швидкісних потоках газів із домішками реагуючих компонентів на поверхні оброблюваного матеріалу. Експериментальними і теоретичними методами визначено, що плазма ОПР для ініціації хімічних реакцій має унікальне поєднання властивостей, недоступних для існуючих способів (індукційний надвисокочастотний нагрів НВЧ, тліючий, дуговий і безперервний оптичний розряди, піроліз, горіння):

- рекордною (для плазмохімічних методів) питомою потужністю енерговиділення в обсязі газової фази до 5 ГВт/см³;

- можливістю отримання локально рівноважної (час обміну ~ 10 нс)

- плазми при тиску 1 атм. і більше;

- високою температурою і концентрацією (10¹⁸-10¹⁹ см⁻³) частинок;

- високим рівнем ультрафіолетового радіаційного обміну, сприятливого

- для дисоціації, іонізації, збудження частинок;

- швидким (за мікросекунди) охолодженням плазми ОПР, що забезпечує

- контрольоване гомогенне утворення частинок без забруднень, зменшення їх розміру, пригнічення росту, отримання не тільки наночастинок, а й нанокластерів.

Поряд із фізико-хімічними перевагами ЛПМ необхідно зазначити й загальні переваги для розробки промислових нанотехнологій:

- процес може проводитися при тиску газу в зоні реакції більше

- атмосферного, що часто дозволяє виключити з технологій дорогі вакуумні системи, відмовитися від робочої камери і проводити обробку великогабаритних виробів складної конфігурації автоматизованими маніпуляторами за заданою програмою;
- ефективний обмін енергією між лазерною плазмою і металом

- забезпечує 7-10-кратне збільшення продуктивності ЛПМ порівняно з традиційним лазерним гартуванням і 3-4-кратне – для технологій наплавлення, легування;

- високі робочі тиски забезпечують осадження нанокompatитних

- покривів зі швидкостями синтезу на 2-3 порядки більшими, ніж у відомих методах плазмохімічного осадження з газової фази;

- метод дозволяє використовувати широкий спектр вихідних

- компонентів (гази, аерозолі, пари) і вибирати з них найбільш прийнятні для промислової реалізації технології;

– широкі діапазони управління характеристиками імпульсно-періодичного

випромінювання, швидкістю потоку (0-500 м/с), сортом і складом буферного або робочого газу (Ar, He, Ne, H₂, N₂, O₂, CO, CO₂) забезпечують можливості широкого пошуку і оптимізації за ефективністю варіанта технології;

– можливість проведення спрямованого синтезу наноматеріалів із

використанням вихідних компонентів у вигляді стехіометричної суміші аерозолів (в тому числі тугоплавких), що значно спрощує і здешевлює завдання підбору вихідних реагентів.

Основою лазерно-плазмової технологічної установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична CO₂-лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт і імпульсною потужністю близько сотні кіловат з можливістю управління частотою слідування (до 120 кГц) і тривалістю лазерних імпульсів. Оригінальна оптична схема системи генератор-підсилювач дозволяє формувати промінь із плоским фронтом, плавним розподілом інтенсивності і якістю, близькою до дифракційної межі, усунути ефекти самозбудження системи «лазер-метал» поблизу фокуса, які призводять до спотворення форми імпульсу (зниження імпульсної потужності), а також розподілу інтенсивності і в результаті до нестабільності лазерно-плазмової обробки.

Лазерний промінь поворотними дзеркалами, розташованими на рухомих порталах і каретці програмно-керованого двокоординатного столу, направляється на лінзу лазерно-плазмової обробної головки і фокусується на осі газового потоку з домішками реагуючих компонентів. Таке технічне рішення дозволяє проводити лазерно-плазмову обробку безпосередньо в атмосфері і тільки необхідних заданих областей виробу.

Існуючі лазерно-плазмові технологічні установки забезпечують широкі діапазони можливостей лазерно-плазмової обробки за інтенсивністю променя (до 2-3 ГВт/см²), за швидкістю потоку (до 500 м/с) і тиском газу в плазмохімічній камері (до 0,5 МПа) для модифікації поверхні металів із приповерхневою плазмою. При лазерно-плазмовій модифікації поверхні металів повторювані з високою частотою слідування лазерні імпульси, сфокусовані на поверхні металу рухомого зразка, запалюють плазму оптичного пульсуючого розряду в потоці робочого легуючого газу (наприклад, азоту при нітридації) (Рис. 1) [2].

Набір осцилограм, отриманий під час проведення ЛПМ-обробки, дозволяє визначити, коли

і при якій потужності випромінювання настає перевищення інтенсивності над порогом запалювання і виникає лазерна плазма, а також динаміку й ефективність поглинання лазерного випромінювання утворюваною плазмою (Рис. 2) [3].

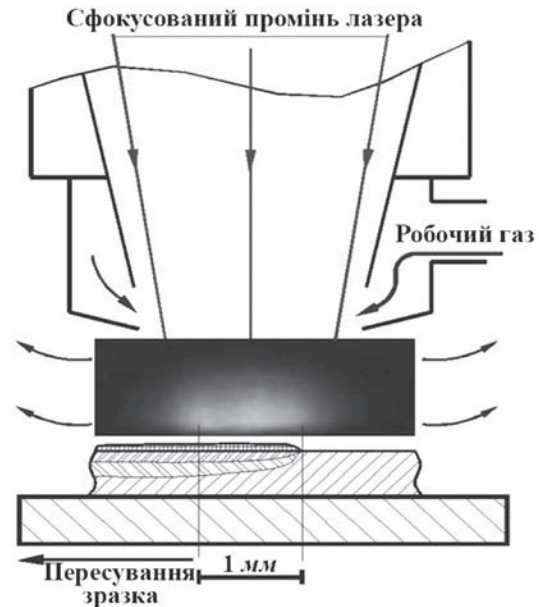


Рис. 1. Схема лазерно-плазмової обробки металу із зображенням приповерхневої плазми оптичного пульсуючого розряду

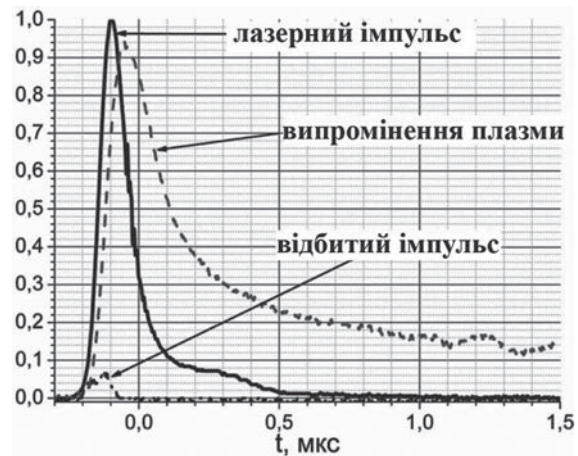


Рис. 2. Осцилограми лазерного імпульсу, випромінювання плазми та відбитого від металу лазерного імпульсу

Залежно від частоти проходження лазерних імпульсів, розміру плями опромінювання і відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки може включати десятки-сотні впливів лазерної плазми на кожен ділянку поверхні. Здебільшого тривалість циклу обробки в умовах інтенсивного впливу променя і лазерної плазми (десятки МВт/см²) обмежена розплавленням поверхневого шару, що перевищує допуски на

шорсткість оброблюваної поверхні. Для досягнення більшої рівномірності і поліпшення технологічних характеристик виробу, наприклад твердості і глибини зони лазерно-плазмової модифікації (Рис. 3), замість одного циклу обробки можливе проведення декількох повторюваних циклів із більшою швидкістю і меншою кількістю енергії [3].

Необхідно зазначити, що періодична (20-100 кГц) дія лазерної плазми на поверхню металу в легуючій атмосфері одночасно формує:

- високотверде наноструктуроване твердофазне покриття (нітриди, карбіди);
- хвилю дифузії, утворення легованого шару або твердого розчину (наприклад, твердий розчин азоту в титані);
- теплову хвилю і структурно-фазові (наприклад, мартенситні) перетворення;
- гіперінтенсивний ультразвук (амплітуда до 10-15 МПа), що сприяє ущільненню мікроструктури в гарячій зоні.

Детальне дослідження можливостей методу проведено для лазерно-плазмової модифікації поверхні антифрикційного чавуну на перлітній основі

(з метою визначення перспектив застосування ЛПМ для зміцнення гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння) на зразках, вирізаних із циліндричних втулок двигунів внутрішнього згоряння.

У всіх досліджених зразках спостерігалася модифікація поверхні з утворенням двох шарів. Верхній наноструктурований шар товщиною сотні нанометрів набував мікротвердості в діапазоні 12-15 ГПа (Рис. 3а) за рахунок насичення азотом і утворенню тонкої мікроструктури. До верхнього наноструктурованого шару прилягав шар, який мав ділянки зі структурою ледебуриту (гартування з рідкого стану) і мартенситу (гартування з твердого стану). Причому фазові перетворення з плавленням металу розпочиналися внаслідок концентраційної неоднорідності розподілу вуглецю за фазами сплаву закономірно навколо графітових включень. В цьому шарі (між поверхневим шаром і основою металу) відбувалися структурні перетворення, характерні для лазерного гартування, які призводять до збільшення мікротвердості до рівня 8-10 ГПа (в 3-4 рази твердіше основи) на товщині в десятки-сотні мікрометрів (Рис. 3а).

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 із традиційним

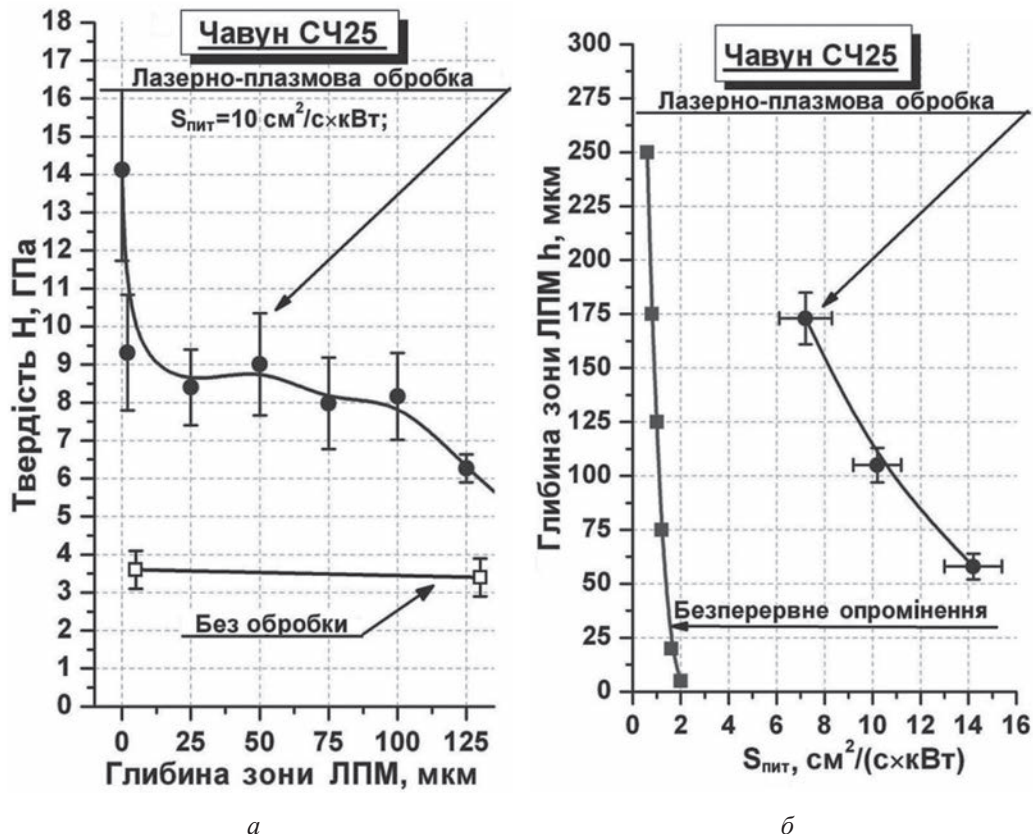


Рис. 3. Мікротвердість (а) та глибина зони (б) лазерно-плазмової модифікації поверхні чавуну СЧ25 залежно від питомої (на 1 кВт потужності лазера) швидкості обробки

лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вище, ніж у традиційного лазерного гартування (Рис. 3б). Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Оцінка триботехнічних властивостей проводилася при випробуванні зразків після попереднього взаємного притирання поверхонь диска (загартована сталь 40) і колодки (зразок, вирізаний із циліндричної втулки двигуна). Питоме навантаження в умовах рідинного тертя при змашуванні маслом становило 1250 МПа. Результати випробувань представлені на Рис. 4 [2]. Оброблені лазером зразки зношувалися в прийнятих умовах випробувань зі швидкістю в 20 разів меншою порівняно зі швидкістю зношування вихідних (без ЛПМ моди-

фікації) зразків. При цьому на третину зменшився коефіцієнт тертя.

У підповерхневих шарах графітові пластини оточені шарами металу зі структурою, отриманою загартуванням з рідкого (ледебурит) і твердого (двійниковий мартенсит) стану. Ці тверді ділянки сприймають зусилля, що виникає в парі тертя, забезпечуючи зносостійкість чавуну. Крім того, вони перешкоджають затиранню графітових частинок, зберігаючи мастилоутримуючий рельєф поверхні і забезпечуючи низький коефіцієнт тертя.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при ЛПМ обробці чавуну, були проведені випробування на статичний згин σ_s і ударну в'язкість a_u . Отримані результати (Табл. 1) не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після ЛПМ. Тому цей метод показує кращі показники, ніж звичайне лазерне зміцнення [4].

Таблиця 1

Вплив лазерно-плазмової обробки на механічні властивості сірого антифрикційного чавуну на перлітній основі

Стан матеріалу	Питома швидкість зношування $V_{zn} \cdot 10^{-7}$, г/год	Коефіцієнт тертя f	Статичний згин σ_s , МПа	Ударна в'язкість a_u , КДж/м ²
СЧ25 без обробки	142	0,0059	400-420	85-90
СЧ25 після ЛПМ	6	0,0035	420-430	80-85

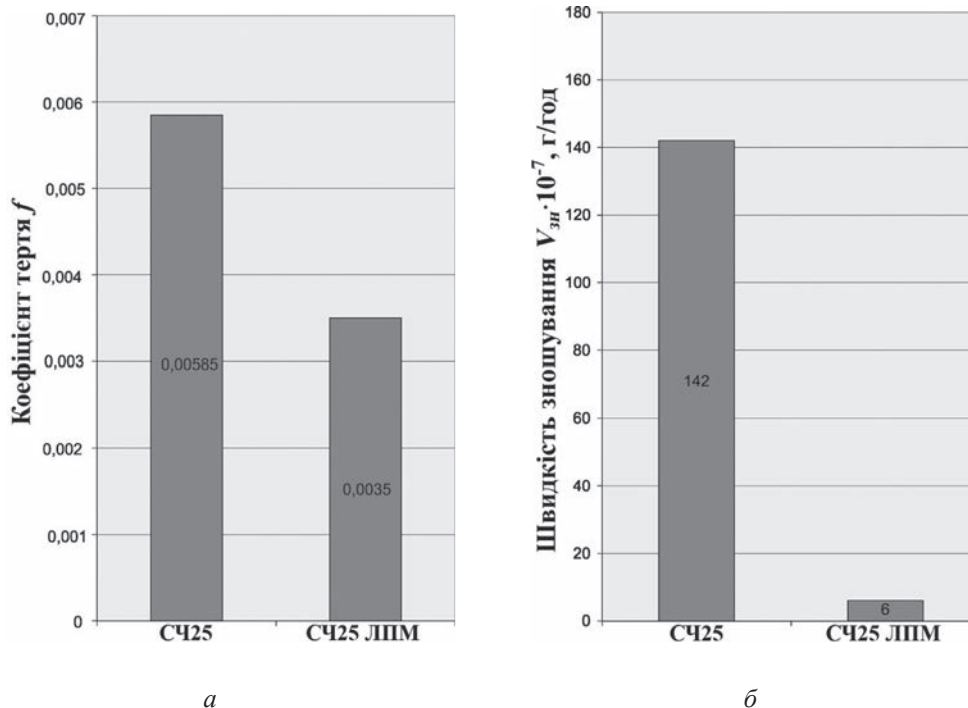


Рис. 4. Вплив лазерно-плазмової обробки на коефіцієнт тертя (а) та швидкість зношування (б) зразків із сірого чавуну в парі тертя «сталевий диск – чавунна колодка»

Висновки. Шляхом застосування лазерно-плазмового методу була виконана високопродуктивна модифікація поверхні сірого чавуну, на якій сформована унікальна композитна структура, що складається з високотвердого поверхневого шару з мікротвердістю 12-20 ГПа і загартованого під-

шару з мікротвердістю 8-10 ГПа товщиною в десятки-сотні мікрон. Випробування на зразках із сірого чавуну на перлітній основі марки СЧ25 показало, що така композитна структура може багаторазово збільшити зносостійкість відповідних деталей, які визначають ресурс техніки.

Список літератури:

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов. *Квантовая электроника*. 1981. Т. 8. № 6. С. 1193–1201.
2. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О., Смирнов П.Ю. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания. *Обработка металлов*. 2014. № 1 (62). С. 14–23.
3. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О. Модификация поверхности серого чугуна методом лазерно-плазменной обработки. *Актуальные проблемы в машиностроении* : материалы Первой междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 26 марта 2014 года). Новосибирск, 2014. С. 229–235.
4. Ковальчук Ю.О., Дідур В.В., Кравченко В.В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. 2012. Вип. 25. Ч. 1. С. 74–80.

Kovalchuk Yu.O., Pushka O.S., Voitik A.V., Kovalchuk A.O., Sadovyi K.V.

APPLICATION OF LASER-PLASMA HARDENING METHOD OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES PARTS FROM CAST IRON

The results of the development of a laser-plasma method for hardening the surface of metals are presented. The laser-plasma method is based on the use of plasma optical pulsating discharge. The discharge is ignited by laser pulses repeated at a high repetition rate (tens of kilohertz) at the focus of the CO₂ laser beam. For plasma formation in the processing head, a high-speed gas stream is created: argon, nitrogen, oxygen. The plasma-forming gas flow in the plasma-chemical chamber has a velocity of up to 500 m/s and a pressure of up to 0.5 MPa.

Comparison of the specific productivity of laser-plasma processing of SCh25 cast iron with traditional laser hardening by continuous radiation showed that the productivity of laser-plasma processing is 7-10 times higher than that of traditional laser hardening. This is explained by a 4-5-fold increase in the energy exchange efficiency between the laser plasma and the metal, compared with direct absorption of laser radiation, as well as the action of hyperintensive ultrasound.

To increase the wear resistance of gray cast iron in friction pairs by laser processing, a structure with a high-hard (12-20 GPa) nanostructured surface layer up to 1 μm thick adjacent to a layer about 100 μm thick with sections locally quenched around graphite inclusions is created. The resulting surface structure provides a decrease in the coefficient of friction by 30% and a twenty-fold increase in wear resistance under conditions of liquid friction. This is due to the creation of a microrelief of friction pairs, including capillary channels that accumulate lubricant at the locations of graphite, and the solid components – ledeburite and martensite surrounding these microgrooves.

To test the effect of solid phases obtained by laser-plasma processing of cast iron on the strength properties, tests were carried out for static bending and impact strength. The results do not show a noticeable decrease in bending strength and toughness of gray cast iron after the application of the laser-plasma processing method.

Key words: laser plasma, optical pulsating discharge, hardening, microhardness, wear resistance.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 636.084.76

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/03>**Водяницький Г.П.**

Житомирський національний агроекологічний університет

Мамчур В.А.

Житомирський національний агроекологічний університет

Слюсаренко І.П.

Житомирський національний агроекологічний університет

Тимків В.В.

Житомирський національний агроекологічний університет

ДО МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КОРМОРОЗДАВАЧА ЗМІШУВАЧА-ПОДРІБНЮВАЧА

Моделювання технічної системи є одним з перших етапів пізнання її властивостей з метою подальшого удосконалення та грамотного використання. Змішування твердих компонентів з одночасним їх подрібненням вертикальним конічним шнековим робочим органом є складним робочим процесом, який автори аналітично описали через основні параметри робочого органу та режими протікання процесу. Отримані узагальнені фактори, завдяки чому кількість факторів із семи зменшилось до чотирьох. Це дає можливість скоротити обсяг експериментальної роботи у вісім разів та забезпечити ефективні результати, які оцінюють фактичну дію факторів, що діють на вибраний критерій ефективності, коефіцієнт нерівномірності комплексно, а не нарізно. Модель дає можливість зробити якісну та кількісну оцінку процесу роботи кормороздавача-змішувача-подрібнювача, оптимізувати його параметри робочих органів та режими процесу роботи.

Встановлено, що коефіцієнт нерівномірності суміші залежить пропорційно (18) від частоти обертання шнека (ω) помноженого на коефіцієнт c_1 , який залежить від об'єму бункера (V), фізико-механічних властивостей суміші, її об'ємної маси (ρ та дотичного зусилля зсуву компонентів суміші (τ), кроку шнека (l), зменшеного на значення коефіцієнта c_2 , який залежить від конструкції бункера змішувача. Крім того, на значення коефіцієнта нерівномірності суміші (v') пропорційно впливає швидкість циркуляції компонентів, зменшена в c_3 разів, який залежить від конструктивних параметрів машини та фізико-механічних властивостей суміші, площі бокової поверхні шнека, зменшеної в c_4 разів, що залежить від конструктивних параметрів кормороздавача-змішувача-подрібнювача.

Результати дослідження використовуються на кафедрі при вивченні студентами курсів «Машини та обладнання для тваринництва», «Експлуатація технологічного обладнання для тваринництва» та «Обґрунтування рішень», можуть бути основою для подальшого дослідження та в проектно-конструкторській практиці.

Ключові слова: змішувач-подрібнювач, модель, безрозмірний комплекс, аналіз розмірностей, вертикальний шнек змінного діаметра, критерії подібності.

Постановка проблеми. Змішування – це процес рівномірного перерозподілення компонентів в усьому об'ємі змішуваних матеріалів до стану рівномірної суміші. Однорідність суміші залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, конструктивних рішень і режимів роботи змішувачів. Недостатня вивченість та складність процесу

і його широка розповсюдженість [1] вимагають додаткових досліджень і формалізації здобутих емпіричних знань про процес змішування, зокрема змішування та подрібнення сипких твердих компонентів кормових сумішей для тварин кормороздавачами-змішувачами з вертикальними шнековими робочими органами, дообладнаними ножами.

Науковими дослідженнями та практикою доведено, що згодовування кормів у вигляді збалансованої за всіма компонентами суміші є на 15-30% ефективнішою за згодовування тих же компонентів роздільно [4, 5, 7, 8, 11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Змішування супроводжує робочі процеси при задоволенні практично всіх потреб суспільства. Тому змішування досліджують як на емпіричному, так і на теоретичному рівнях [1, с. 4].

В основу досліджень покладено фізичне та математичне моделювання [1, с. 12]. При моделюванні змішування сипких матеріалів використовують закони Фіка та математичну модель Нав'є-Стокса [1, с. 12]. Для кожного окремого випадку потоку сипких матеріалів на підставі положень [21] дослідники вибирають типові математичні моделі [1]: ідеального витіснення, ідеального змішування, дифузійну, коміркуву чи комбіновану моделі. Кожна з цих моделей має певні позитивні властивості і забезпечує її адекватність процесу змішування сипких матеріалів.

Використання моделей дає можливість описати явища змішування як 3-етапної системи типу «процес». На першому етапі здійснюється макропереміщення компонентів, так зване конвективне рознесення їх у внутрішньому об'ємі змішувача. При цьому має місце висока швидкість зниження коефіцієнта неоднорідності суміші. Наприкінці етапу в робочому об'ємі змішувача немає макрооб'ємів, які складаються з частинок одного компонента.

Конвективне змішування залежить від конструкції змішувача та режимів його роботи, які визначають характер руху потоку компонентів у змішувачі. Етап «макропереміщення» відбувається одночасно з етапом «мікропереміщення», або дифузії, коли компоненти проникають через межі макрооб'ємів, зменшуючи коефіцієнт неоднорідності суміші. Наростання дифузії визначається фізико-механічними властивостями компонентів суміші. Паралельно з конвекцією та дифузиею з наростаючим темпом відбувається третій етап змішування, сегрегації [9, с. 10], який погіршує коефіцієнт нерівномірності розподілу компонентів суміші, тобто впливає зворотньо на процес змішування. Як і дифузія, сегрегація залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, а також залежить від конструкції та режимів роботи змішувача.

Слід зазначити, що результати досліджень [1, с. 12] процесу змішування сипких неоднорідних матеріалів одночасно з подрібненням вер-

тикальними шнековими конічними робочими органами є досить обмеженими. Особливістю конструкції робочого органу є те, що шнек обертається в обмеженому стінками сипкої маси просторі [11]. Таким чином робочий орган забезпечує осьове переміщення компонентів за рахунок взаємодії компонентів з безперервно утворюючою обмежувальною стінкою з сипкої маси. Сучасний кормороздавач-змішувач забезпечений доскональними робочими органами з високою стійкістю різальних органів та їх мінімальною енергомісткістю [17, 18].

Мета, завдання та методика досліджень. Метою цієї роботи є дослідження силової та кінематичної дії частинок потоку компонентів у процесі змішування з використанням математичного та фізичного моделювання.

Об'єктом дослідження є технологічна система змішування кормів, в якій засобом виробництва є вертикальний змішувач-подрібнювач зі змінним діаметром шнека з укріпленими ножами, а предметом дослідження – компоненти збалансованої суміші з різними фізико-механічними властивостями.

Для досягнення мети дослідження автори використовують метод моделювання, який дає змогу встановити закономірність процесу між визначальними та визначаючими критеріями. Ця задача належить до фізичних, в яких відсутній фундаментальний фізичний закон, який регулює процес, у цьому випадку змішування з подрібненням твердих матеріалів з різними фізико-механічними властивостями (задача другого виду) [14]. Вибираємо незалежні фактори та функцію – коефіцієнт нерівномірності розподілення компонентів.

Визначаємо початкові умови та виражаємо всі фактори через час змішування, функцію та її похідну [13]. Складаємо диференціальне рівняння за процесом роботи системи. Знаходимо рішення загальне і окремих частин та аналізуємо отриманий результат. Таким чином досліджуємо процес змішування і необхідні кінематичні показники змішувача-подрібнювача. Для спрощення та розв'язання отриманих залежностей приводимо диференціальні рівняння до критеріального вигляду за правилом інтегральних аналогів [6, 15]. При цьому зменшується кількість змінних, знижується складність і підвищується рівень загального опису фізичного процесу змішування.

Методика правила інтегральних аналогів полягає в тому, що необхідно вилучити символи зв'язку між членами рівняння (символи диференціювання, інтегрування та неоднорідні функції);

замінюємо всі члени рівняння на їх інтегральні аналоги; розділяємо всі члени рівняння (за винятком вилучених неоднорідних функцій) на один із них та отримуємо $n-1$ критеріїв подібності; доповнюємо отриману систему критеріїв подібності додатковими критеріями у вигляді аргументів неоднорідних функцій, що входять в рівняння, та перетворюємо отримані критерії подібності в іншу, більш зручну форму запису їх перемноженням, діленням, зведенням у ступінь чи множенням на постійний коефіцієнт [6, 15, 16].

Для оцінки впливу на процес змішування параметрів змішувача (геометричні і кінематичні) та фізико-механічних властивостей компонентів корму складаємо моделі методом аналізу розмірностей [6, 16, 19]. Така модель описує детально внутрішній механізм процесу змішування [6, 15, 16] та дозволяє оптимізувати параметри і режими процесу змішування кормороздавачем-подрібнювачем-змішувачем. Таким чином правило інтегральних аналогів використовуємо при відомому формалізованому описуваному фізичному процесі. В разі відсутності опису процесу доцільно використовувати метод аналізу розмірностей [6, 15, 16, 19].

Методика використання методу аналізу розмірностей [6, 21] передбачає вибір незалежних змінних, які впливають на досліджуваний об'єкт. Для цього об'єкту дослідження це:

$$\frac{dv}{dt} = f(V, \rho, \omega, l, \tau, \vartheta, S), \quad (1)$$

де $\frac{dv}{dt}$ – швидкість вирівнювання контрольного компонента в суміші $\frac{кг}{с}$;

v – середнє квадратичне відхилення кількості контрольного компонента в суміші, кг;

t – час змішування, с; ω – частота обертання шнека, c^{-1} ;

l – крок шнека, м;

τ – дотичне напруження зсуву частинок корму, Па;

S – площа бокової поверхні витка шнека, m^2 .

При оцінці незалежних змінних враховуємо розмірні коефіцієнти та фізичні константи. Вибираємо систему основних розмірностей, через які можна виразити всі вибрані змінні, використовуючи систему основних розмірностей MLT. Після цього записуємо розмірності незалежних найбільш суттєвих (вагомих) некорельованих змінних $V, \rho, \omega, l, \tau, \vartheta, S$ та складаємо безрозмірні комбінації. За основні вибираємо величини V, ρ, τ . Перевіряємо правильність складених комбінацій або узагальнених параметрів [6]. Пам'ятаючи, що кожна комбінація є безрозмірною, кількість комбі-

націй має бути рівна $n-k$, тобто рівна різниці незалежних змінних (n) і вибраної кількості основних величин (k). Кожна змінна має зустрічатися в комбінаціях хоча б один раз.

Результати досліджень. Процес змішування сипких компонентів відбувається паралельно з подрібненням вертикальним шнеком змінного діаметра з розставленими дотично до його зовнішніх країв ножами за рахунок дії гравітаційної ($G = mg$) та відцентрової ($F = \frac{mv^2}{R}$) сил і переміщення компонентів суміші вздовж осі ($S = vt$) вверх, їх циркуляції в горизонтальній площині бункера-змішувача.

Фізична природа процесу змішування сипких матеріалів на підставі виконаних досліджень [1, ...12] та сучасної методики математичного моделювання [13, 14, 23] дають можливість описати цей процес диференціальним рівнянням першого порядку з відокремлюваними змінними:

$$\frac{dv}{dt} = -kv(t), \quad (2)$$

яке описує низку подібних природних процесів. Рішення рівняння (2) виражає функція:

$$v = Ce^{-kt}, \quad (3)$$

а з урахуванням початкових і граничних умов функція процесу цієї технологічної системи матиме такий вигляд при вірогідності $R^2 = 1,00$:

$$v = 0,998e^{-0,5t}, \quad (4)$$

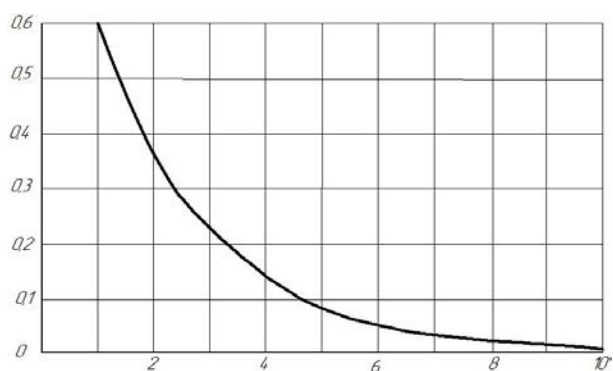


Рис. 1. Залежність коефіцієнта неоднорідності суміші в часі

Рівняння (2) адекватно описує процес роботи досліджуваної моделі ідеального змішування, оцінюючи якість перемішування коефіцієнтом нерівномірності на етапах конвективного та дифузійного змішування та на початку етапу сегрегації.

Коефіцієнт поступово та плавно знижується і за $t = 10$ хв складає $v = 0,07$.

Не всі відомі математичні моделі мають аналітичний розв'язок, а отже є можливість дослідити процес та оптимізувати його режими оптимального протікання, визначити параметри технічної системи, яка реалізує цей процес. Тому доцільним буде перетворення диференціального рівняння у критеріальне. Для цього використовуємо правило інтегральних аналогів [15]. Це правило дозволяє наблизити похибку рівняння до похибки вихідних даних, а при складності чи неможливості визначити фізичну величину, яка входить до складу критеріального рівняння, виконати її шляхом перемноження, ділення, піднесення в степінь тощо. Отримаємо рівняння, похідне від першого.

Так, математична модель ідеального витіснення [1, 5] близька до конвективного змішування:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx}, \quad (5)$$

де c – концентрація ключового компонента, %;
 t – тривалість, с;

v – лінійна швидкість суміші, м/с;

x – координата, м.

Записавши $\frac{dc}{dt} + v \frac{dc}{dx} = 0$ та прийнявши [15]

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}, \text{ а } \varphi_2 = \frac{dc}{dx} \text{ та } \varphi_1 = \frac{c}{t}, \text{ а } \varphi_2 = \frac{c}{l}$$

і розділивши перший член на другий, отримаємо піднісши до степеня $a = -1$, отримаємо $\pi' = \frac{l}{vt}$ – критерій, який характеризує швидкість зміни концентрації контрольованого компонента суміші.

Дифузійна модель відповідає потоку суміші з поршневым рухом:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dt^2}, \quad (6)$$

де D_L – коефіцієнт повздовжнього перемішування.

Запишемо рівняння (6) у вигляді:

$$\frac{dc}{dt} + v \frac{dy}{dx} - D_L \frac{d^2c}{dt^2} = 0$$

Приймаємо

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}; \varphi_2 = v \frac{dc}{dx}; \varphi_3 = D_L \frac{d^2c}{dt^2}$$

відповідно до методики [15]

$$\varphi_1 = \frac{c}{t}; \varphi_2 = v \frac{l}{t}; \varphi_3 = D_L \frac{t}{l}.$$

$$\text{Отримаємо } \pi_1 = \frac{vt}{l} \text{ та } \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}.$$

Аналогічно при двопараметричній дифузійній моделі:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dt^2} + \frac{D_R}{R} \cdot \frac{d}{dR} \left(R \frac{dc}{dR} \right),$$

де D_R – коефіцієнт поперечного перемішування;

R і x – радіальна і осьова координати змішування подрібнювача, м.

Після аналітичних перетворень отримаємо

$$\pi_1 = \frac{vt}{l}; \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}; \pi_3 = \frac{D_R t}{l^2}.$$

На підставі цілей дослідження та властивостей критеріїв подібності [6; 16; 21] оцінюємо визначальний (поле швидкостей потоку суміші) та визначаючі критерії і записуємо рівняння у вигляді степінного одночлена:

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^a \cdot \pi_3^b, \quad (8)$$

де A – коефіцієнт пропорційності степенів;

a і b – показники степенів.

A , a і b оцінюємо за результатами реалізації плану повного факторного експерименту типу 2^2 [19].

Механізм дії, який забезпечує процес роботи змішувача, залежить від його конструкції [1]. Більшість залежностей не враховують конструктивні параметри і режими роботи змішувачів, зокрема з вертикальним конічним шнеком, обладнаним ножами, який працює в обмеженому стінками сипкої маси просторі. Для складання співвідношень між параметрами і режимами роботи цієї технологічної системи і використаємо метод аналізу розмірностей.

На підставі другої теореми подібності [6, 16, 19] визначимо критерії подібності для критеріального рівняння на підставі рівняння (1). Розрахунок матриці розмірностей при $k = 3$ вибраних основних величин V, ρ, τ показує, що її визначник не рівний нулеві, $\Delta = -6$. Кількість узагальнених параметрів при $m=7$ суттєвих незалежних факторів, які вагомо визначають напрям процесу, $k_{\pi} = m - k = 7 - 3 = 4$.

Запишемо коефіцієнт нерівномірності суміші через суттєві фактори:

Запишемо рівняння (6) у вигляді:

$$\frac{dc}{dt} + v \frac{dy}{dx} - D_L \frac{d^2c}{dt^2} = 0$$

Приймаємо

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}; \varphi_2 = v \frac{dc}{dx}; \varphi_3 = D_L \frac{d^2c}{dt^2}$$

відповідно до методики [15]

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{c}{t}; \dot{\varphi}_2 = v \frac{l}{t}; \dot{\varphi}_3 = D_L \frac{t}{l^2}$$

Отримаємо $\pi_1 = \frac{vt}{l}$ та $\pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}$.

Аналогічно при двопараметричній дифузійній моделі:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dt^2} + \frac{D_R}{R} \cdot \frac{d}{dR} \left(R \frac{dc}{dR} \right), \quad (7)$$

де D_R – коефіцієнт поперечного перемішування;

R і x – радіальна і осьова координати змішування подрібнювача, м.

Після аналітичних перетворень отримаємо

$$\pi_1 = \frac{vt}{l}; \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}; \pi_3 = \frac{D_R t}{l^2}$$

На підставі цілей дослідження та властивостей критеріїв подібності [6; 16; 21] оцінюємо визначальний (поле швидкостей потоку суміші) та визначаючі критерії і записуємо рівняння у вигляді степінного одночлена:

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^a \cdot \pi_3^b, \quad (8)$$

де A – коефіцієнт пропорційності степенів;
 a і b – показники степенів.

A , a і b оцінюємо за результатами реалізації плану повного факторного експерименту типу 2^2 [19].

Механізм дії, який забезпечує процес роботи змішувача, залежить від його конструкції [1]. Більшість залежностей не враховують конструктивні параметри і режими роботи змішувачів, зокрема з вертикальним конічним шнеком, обладнаним ножами, який працює в обмеженому стінками сипкої маси просторі. Для складання співвідношень між параметрами і режимами роботи цієї технологічної системи і використовуємо метод аналізу розмірностей.

На підставі другої теореми подібності [6, 16, 19] визначаємо критерії подібності для критеріального рівняння на підставі рівняння (1). Розрахунок матриці розмірностей при $k = 3$ вибраних основних величин V, ρ, τ показує, що її визначник не рівний нулеві, $\Delta = -6$. Кількість узагальнених параметрів при $m=7$ суттєвих незалежних фак-

торів, які вагомо визначають напрям процесу, $k_n = m - k = 7 - 3 = 4$.

Запишемо коефіцієнт нерівномірності суміші через суттєві фактори:

$$\frac{dv}{dt} = f(V, \rho, w, \ell, \tau, v, S), \quad (9)$$

Визначимо всі фактори залежності (9) через основні величини V, ρ, τ :

$$\frac{dV}{dt} \cdot (v^{-a} \cdot \rho^{-b} \cdot \tau^{-c}) = \frac{f(w, \ell, v, S)}{v^a \cdot \rho^b \cdot \tau^c}, \quad (10)$$

При певних значеннях показників a, b, c залежність (10) буде записано у вигляді безрозмірних комплексів. Для цього використовуємо метод нульових розмірностей і визначаємо значення a, b, c спочатку для лівої частини залежності (10) при умові вираження її безрозмірним комплексом величин. Для цього позначимо $\frac{dv}{dt}$. Тоді

$$\frac{v'}{V^a \cdot \rho^b \cdot \tau^c}, \quad (11)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях, дотримуючись умови їх однорідності [6]:

$$(M)^{-b-c} \cdot (L)^{-3a+3b+c} \cdot (T)^{-1+2c} = 1.$$

Ця рівність буде справедливою, коли:

$$\begin{cases} -b - c = 0, \\ -3a + 3b + c = 0, \\ -1 + 2c = 0. \end{cases}$$

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими a, b, c і знаходимо $a = -\frac{1}{3}$; $b = -\frac{1}{2}$. Тоді ліва частина залежності (10) буде записана так:

$$\frac{v'}{v^{-\frac{1}{3}} \cdot \rho^{-\frac{1}{2}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}}}$$

або після перетворення

$$\frac{v' \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\tau} \cdot \sqrt{\rho}}, \quad (12)$$

Аналогічно перетворюємо складники правої частини залежності:

$$\frac{w}{V^{a_1} \cdot \rho^{b_1} \cdot \tau^{c_1}}, \quad (13)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

$$M^{-b_1-c_1} L^{-3a_1+3b_1+c_1} T^{2c_1-1} = 1.$$

Така рівність буде справедлива, коли:

$$\begin{cases} -b_1 - c_1 = 0, \\ -3a_1 + 3b_1 + c_1 = 0, \\ 2c_1 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими а, b, с і знаходимо

$a = -\frac{1}{3}$; $b = -\frac{1}{2}$. Тоді ліва частина залежності (10) буде записана так:

$$\frac{\nu}{\nu^{\frac{1}{3}} \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}}}$$

або після перетворення

$$\frac{\nu \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}, \quad (12)$$

Аналогічно перетворюємо складники правої частини залежності:

$$\frac{w}{V^{a_1} \cdot \rho^{b_1} \cdot \tau^{c_1}}, \quad (13)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

$$M^{-b_1-c_1} L^{-3a_1+3b_1+c_1} T^{2c_1-1} = 1.$$

Така рівність буде справедлива, коли:

$$\begin{cases} -b_1 - c_1 = 0, \\ -3a_1 + 3b_1 + c_1 = 0, \\ 2c_1 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$c_1 = \frac{1}{2}; \quad -b_1 = c_1 = \frac{1}{2}; \quad b_1 = -\frac{1}{2};$$

$$a_1 = = \frac{3 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2}}{3} = -\frac{1}{3};$$

$$c_1 = \frac{1}{2}; \quad b_1 = -\frac{1}{2}; \quad a_1 = -\frac{1}{3}.$$

Тоді

$$\frac{\omega}{V^{a_1} \rho^{b_1} \tau^{c_1}} = \frac{\omega}{V^{\frac{1}{3}} \rho^{\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}} = \frac{\omega \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}} = \omega \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}, \quad (14)$$

Перетворюємо складник l правої частини залежності (10):

$$\frac{l}{V^{a_2} \rho^{b_2} \tau^{c_2}} = \frac{L}{L^{3a_2} (ML^{-3})^{b_2} (ML^{-1}T^{-2})^{c_2}}.$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

$$M^{-b_2-c_2} L^{1-3a_2+3b_2+c_2} T^{2c_2} = 1,$$

За умови, що:

$$\begin{cases} -b_2 - c_2 = 0, \\ 1 - 3a_2 + 3b_2 + c_2 = 0, \\ 2c_2 = 0, \end{cases} \quad c_2 = 0; \quad -b_2 = c_2 = 0; \quad 1 - 3a_2 + 0 + 0 = 0; \quad a_2 = \frac{1}{3}.$$

Тоді маємо:

$$\frac{l}{V^{a_2} \rho^{b_2} \tau^{c_2}} = \frac{l}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{l}{\sqrt[3]{V}}. \quad (15)$$

Перетворюємо складник ϑ правої частини залежності (10):

$$\frac{\vartheta}{V^{a_3} \rho^{b_3} \tau^{c_3}} = \frac{LT^{-1}}{L^{3a_3} (ML^{-3})^{b_3} (ML^{-1}T^{-2})^{c_3}}.$$

Записуємо показники при однакових розмірностях $M^{-b_3-c_3} M^{-b_3-c_3} L^{1-3a_3+3b_3+c_3} T^{-1+2c_3} = 1$ з умовою, що:

$$\begin{cases} -b_3 - c_3 = 0, \\ 1 - 3a_3 + 3b_3 + c_3 = 0, \\ -1 + 2c_3 = 0, \end{cases}$$

$$-b_3 = c_3, b_3 = -\frac{1}{2}; \quad 2c_3 = 1, c_3 = \frac{1}{2}; \quad 1 - 3a_3 + \frac{3}{2} - \frac{1}{2} = 0, \quad a_3 = \frac{2}{3}.$$

Тоді

$$\frac{\vartheta}{V^{a_3} \rho^{b_3} \tau^{c_3}} = \frac{\vartheta}{V^{\frac{2}{3}} \rho^{-\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}}$$

Запишемо вираз:

$$\frac{S}{V^{a_4} \rho^{b_4} \tau^{c_4}} = \frac{L^2}{L^{3a_4} (ML^{-3})^{b_4} (ML^{-1}T^{-2})^{c_4}}.$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

$M^{-b_4-c_4} L^{2-3a_4+3b_4+c_4} T^{2c_4} = 1$ за умови, що

$$\begin{cases} -b_4 - c_4 = 0, \\ 2 - 3a_4 + 3b_4 + c_4 = 0, \\ 2c_4 = 0, \end{cases}$$

$$-b_4 = c_4, b_4 = 0; \quad 2c_4 = 0, c_4 = 0; \quad 2 - 3a_4 + 0 = 0, \quad a_4 = \frac{2}{3}.$$

Тоді

$$\frac{S}{V^{a_4} \rho^{b_4} \tau^{c_4}} = \frac{S}{V^{\frac{2}{3}} \rho^0 \tau^0} = \frac{S}{\sqrt[3]{V^2}}, \quad (17)$$

В загальному вигляді вираз (9) буде записано через критерії подібності (узагальнені фактори):

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = f \left[\omega \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}; \frac{l}{\sqrt[3]{V}}; \frac{\vartheta}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}; \frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right]. \quad (18)$$

Таким чином коефіцієнт нерівномірності суміші залежить пропорційно від частоти обертання шнека (w), помноженого на коефіцієнт

$$\sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}$$

та кроку шнека (l), зменшеного в $\frac{1}{\sqrt[3]{V}}$; швидкості циркуляції частинок компонентів суміші (v) та площі бокової поверхні шнека (S), зменшеної в певну кількість разів.

При цьому коефіцієнт залежить від чотирьох визначаючих факторів, які комплексно діють на функцію, а не окремо. Такий підхід скорочує обсяг експериментальної роботи, дія меншого числа узагальнених факторів на функцію відображає системний реальний процес. Отримана модель є простою і доступною для подальшого аналізу та синтезу процесу змішування. Зв'язок між визначальними і визначаючими критеріями має такий вигляд, коли можна оцінити вплив окремих узагальнених факторів на визначальний критерій:

$$\begin{aligned} v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_1 \left(w \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} \right)^{x_1}, \\ v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_2 \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}} \right)^{x_2}, \\ v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_3 \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}} \right)^{x_3}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = k_4 \left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right)^{x_4}.$$

Прологарифмуємо залежності (19):

$$\begin{aligned} 4 \lg(v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}) &= \lg k_1 + \lg k_2 + \lg k_3 + \lg k_4 \\ &+ x_1 \lg \left(w \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} \right) + x_2 \lg \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}} \right) + x_3 \lg \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}} \right) \\ &+ x_4 \lg \left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Виконуємо потенціювання та отримуємо:

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = A \cdot \left(w \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} \right)^a \cdot \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}} \right)^b \cdot \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}} \right)^c \quad (21)$$

де A – коефіцієнт, $A = \sqrt[4]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}$

$$a = \frac{x_1}{6}, \quad b = \frac{x_2}{6}, \quad c = \frac{x_3}{6}, \quad d = \frac{x_4}{6}.$$

де A – коефіцієнт, $A = \sqrt[4]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}$

$$a = \frac{x_1}{6}, \quad b = \frac{x_2}{6}, \quad c = \frac{x_3}{6}, \quad d = \frac{x_4}{6}.$$

Таким чином отримуємо критеріальне рівняння (21), в якому невідомими є показники степенів a, b, c, d . Коефіцієнти визначаємо експериментальним способом [18], використавши залежність (18). Коефіцієнти k_1, k_2, k_3, k_4 і показники степенів оцінюють вплив відповідних узагальнених факторів на коефіцієнт нерівномірності суміші.

Висновки. Вперше виконано моделювання процесу змішування-подрібнення з різними фізико-механічними властивостями твердих кормових компонентів вертикальним конічним шнеком із закріпленими дотично до його зовнішніх країв ножами. Використано метод аналізу розмірностей [6, 10] з отриманням моделі, яка описує внутрішній механізм процесу подрібнення та змішування, що дозволяє оптимізувати параметри і режими робочого процесу кормороздавача-змішувача-подрібнювача.

Доцільно для отримання моделі загального описування процесу змішування компонентів охарактеризувати процес диференціальними рівняннями, що дасть можливість оцінити адек-

ватність отриманої моделі, порівнюючи її з існуючими моделями [1, 2, 3, 5, 7]. Окрім того, бажано оцінити техніко-економічний рівень кормороздавачів-змішувачів-подрібнювачів фірм світу для визначення перспективного технічного рішення.

Список літератури:

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов : учебник. Москва : Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Стренк Ф.П. Перемешивание и аппараты с мешалками : учебник. Ленинград : Химия, 1985. 384с.
3. Кукта Г.М. Оптимальная продолжительность смешивания компонентов комбикормов. Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1971 (№ 11). С. 74–79.
4. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм : учебник. Ленинград : Колос, 1978. 560 с.
5. Дереза О.О., Дереза С.В. Аналіз методів моделювання процесу змішування кормів. Науковий вісник ТДАТУ. 2014. № 4, том 1. С. 95–101.
6. Гухман А.А. Введение в теорию подобия : учебник. Москва : Высшая школа, 1973. 296 с.
7. Брюховецкий А.М., Боярский О.В. Моделирование процесса смешивания сыпучих компонентов у лопатевому змішувачі періодичної дії : монографія. Київ : Урожай, 1994. 136 с.
8. Рудь А.В., Евстратова Н.Н., Белоусов К.Ю. Различные подходы к моделированию процесса движения материала в вертикальном винтовом конвейере. Сб. научн. тр. Sworld. 2013. № 4, том 1. С. 68–74.
9. Ісаєнко А.М., Качан Ю.Г., Іванов В.І. Про моделювання сегрегації руди під час руху похилою поверхнею: математичне моделювання. 2007. № 1. С. 33–39.
10. Непочатов Д.М., Русалев А.М., Бойко И.Г. Сводообразование сыпучих кормов и методика его определения. Вісник ХТНУСГ. 2011. № 108. С. 223–230.
11. Гевко І.Б., Калаціна Ю.Б., Левенець В.Д. Змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами : міжвузівський збірник ЛДТУ. 2002. № 11. С. 75–83.
12. Чвартакський Р.І. Обґрунтування параметрів машин для подрібнення і змішування кормів : дис. д-ра техн. наук. / Нац. техн. унів. ім. Полія. Тернопіль, 2017. 454 с.
13. Пономарев К.К. Составление дифференциальных уравнений : учебник. Москва : Высшая школа, 1973. 560 с.
14. Полюхович Н.В. Методические основы обучения студентов решению прикладных задач по теме: «Дифференциальные уравнения». Ярославский педагогический вестник. 2010. № 2. С. 131–139.
15. Гліненко Л.К., Сухонос О.Г. Основи моделювання технічних систем : монографія. Львів : Бескет Біт, 2003. 173 с.
16. Шенк Х. Теория интегрального эксперимента : учебник. Москва : Мир, 1972. 381 с.
17. Хмельовский В. Обґрунтування параметрів бункера кормоприготувального агрегату. Техніка і технології АПК, 2013. № 6. С. 13–15.
18. Басаргін В.А., Водяницький Г.П., Тимків В.В. Визначення технічного рівня кормороздавачів-змішувачів фірми світу. Тваринництво України. 2017. № 3-4. С. 10–13.
19. Грабар І.Г., Водяницький Г.П. Теорія і технологія наукових досліджень. Електронний навч. Посібник, 2013. Вип. 1. URL: [http:// igseiense.com/content/images/boons/teoriya_ta_technologiya-nauk-doslidzhen.pdf](http://igseiense.com/content/images/boons/teoriya_ta_technologiya-nauk-doslidzhen.pdf). (дата звернення: 05.02.2013).
20. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности : учебник. Ленинград : ГСХЧ, 1963. 416 с.
21. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирование : учебник. Москва : Высшая школа, 1984. 439 с.
22. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры : учебник. Москва : Машиностроение. 1972. 248 с.

Vodyanitsky G.P., Mamchur V.A., Slyusarenko I.P., Tymkiv V.V. TO THE METHOD OF SIMULATING THE WORKING PROCESS OF THE FEEDER OF THE MIXER-SHREDDER

The modeling of a technical system is one of the first stages of cognition of its properties with the aim of further improvement and proper use. Mixing of solid components with their simultaneous grinding by a vertical conical screw working body is a complex workflow, which the authors analytically described through the main parameters of the working body and the modes of the process. The obtained generalized factors, due to which the number of factors from seven decreased to four. This makes it possible to reduce the amount of experimental work by eight times and provide effective results that evaluate the actual action of the factors acting on the selected performance criterion, the coefficient of unevenness in a complex, rather than separately. The resulting model allows you to make a qualitative and quantitative assessment of

the process of operation of the feeder-mixer-grinder, to optimize its parameters of the working bodies and modes of operation.

It has been established that the coefficient of unevenness of the mixture depends proportionally (dependence 18) on the speed of the screw (ω) multiplied by the coefficient c_1 , which depends in turn on the volume of the bunker (V), the physico-mechanical properties of the mixture, its bulk mass (ρ), and the tangential shear force of the components of the mixture (τ) and the step of the screw (e), reduced to the value of the coefficient c_2 , which depends on the design of the mixer hopper. In addition, the ratio of the coefficient of unevenness of the mixture (v') is also proportional to the speed of circulation of components reduced in c_3 times, which depends on the design parameters of the machine, and the physical and mechanical properties of the mixture, the area of the side surface of the screw is reduced to c_4 times, which is alternating from the design parameters of the feeder-mixer-shredder.

The results of the study are used when students study the courses “Machines and Equipment for Livestock”, “Operation of Technological Equipment for Livestock” and “Justification of Solutions” and can also be the basis for further research, as well as in design practice.

Key words: *mixer grinder; model, dimensionless complex, dimension analysis, vertical screw of variable diameter, similarity criteria.*

Voitik A.V.

Uman National University of Horticulture

Kravchenko V.V.

Uman National University of Horticulture

Kutkovetska T.O.

Uman National University of Horticulture

Pushka O.S.

Uman National University of Horticulture

ANALYSIS OF STRIP CULTIVATORS FOR TILLAGE ON THE TECHNOLOGY OF STRIP-TILL

The article presents the problem of choosing an aggregate for bandpass processing of soil with the condition of minimizing energy consumption. Modern cultivators for cutting strips require a large capacity of tractors per one meter of working width. This is primarily due to the large depth of tillage, but also affects the greater weight of the machines. To ensure the possibility of cutting crop residues, the weight of the cultivator must provide the necessary pressure of the disc knives to the soil. As a rule, half of this pressure is achieved by hydraulically clamping the frame of the cultivator or its sections, while the other half is directly the weight of the cultivator. Today manufacturers offer a large number of different cultivators for strip processing. All of them in general have the same working principle, but the combinations of working tools are different. This, in turn, affects the weight, productivity and power consumption. Additionally, different work bodies provide different tasks, or one task with different results, which affects the final purpose of processing and the quality of its execution. The article considers the use of different types of belt cultivators taking into account their productivity, tractor power consumption, weight and cost. Further studies require the question of the quality of the operation of cutting the strips of different sections of strip cultivators. The research methodology for choosing the optimal cultivator using the distance-to-target method and the energy evaluation of mechanized technologies in plant growing is determined. The choice of the least expensive, in terms of energy, schemes of cultivators allowed to draw conclusions about the rational arrangement of working tools in the section. If the main task is to reduce energy consumption, it is better to give preference to cultivators with disk working tools. These can be flat or wavy disks, their choice will primarily depend on the moisture content of the soil. These machines can operate at high speeds of more than 12–15 km / h, which ensures their high performance. The results of theoretical studies on the choice of strip cultivators are based on models of the world's leading manufacturers.

Key words: *Cultivator, Strip-Till, disk knives, working tools, energy evaluation, mechanized technologies.*

Formulation of the problem. From different crops in the crop rotation, row crops, especially those that have well-developed rod roots-ape, sugar beet, corn, sunflower – equire a lot of attention. They loosen the soil good enough and provide a good structure for further cultivation of subsequent crops. In turn, on poor soil preparation and improper handling of the precursor, they react very sensitively with significant fluctuations in yield [1, p. 263]. Given these features, along with the need to save energy and preserve the integrity of the environment in agrarian production, alternative technologies of management are gaining more importance, one of the leading places among which belongs to Strip-Till technologies [2, p. 81].

Analysis of recent research and publications. Technology comes from the United States of America. In recent years, the number of farmers who practice Strip-Till technology in the US is growing every year [3, p. 48].

For many agrarian countries, Strip-Till's system of rational soil management is new. The earth is cultivated on arable depth, and even deeper than strips, and not entirely. In the intervals between the strips, the soil remains untreated and the natural structure of the soil remains intact as in direct sowing.

However, cultivators for strip processing have been little studied. Considering the working conditions of these cultivators in different natural and climatic zones,

it is necessary to investigate the effectiveness of their application. First of all, it is necessary to determine not only the qualitative performance of strip cultivators on soils characteristic of the central region of Ukraine, but also the energy indicators of their use [4, p. 6].

Currently, there are a lot of researches in the field of cultivator working for Strip-Till. The working tool "ROPA", is intended for minimum tillage with a strip deepening [5, p. 35; 6. p 42]. Its curved stand has an internal soil bend in the direction of the field cut at an angle of 45 degrees and is equipped with a flat-cutting foot, a knife and a shoe with an overlaid chisel. A known cultivator working tool that can process a strip 25–35 cm wide to a depth of 37 cm [7, p. 867]. The unit for strip cultivation without plant residue cleansers was proposed by the developers Michael G. Kovach, Rickey L. Gerber [8, p. 2].

Producers of tillage equipment offer a rather large range of Strip-Till cultivators. These are companies such as Orthman, Kuhn, Amazone, Down, Gaspardo, Kverneland, Twin Diamond Industries, Hiniker, Sunflower. Strip-Till cultivators of these companies are of great interest when using them in conditions and soils of Ukraine.

Formulating the goals of the article. Using the distance-to-target method and the energy evaluation of mechanized technologies [9, p. 138], a study was made of the technical and technological parameters of sections of modern cultivators for strip processing of soil.

Let's compare the proposed cultivators for energy indicators. The primary data for selection and justification are the norms for the production of W_{zm} and fuel costs for H_f .

All calculations lead to 1 hectare. For the shifting rate of production, the hourly rate of production W_{hr} ha hr⁻¹ is found.

The energy equivalents are determined as follows.

$$W_{hr} = \frac{W_{zm}}{7}, \quad (1)$$

where W_{zm} is the replacement rate of production, ha hr⁻¹; 7 is the rationary hours.

The number of hours (person-hours ha⁻¹) is determined by the formula:

$$H_{hr} = \frac{1}{W_{hr}}, \quad (2)$$

The energy intensity of the machine unit (MJ ha⁻¹) is:

$$E_{mu} = H_{hr} (a_{ef} + a_{am} + a_c), \quad (3)$$

where a_{ef} , a_{am} , a_c – the energy equivalent of the energy facility, the agricultural machine, the coupling, respectively, MJ ha⁻¹.

Energy consumption of fuel (MJ ha⁻¹) equals:

$$E_f = H_f \cdot a_f, \quad (4)$$

where H_f – is the rate of fuel consumption kg ha⁻¹, is determined by the standards; a_f – is the energy equivalent of fuel; $a_f = 79,5$ MJ kg⁻¹.

Expenses of the operator:

$$Z_o = \frac{n_o}{W_{hr}}, \quad (5)$$

where n_o – the number of machine operators, which serve the unit in one shift.

Since there are no auxiliary workers, the total costs of the work are $Z_c = Z_o$.

Energy intensity of human work (MJ ha⁻¹):

$$E_h = Z_o \cdot a_o + Z_{ad} \cdot a_{ad}, \quad (6)$$

Total energy consumption for the process operation:

$$E_c = E_{mu} + E_f + E_h, \quad (7)$$

The results of the calculations are summarized in Table 1.

For the previous analysis and comparison of different Strip-Till cultivators and the definition of rational, ten brands of cultivators were taken. To solve this problem, multicriteria analysis is applied. The evaluation of alternative methods of selecting the Strip-Till cultivator was carried out using five criteria: cultivator productivity W , ha h⁻¹ (K1); the power of the tractor, which is necessary for the cultivator to work (the power required for the operation of one section) P , kW (K2); mass of cultivator (mass of one section) m , kg (K3); energy intensity of cultivator E , MJ ha⁻¹ (K4); the value of the cultivator (the cost of the section) U , \$ (K5). The initial set of alternative cultivator options for Strip-Till technology and the relevant criteria and their values are given in Table 2 (the number of rows is indicated in parentheses).

To perform multicriteria analysis, we used the distance-to-target method. A comparison of all variants of the original set with a conditional idealized variant is performed, in which the best values of the criteria from the original set of alternative variants are present. The formation of the set of accepted

criteria is carried out with the same direction of improvement (reduction) of all criteria. The task of their comparative evaluation was solved by the method of prioritizing by using the coefficients of significance of the criteria λ_i whose value is calculated under the condition $\sum \lambda_i = 1$. For this, the criteria were compared in pairs and the coefficients of advantages are indicated in the corresponding cells of the matrix (Table 3). For this, the criteria were compared in pairs and the coefficients of advantages are indicated in the corresponding cells of the matrix $K_4 > K_2 > K_1 > K_3 = K_5$.

The coefficient of significance of the criteria λ_i is determined by the formula:

$$\lambda_i = \frac{P_{ij}}{\sum P_{ij}}, \quad (8)$$

where P_{ij} – is the sum of the products of each element of the i -th line by the elements of the vector-column $\sum K_{ij}$ is defined as:

$$P_{ij} = [K_{ij}] [\sum K_{ij}]^{\downarrow}, \quad (9)$$

Table 1

Calculation of the energy intensity of aggregates

Brand cultivator	Productivity			Energy intensity of unit, MJ ha ⁻¹	Fuel consumption, kg·ha ⁻¹	Energy intensity of fuel, MJ ha ⁻¹	Cost of work, person-h ha ⁻¹	Energy intensity, MJ ha ⁻¹	
	W _{zm} , ha h ⁻¹	W _{hr} , ha h ⁻¹	H _{hr} , per.-h ha ⁻¹					human work	operations
1tripr (Orthmen) 8 rows	42	6	0.17	67.45	8.7	691.65	0.17	7.23	766.33
Pluribus (DAWN) 6 rows	29.4	4.2	0.24	42.11	3.8	302.1	0.24	10.33	354.54
Stripcat (Slyfrance) 12 rows	70	10	0.10	41.72	4.8	381.6	0.10	4.34	427.66
Amazone xtill 8 rows	46.9	6.7	0.15	53.27	6.7	532.65	0.15	6.48	592.40
Kuhn (Striger) 8 rows	42	6	0.17	64.10	7.3	580.35	0.17	7.23	651.68
Kuhn–Krause (unit Gladiator) 12 rows	49	7	0.14	50.84	5.7	453.15	0.14	6.20	510.19
Gaspardo Zebra 8 rows	42	6	0.17	75.95	8.7	691.65	0.17	7.23	774.83
Kverneland Kultistrip 8 rows	63	9	0.11	42.89	5.4	429.3	0.11	4.82	477.01
Hiniker 6000 6 rows	50.4	7.2	0.14	52.61	6	477	0.14	6.03	535.64
Sunflower 7610 8 rows	63	9	0.11	40.88	4.8	381.6	0.11	4.82	427.30

Table 2

The initial set of alternatives cultivators for Strip-Till technology

№	Brand cultivator	Productivity	Tractor power	Mass m, kg	Energy intensity of work E, MJ ha ⁻¹	Cost U, \$
		H _{hr} , per.-h ha ⁻¹	P, kW			
		(K ₁)	(K ₂)	(K ₃)	(K ₄)	(K ₅)
1	Gaspardo Zebra (8)	0.17	22.2	274	774.83	4000
2	Stripcat Twin Diamond (8)	0.10	15	375	427.66	4160
3	Orthman 1tripr (8)	0.17	22.2	407	766.33	4750
4	Kverneland Kultistrip (8)	0.11	22.1	306	477.01	7250
5	Kuhn Gladiator (12)	0.14	20	425	510.19	4375
6	Kuhn Striger (8)	0.17	21	303	651.68	6000
7	Dawn Pluribus (6)	0.24	8	230	354.54	5000
8	Hiniker 6000 (6)	0.14	15	247	535.64	3650
9	Amazone xtill (8)	0.15	16	390	592.40	3441
10	Sunflower 7610 (8)	0.11	17	411	427.30	5000
	Idealized option (lowest)	0.10	8	230	354.54	3441

After determining the coefficients of importance criteria, calculate the distance to the target for a given set of alternatives:

$$\mu_i = \sum \left(\frac{U_{ij}}{U_{i0}} \lambda_i \right) - 1, \quad (10)$$

where U_{ij} – is the value of the i -th criterion of the j -th variant; U_{i0} – is the value of the i -th criterion of the idealized variant; λ_i – is the coefficient of significance of the i -th criterion.

Table 3

Matrix for determining priorities

Criteria numbers	Criteria numbers					$\sum K_i$	P_{ij}	λ_i
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5			
K_1	1.0	0.5	1.5	0.5	1.5	5	22	0.19
K_2	1.5	1.0	1.5	0.5	1.5	6	27.5	0.24
K_3	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	3.5	16	0.14
K_4	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5	7	33.75	0.29
K_5	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	3.5	16	0.14
\sum							115.25	

Outline of the main research material. The main task of mechanical tillage is to create favorable conditions for the growth and development of plants. To create such conditions, it is necessary to perform a mechanical effect on the soil by certain tillage tools.

To ensure such conditions, it is necessary to develop a classification of working tools, taking into account the severity of their work and the destruction of soil structure. Therefore, the working tools that are used in Strip-Till technology are classified according to the sequence of their work and the load on the soil [11, p. 39].

Equipment for the implementation of Strip-Till can be divided into three main categories: light, medium and heavy, depending on the weight of the sections and the depth of processing (or degree of tillage). Moreover, it is classified according to the degree of influence of the working tool on the soil.

Spring aggregates for Strip-Till are mainly intended for cleaning a number of plant residues and moderate surface loosening of the soil. It is possible at the same time to apply mineral fertilizers to the depth of surface loosening. For the autumn version of Strip-Till in the section for strip cultivation, the jay is mandatory for intensive loosening of the soil:

- a) medium – for a depth of 20–30 cm;
- b) heavy – for the depth of processing 30–50 cm.

To implement these technological operations, it is necessary to use certain working tools, which, with a minimum of energy costs, make it possible to implement the full range of planned activities

Cutters – designed to guide the strip, cutting stubble residues, furrow formation, which facilitates and improves the performance of the executive working tools.

The main working tool is a stand for loosening the soil. How rippers are used: chisels, chisel-like paws.

The executive working tool is designed for processing the created strip, cropping weeds, loosening, pre-sowing soil cultivation, creating conditions for efficient fertilization, growth and development of seeds.

Section for the introduction of mineral fertilizers is intended for the introduction of mineral fertilizers.

Section for leveling the soil – is intended for leveling the field, fixing fertilizers, creating conditions for the further development of plants by compacting or loosening.

The energy analysis of cultivators made it possible to evaluate their performance taking into account the productivity (and this is the number of sections and speed of movement), mass and fuel consumption of the units.

As calculations show, the energy intensity of aggregates (Table 2) varies from 354 MJ ha⁻¹ to 775 MJ ha⁻¹. The lowest energy intensity of the Stripcat (Slyfrance) units is 427.66 MJ ha⁻¹, Pluribus (DAWN) is 354.54 MJ ha⁻¹, Kverneland Kultistrip – 477.01 MJ ha⁻¹ and Sunflower 7610 – 427.3 MJ ha⁻¹.

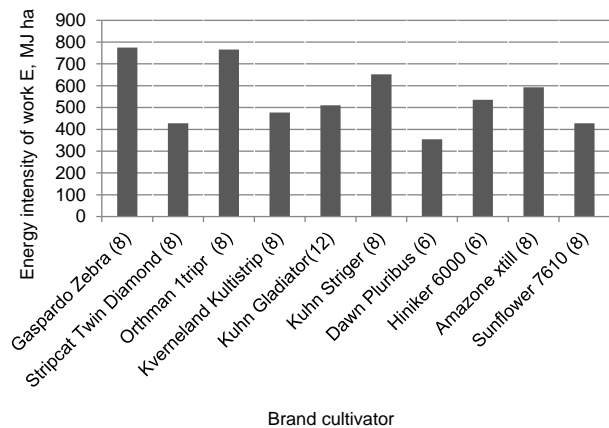


Figure 1. The graph of the energy intensity of aggregates

The largest increase of energy intensity (Fig. 1) in the Gaspardo Zebra units is 774.83 MJ ha⁻¹, 1tripr (Orthman) – 766.33 MJ ha⁻¹, Kuhn Striger – 651.68 MJ ha⁻¹, Amazone xtill – 592.4 MJ ha⁻¹, Hiniker 6 000 – 535.64 MJ ha⁻¹ and Kuhn Krause (aggregate Gladiator) – 510.19 MJ ha⁻¹. The high energy intensity is primarily due to the mass of aggregates. To cut plant residues, a large pressure of the knife (mainly discs) is needed on the soil. This pressure is created

with the help of hydraulic systems and the weight of the cultivator sections. In addition to the mass of the most cultivators, the energy intensity is also affected by the depth of processing and the performance of working tools. Cultivators Pluribus (DAWN) and Hiniker 6 000 are treated in six rows, but Pluribus (DAWN) works at a depth of 5-12 cm, and the Hiniker 6 000 can operate at a depth of 30 cm and the energy intensity of the Hiniker 6 000 is 43% more than the Pluribus (DAWN), because its aggregation requires a twice as powerful tractor.

All the cultivators considered are designed for the same purpose, so the layout of their working

tools is similar, but the energy capacity of Pluribus (DAWN) is also smaller because it does not have a chisel-like paw. In all other cultivators from the group, the layout of the working tools is as follows: a disk knife is installed in front of the section, followed by a row cleaner – two star-like discs, then a chisel, scoring discs and a roller. The working bodies of machines differ both in shape and in size. And this, accordingly, already affects the working conditions of the machine and the mass of working sections. So the cultivators Sunflower 7 610 and 1tripr (Orthman) are processed in 8 bands, they work almost at the same depth up to 25 cm, have almost the same weight

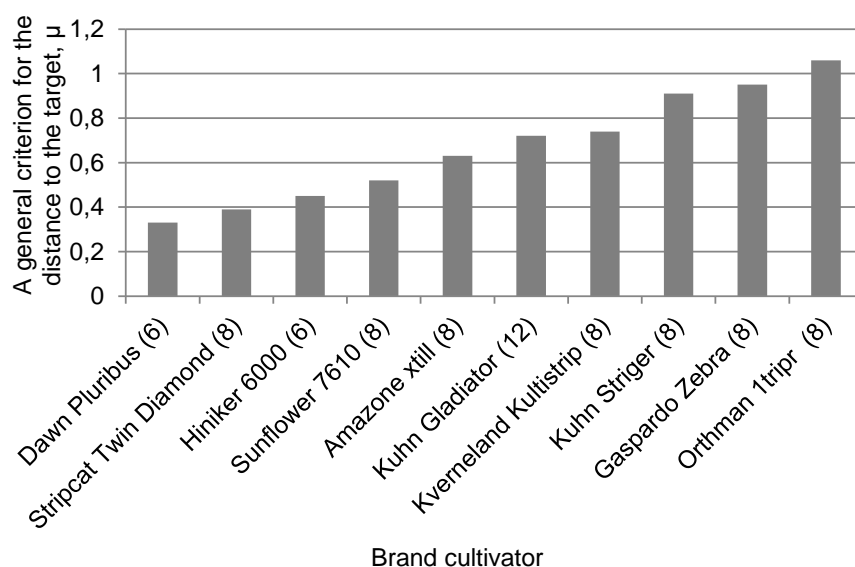


Figure 2. The graph of mechanized technology options behind the general criterion of distance to the target

Table 4

Evaluation of mechanized technology options

Brand cultivator	Criteria used for analysis					A general criterion for the distance to the target, μ	Grade of cultivators
	Productivity H_{hp} , per.-h ha ⁻¹	Tractor power P, kW	Mass m, kg	Energy intensity of work E, MJ ha ⁻¹	Cost U, \$		
	K1	K2	K3	K4	K5		
Gaspardo Zebra (8)	0.17	22.2	274	774.83	4,000	0.95	9
Stripcat Twin Diamond (8)	0.10	15	375	427.66	4,160	0.39	2
Orthman 1tripr (8)	0.17	22.2	407	766.33	4,750	1.06	10
Kverneland Kultistrip (8)	0.11	22.1	306	477.01	7,250	0.74	7
Kuhn Gladiator (12)	0.14	20	425	510.19	4,375	0.72	6
Kuhn Striger (8)	0.17	21	303	651.68	6,000	0.91	8
Dawn Pluribus (6)	0.24	8	230	354.54	5,000	0.33	1
Hiniker 6000 (6)	0.14	15	247	535.64	3,650	0.45	3
Amazone xtil (8)	0.15	16	390	592.40	3,441	0.63	5
Sunflower 7610 (8)	0.11	17	411	427.30	5,000	0.52	4
Idealized machine	0.10	8	230	354.54	3,441	0.00	

of the sections (411 and 407 kg respectively), but the aggregation of the cultivator 1tripr (Orthman) requires 30% capacity than the Sunflower 7 610 (22.5 kW and 17 kW, respectively). And the total energy intensity of these cultivators has the corresponding result: the energy intensity of the cultivator 1tripr (Orthman) is 79% higher than the energy intensity of the cultivator Sunflower. The number of sections of cultivators have their influence on the energy intensity of aggregates. It can be seen from the table that the eight-row Gaspardo Zebra has a 52% higher energy intensity than the twelve-row Kuhn Krause (the Gladiator unit). Gaspardo Zebra has a smaller mass of sections (274 kg against 425 in Gladiator), a smaller depth of treatment (10–25 cm vs. 15–30 cm in Gladiator), but more power per section (22.5 kW vs 20 kW in Gladiator). The high energy intensity of Zebra is explained by the increased capacity by 12% for its aggregation, but the main role is due to the performance, because in Gladiator the performance is more by 21% than in Zebra. The greatest impact on the energy intensity of the process is the fuel consumption per unit area. Having a big grip bus and working speed Gladiator wins on this parameter. Hence the conclusion, cultivators with a large number of sections and a high working speed have an advantage over energy costs. In the future, it is necessary to investigate the operation of machines at speeds of 15 km h⁻¹ and more as the resistance of the soil begins to increase sharply, which in turn should negatively affect the energy intensity of the process.

The multicriterion analysis which was carried out, allowed from the initial set of alternatives to choose a variant that is closer to the idealized version, for which $\mu = 0$. The distance to the target determined in this way for a given set of alternative options gives a comparative evaluation of technology options (Table 4).

Thus, from Table 4 and Fig. 2 it can be seen that of the considered mechanized variants of the Strip-till technology, the closest to the idealized version

is the cultivator Dawn Pluribus (6), in which the general criterion of the distance to the target is 0.33. The cultivators Stripcat Twin Diamond (8) ($\mu = 0.39$) and Hiniker 6 000 (6) ($\mu = 0.45$) also approached the idealized variant. As we have already discussed, Dawn Pluribus treats the soil to a depth of up to 12 cm, so it has the best result for three parameters: the capacity for aggregating one section, the mass of the section and the energy intensity of the work. Indicators of these criteria and determined the best result in relation to the idealized version. But if you look at the productivity of this machine, then it is the smallest of the group. Stripcat Twin Diamond has the best result in terms of productivity while not having the greatest energy and price. The Hiniker 6 000 also has good productivity with low mass sections and price. The cultivators Orthman 1tripr (8) ($\mu = 1.06$), Gaspardo Zebra (8) ($\mu = 0.95$) and Kuhn Striger (8) ($\mu = 0.91$) were far from the idealized version. These cultivators are the most energy intensive in operation with relatively low productivity.

Conclusions. Thus, the conducted multicriteria analysis allowed to estimate cultivators for work on Strip-Till taking into account different criteria: technological, technical and economic. The depth of processing, working elements, the width of the grip, the number of sections have their influence on the efficiency of the machines. The obtained results make it possible to compare machines among themselves, but it is necessary to take into account the working conditions for which these cultivators are designed.

For example, you need to consider the depth of processing. The disks do not allow working at great depths, while the paws can process the soil and apply fertilizers to a depth of 30–35 cm. The combination of one paw for deep processing and two or three discs is best suited for all tasks with the least energy costs. Also, the failure, if possible, of the purifiers of the rows and rollers has a positive effect on the productivity and energy intensity of the unit.

References:

1. Kalenska, S.M. et al. Systems of modern intensive technologies in plant growing. Vinnitsa : FOP Rogalskaya I.O., 2015. 458 p.
2. Bilinska, V. Modern innovative technologies in agriculture: the main characteristics and prospects of implementation. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Serie "Economics"*. 2015. № 7 (172). P. 81–85.
3. Moebius-Clune B.N. et.al. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework. Edition 3.2. Geneva, NY : Cornell University, 2016. 123 p.
4. McGuire A.M.. High Residue Farming Under Irrigation : Strip-till. Washington State University Extension Publication, EM036E, 2014. 8 pp.
5. Borisenko, P.I. et al. Technological optimization of basic tillage. *Newsletter RUDN*. 2018. № 13 (1). P. 35–44.
6. Grechkosii V.D. et al. Design of technological processes in crop production. Nigyn : PE Lysenko M.M., 2014. 392 p.

7. Meznikova M.V. Improvement of Strip-till tillage technology with the development of a resource-saving working organ for deep striptelle. *Scientific and methodical electronic magazine "Concept"*. 2016. № 11. P. 876–880.

8. Patent №14/463,761. Tillage implement with scraper deflector. Michael G. Kovach, Morton, IL (US); Rick L. Gerber, Roanoke, IL (US); Eric J. Anderson, Metamora, IL (US). No.: US 2015/0053441 A1 ; filed Aug. 20, 2014 ; pub. date Feb. 26, 2015.

9. Nahirnyy, J.P. et al. Analysis of technological systems and substantiation of decisions. Kamyanets-Podilsky : FOP Sysyn, 2013. 264 p.

10. Luna J., Staben M. 2003. Using Strip Tillage in Vegetable Production Systems in Western Oregon. Oregon State University Extension Service. 12 pp.

11. Belyaev V.I. et al. Technology Strip-Till: features of design of machines of leading world manufacturers and their applications. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2013. Issue 11. P. 86–91.

Войтук А.В., Кравченко В.В., Кутковецька Т.О., Пушка О.С. АНАЛІЗ СТРИЧКОВИХ КУЛЬТИВАТОРІВ ДЛЯ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ ЗА ТЕХНОЛОГІЇ STRIP-TILL

У статті наведено проблему вибору агрегату для смугової обробки ґрунту з умовою мінімізації витрат енергії. Сучасні культиватори для нарізування смуг вимагають великої потужності тракторів на один метр ширини захвату. Це насамперед пов'язано з великою глибиною обробки ґрунту, але також позначається і велика вага машин. Щоб забезпечити можливість перерізання рослинних залишків, вага культиватора повинна забезпечувати необхідний тиск дискових ножів на ґрунт. Як правило, половина цього тиску досягається шляхом гідравлічного притискання рами культиватора чи його секцій, а інша половина – це безпосередньо вага культиватора. Виробники на тепер пропонують велику кількість різних культиваторів для смугової обробки. Всі вони загалом мають той самий принцип роботи, але комбінації робочих органів відрізняються. Це, своєю чергою, позначається на вазі, продуктивності й споживчій потужності. Додатково різні робочі органи забезпечують виконання різних задач, або однієї задачі з різними результатами, що впливає на кінцеву мету оброблення та якість його виконання. У статті розглянуто використання різних видів смугових культиваторів з урахуванням їхньої продуктивності, споживаної потужності трактора, ваги й вартості. Подальших досліджень вимагають питання якості виконання операції нарізання стрічок різними секціями стрічкових культиваторів. Визначено методику дослідження з вибору оптимального культиватора за допомогою методу відстані до цілі й енергетичної оцінки механізованих технологій в рослинництві. Вибір найменш витратних із боку енергії схем культиваторів дозволив зробити висновки про раціональне компонування робочих органів на секції. Якщо основне завдання стоїть у зменшенні споживання енергії, краще віддати переваги культиваторів із дисковими робочими органами. Це можуть бути плоскі або хвилясті диски, їх вибір насамперед буде залежати від вологості ґрунту. Такі машини можуть працювати на підвищених швидкостях, понад 12–15 км/год, що забезпечує їхню високу продуктивність. Результати теоретичних досліджень по вибору смугових культиваторів наведені на основі моделей провідних світових виробників.

Ключові слова: культиватор, стрічка, дисковий ніж, робочий інструмент, енергооцінка, механізовані технології.

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/05>**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Панасюк І.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Малишев В.В.

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТА ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ РЕЧОВИН У РУХОМИХ РОБОЧИХ МІСТКОСТЯХ (ЧАСТИНА 1: СПОСОБИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ)

У різних галузях промисловості широко застосовуються дрібні полімерні й металеві деталі. Зазвичай їхнє формоутворення відбувається шляхом лиття або механічної обробки. Після формоутворення вони потребують проведення подальших трудомістких галтувальних технологічних операцій. Найбільш ефективний шлях механізації галтувальних технологічних операцій – це використання обробки деталей технологічним середовищем. З урахуванням властивостей деталей і вимог до їхньої обробки проведено аналіз галтувальних технологічних процесів обробки деталей, а також змішування дрібнодисперсних сипких речовин, рекомендовано раціональні типи технологічного процесу із застосуванням відповідного устаткування. Розглянуто основні способи й технології обробки дрібних полімерних і металевих деталей, а також змішування сипких дрібнодисперсних речовин у рухомих робочих місткостях із різним характером їхнього руху. Використання холодоагентів зменшує еластичність полімерних деталей, значно підвищує їхню крихкість, дає можливість при величині відносної деформації <math><10\%</math> реалізувати відділення полімерних деталей від ливників. Використання обладнання зі складним просторовим рухом робочих місткостей для технологічних операцій покращення якості поверхні виробів дає змогу в 1,5–2 рази збільшити інтенсивність виконання такої технологічної операції. Характер переміщення сипкого технологічного середовища в змішувальних і галтувальних робочих місткостях незалежно від характеру їхнього руху може реалізовуватися шляхом виникнення каскадного, змішаного або водоспадного режимів руху. Встановлено відповідність між режимами руху технологічного середовища в середині рухомих робочих місткостей і відповідними типами галтувальних технологічних операцій й інтенсивністю змішування сипких речовин.

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

Постановка проблеми. Підвищення продуктивності виготовлення полімерних та металевих деталей значною мірою залежить від скорочення часу, який витрачається на підготовчі та фінішні галтувальні операції. Як відомо [1, с. 7], на ці операції витрачається до 80% технологічного часу. Галтувальні технологічні операції, а також технологічні операції змішування сипких дрібнодисперсних речовин реалізуються із застосуванням різних типів обладнання з рухомими робочими ємкостями.

У різних галузях промисловості невеликі типові деталі та вироби виготовляються механічною обробкою або литтям. Як правило, ці деталі потребують проведення дуже трудоміст-

кої подальшої галтувальної обробки, яка часто виконується ручним способом або засобами малої механізації. Наприклад, галтувальні машини з обертальним рухом робочої ємкості [2, с. 3], які застосовуються для всіх вищезгаданих операцій здебільшого мають низьку продуктивність та є застарілим типом обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення продуктивності виконання галтувальних технологічних операцій та технологічних операцій змішування сипких дрібнодисперсних речовин можна досягнути за рахунок інтенсифікації руху технологічного середовища (деталі та наповнювач, сипкі речовини) у робочих ємкостях за рахунок забезпечення їх складного

просторового переміщення. Перспективним є використання обладнання зі складним тривимірним рухом ємкостей. Дослідженням такого обладнання та руху робочого середовища в ємкостях зі складним просторовим переміщенням займаються, як вітчизняні, так й іноземні науковці.

Незважаючи на проведені дослідження, до теперішнього часу відсутні загальні підходи та рекомендації щодо впливу конструктивних та технологічних параметрів на продуктивність та якість обробки та змішування сипких дрібнодисперсних речовин, відсутня можливість прогнозувати технологічний результат на стадії проектування. В літературі достатньо обмежена кількість оглядів по цій тематиці. Таким чином, тематика потребує подальшого узагальнення та систематизації літературних даних.

Постановка завдання. Мета роботи – систематизація літературних даних щодо способів перспективних технологій обробки металевих та полімерних деталей, а також змішування сипких дрібнодисперсних речовин у рухомих робочих ємкостях.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Способи обробки деталей технологічним середовищем у рухомих робочих ємкостях. Обробка деталей у рухомих ємкостях технологічним середовищем має загальну назву – галтування. Відомо [3, с. 5], що галтування включає в себе наступні технологічні процеси: очищення поверхонь металевих деталей від заусенцій, задирок, облою та окалин, продуктів корозії, заокруглення гострих країв, відділення полімерних та металевих деталей від ливників, а також, процеси покращення якості поверхонь виробів: шліфування та полірування.

Відомі [4, с. 118–119] три методи очищення поверхонь деталей та покращення їх якості: з використанням ручної праці або засобів малої механізації, однак такий спосіб є малоефективним, потребує значного часу та робочого потенціалу; із застосуванням універсальних пристроїв (токарні, фрезерувальні, свердлильні та шліфувальні верстати), такий спосіб застосовують при виготовленні деталей, де необхідне зняття точно визначеної величини припуску; при обробці деталей технологічним середовищем в рухомих робочих ємкостях.

За допомогою останнього методу обробляють деталі, для яких відсутні вимоги щодо зняття точно визначеної величини припуску з їх оброблюваної поверхні. При такому способі застосовують галтувальні барабани різної конструкції,

дробометні установки, вібраційні, інерційні та інші машини. Таким способом обробляють деталі, використання яких не потребує дотримання їх розмірів за квалітетами високої точності, а якість їх обробки можна визначити на основі органолептичного методу. Галтування розділяється на сухе та вологе. При першому способі використовується сухе технологічне середовище, при другому способі в робочу ємкість додається буферний рідинний розчин (зазвичай вода).

Спосіб відділення деталей від ливників [5, с. 3] застосовують для металевих та полімерних деталей, формоутворення яких відбувається шляхом лиття. Відоме [6, с. 2] успішне застосування цього способу в промисловості, зокрема, при відділенні від ливників деталей замка «блискавок» на основі цинкових сплавів. Відділення деталей від ливників реалізується на основі ударної взаємодії відливки з внутрішніми стінками рухомих ємкостей. Збільшення кінетичної енергії руху технологічного середовища зумовлює підвищення продуктивності виконання такої технологічної операції.

Значна частина формованих деталей виробляється з еластичних полімерів. Обробка їх за допомогою ударної взаємодії при кімнатній температурі неможлива через високу еластичність матеріалів. Встановлено [7, с. 21], що при зниженні температури еластичність полімерів зменшується, а при досягненні температури крихкості вони поведуться, як крихкі матеріали і руйнуються при величині відносної деформації <10% [8, с. 80–87]. Охолодження деталей здійснюється різними способами: введенням в зону обробки холодоагенту у виді двоокису вуглецю (рідкого або твердого), рідкого азоту або шляхом охолодження камери з робочим середовищем за допомогою холодильної установки. Значні переваги має рідкий азот. Він забезпечує охолодження до температури $-195,8^{\circ}\text{C}$, подача його в зону обробки не представляє складностей, він нешкідливий для навколишнього середовища. Таким чином, запропонований спосіб дозволяє обробляти навіть еластичні матеріали.

Широко використовуються методи покращення якості поверхні полімерних та металевих деталей. Зокрема виконуються, заявлені у патентах [9, с. 3; 10, с. 10], технологічні операції шліфування та полірування дрібних деталей абразивом у вигляді вільних гранул. Відоме використання такого методу обробки при виготовленні гудзиків [11, с. 27–31] та інших дрібних фурнітурних деталей легкої промисловості.

Для раціонального вибору технологічного середовища (абразивного матеріалу) необ-

хідно враховувати усі фактори його впливу на виріб та специфіку самого процесу обробки [12, с. 114–127]. Наприклад, відомо [13, с. 125], що при очищенні поверхонь металевих деталей від продуктів корозії використовують бій абразивних кіл, для процесів шліфування та полірування застосовують подрібнені полірувальні пасти, при цьому, внутрішню поверхню робочої ємкості додатково оббивають повстю або шкірою, для очищення виробів від облою у робочу ємкість завантажуються необроблені деталі та різноманітний наповнювач, який може бути у вигляді керамічних, сталевих кульок, голковий наповнювач або наповнювач у вигляді сталевих циліндрів, в якості абразивного матеріалу також застосовують скляні кульки діаметром 3–6 мм.–

У роботі [1, с. 152–161], встановлено, що при виконанні технологічних операцій полірування дрібних полімерних деталей у рухомих робочих ємкостях, раціонально виконувати вологе галтування. У роботі [11, с. 27] доведено, що при вологому галтуванні полімерних деталей з поліефірної смоли, у якості абразивного матеріалу, раціонально використовувати дрібні керамічні тіла з різною геометричною формою, зокрема, трьохгранні призми з довжиною усіх граней 5 мм, а також дрібнодисперсну пемзу. Об'ємне співвідношення між абразивним матеріалом та полімерними деталями повинно становити 2,5:1, рівень заповнення водою технологічного середовища не повинен перевищувати рівня насипного масиву. Окрім цього, робочу ємкість необхідно заповнювати не більш ніж на 40% від її загального об'єму. Використання обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей для таких технологічних операцій дає змогу в 1,5–2 рази збільшити інтенсивність виконання цієї технологічної операції.

Відомо [14, с. 59], що суть усіх методів обробки деталей при їх русі в технологічному середовищі полягає в механічних контактах, які виникають при зіткненні оброблюваних деталей між собою, з абразивними частинками технологічного середовища, а також, при зіткненні з внутрішніми стінками робочої ємкості. В результаті таких зіткнень завжди відбувається ефект пластичної деформації та мікрорізання, зрізання дефектів, згладжування нерівностей, відділення ливників, очищення поверхні деталі, заокруглення гострих країв.

Було встановлено [1, с. 10], що абсолютно або практично не піддаються абразивній обробці поверхні в отворах, мінімальна кількість співударів виникає у заглибленнях, проточках, значно

більша – на плоских поверхнях та максимальна – по виступам, кромках, кутах, гострих краях. Саме тому гранулометричний склад абразивного матеріалу, зернистість та його форму обирають, виходячи з необхідної точності розмірів виробів, шорсткості їх поверхні, а також продуктивності обробки. Таким чином, розмір гранули абразивного наповнювача повинен бути в 2 рази меншим від розміру мінімального оброблюваного отвору виробу. Якщо отвори у виробі не підлягають обробці, то розмір гранул повинен, по крайній мірі, в 3 рази перевищувати розмір найбільшого отвору у виробі.

Способи змішування сипких дрібнодисперсних речовин у рухомих робочих ємкостях. Також відомі роботи [15, с. 150–244; 16, с. 218–224] щодо специфіки дослідження процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин в рухомих робочих ємкостях. Так у роботі [17, с. 20–66] використовується «одночастковий» підхід, при якому розглядається рівновага та динаміка лише окремої частинки. Закони, які описують рух технологічного середовища та зміну режимів руху сипкого робочого середовища є аналогічними до виразів, які описують переміщення окремої однієї частинки. Однак, такий підхід є досить наближеним та не може надати дійсних уявлень про переміщення усього технологічного середовища. Такий підхід успішно застосовується лише для опису простого вільного руху, наприклад, при падінні сипкого матеріалу з лопатей.

У [18, с. 20–31] застосовується метод «в'язкого плину», згідно якого рух сипкого матеріалу розглядається як плин в'язкопластичного середовища. Недолік такого методу полягає в тому, що залежності, котрі використовуються в ньому, містять емпіричні коефіцієнти, які потребують їх встановлення на спеціальних лабораторних установках. Крім цього, метод описує симетричну, відносно центру циркуляції, границю розподілу шарів, що не відповідає реальній картині, особливо при швидкостях обертання циліндричних робочих ємкостей, які є більшими за 0,2 від критичної кутової швидкості.

Розроблений енергетичний метод [19, с. 660] опису руху сипкого матеріалу в поперечному перерізі гладкої обертової циліндричної робочої ємкості, в основі якого полягає гіпотеза про те, що потенціальна енергія сипкого матеріалу, котрий знаходиться в шарі, який підіймається, при встановленому режимі руху є постійною величиною, рівною потенціальній енергії усього технологічного середовища в знерухомленій ємкості.

Авторами робіт [20, с. 18; 21, с. 542–545] було розглянуто вплив способів завантаження до робочої ємкості суміші двох сипких дрібнодисперсних речовин на інтенсивність змішування. При завантаженні сипкої суміші з двох фракцій в робочу ємкість, яка виконує складний просторовий рух, виділяються дві моделі завантаження: поперечна та осьова. Було встановлено [15, с. 186–188], що значно кращих результатів змішування сипких речовин можна досягнути саме при поперечному завантаженні. При осьовій моделі завантаження дві фракції сипких речовин значно гірше піддаються процесу змішування за рахунок того, що основне переміщення сипкого масиву відбувається вздовж осі ємкості. Однак, для циліндричної робочої ємкості, вісь обертання якої знаходиться під кутом $\alpha < 30^\circ$, кращою моделлю завантаження буде осьова.

Характер руху технологічного середовища в рухомих робочих ємкостях. Переміщення сипкого технологічного середовища в змішувальних та галтувальних робочих ємкостях, в незалежності від характеру їх руху, може реалізовуватися за рахунок виникнення каскадного, змішаного або водоспадного режимів руху. Кожен режим руху відповідає певному типу обробки деталей різних галузей промисловості або змішування сипких речовин.

Каскадний режим руху [22, с. 261] спостерігається при невеликій частоті обертання робочої ємкості або при низькій кутовій швидкості ведучого валу машини зі складним рухом робочої ємкості. Основний масив частинок рухається по круговим траєкторіям зі швидкістю обертання циліндричної ємкості. В машинах зі складним рухом робочої ємкості вони можуть рухатися і по інших, відмінних від кругових траєкторій, однак верхній шар сипкого матеріалу фактично не відривається від загального масиву і, тим паче, від стінок робочої ємкості. Частинок, досягнувши верхнього положення, зсипаються вниз по похилій площині. При каскадному режимі руху відсутній вільний політ частинок. Об'єм сипкого матеріалу, що рухається на приблизно 10% більше від статичного об'єму. Доведено [23, с. 258], що, для змішування сипких речовин, а також переважної більшості галтувальних технологічних операцій, не рекомендовано використовувати каскадний режим руху. Це пов'язано з тим, що при каскадному режимі руху неможливо забезпечити достатню інтенсивність переміщення технологічного середовища, виникатиме низька продуктивність виконання відповідних технологічних операцій.

Зі збільшенням частоти обертання барабану чи кутової швидкості ведучого валу машини зі склад-

ним рухом робочої ємкості утворюється змішаний режим руху [24, с. 48], який характеризується поєднанням у собі каскадного та водоспадного режимів. Спостерігається відрив верхнього шару сипкого матеріалу від загального масиву. Перехід від каскадного до змішаного режиму руху відбуватиметься в тому випадку, якщо від загальної маси сипкого середовища відділиться такий об'єм частинок, що відповідатиме приблизно 50% від загального масиву. Частинок з кругових траєкторій переходять на параболічні, а потім, падаючи на масив матеріалу, скочуються або проковзують по ньому і знову повертаються на кругові траєкторії. Об'єм, зайнятий рухомим матеріалом, значно перевищує статичний об'єм. Такий режим руху рекомендовано використовувати для технологічних процесів покращення якості поверхонь виробів, а також для змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

При ще більш високій частоті обертання барабану чи кутовій швидкості ведучого валу машини зі складним рухом робочої ємкості змішаний режим руху переходить у водоспадний, який характеризується замкненими траєкторіями, що не перетинаються. При водоспадному режимі відсутня ділянка пересипання частинок, а практично увесь об'єм сипкого матеріалу відриватиметься від поверхні стінок робочої ємкості. Водоспадний режим руху слід використовувати у випадках, коли необхідно забезпечити виникнення ударної взаємодії між оброблюваними деталями та стінками робочої ємкості, наприклад, при реалізації відділення деталей від ливників. Також можливе використання водоспадного режиму руху при реалізації змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

Відомий також закритичний режим руху [17, с. 156], при якому усе сипке технологічне середовище обертається разом з барабаном. Він характерний виключно для обертаних робочих ємкостей, виникає за рахунок того, що значення нормальних (відцентрових) сил інерції перевищує значення сил тяжіння. Виникає при значній частоті обертання циліндричної робочої ємкості. Таким режим руху не придатний для виконання жодної технологічної операції. Саме тому у монографії [17, с. 231] отримані вирази для визначення критичної кутової швидкості обертання робочої ємкості, при якій технологічне середовище почне обертатися разом зі стінками ємкості.

Висновки.

1. Систематизовано літературні дані щодо способів обробки металевих та полімерних деталей, а також змішування сипких дрібнодисперсних речовин у рухомих робочих ємкостях.

2. Представлено особливості виконання найбільш поширених галтувальних технологічних операцій обробки деталей, та змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

3. Встановлено, що інтенсивність виконання розглянутих технологічних операцій обробки деталей залежить від ряду факторів, найголовнішими з яких є: режим руху технологічного середовища,

рівень заповнення ємкості, об'ємне співвідношення абразивних компонентів та оброблюваних деталей, гранулометричний склад технологічного середовища, геометричні параметри робочої ємкості, силовий вплив абразивних компонентів на оброблювані деталі, фізико-механічні властивості, як оброблюваних виробів, так і абразивних компонентів.

Список літератури:

1. Залюбовський М.Г. Машины зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев. Київ : Університет «Україна», 2018. 228 с.
2. Устрій для галтовки виробів : пат. 6219 Україна : МПК В 24 В 31/02. № 2950551/25-08 ; заяв. 02.07.1980 ; опубл. 29.12.1994, Бюл. № 8-І/1994.
3. Бурмістенков, О.П., Панасюк І.В. Основи теорії та практична реалізація пристроїв для зачищувальної обробки формових деталей із полімерних матеріалів. Київ : НМК ВО, 1993. 64 с.
4. Шварц А.И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ : учебное пособие для рабочего образования. Москва : Химия, 1987. 176 с.
5. Спосіб об'ємної обробки металевих деталей : пат. 137568 Україна : МПК В24В 31/10. № u201904193 ; заяв. 19.04.2019 ; опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.
6. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Визначення кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей: енергетичний підхід. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 4 (136). С. 57–66.
7. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / під заг. ред. В.П. Коновала. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.
8. Фетисов М.А. Влияние низкой температуры на физико-механические свойства резины и пластмасс. *О научно-исследовательских работах в вузах УССР* / М.А. Фетисов, А.С. Тельнов, В.Н. Митрашко. Вып. 21. Машиностроение и металлообработка. Київ : Вища школа, 1978. С. 87.
9. Спосіб вологого шліфування полімерних деталей : пат. 113267 Україна : МПК В24В 31/10 (2006.01). № u201606526 ; заяв. 15.06.2016 ; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2
10. Спосіб вологого полірування полімерних деталей : пат. 113266 Україна : МПК В24В 31/10 (2006.01). № u201606525 ; заяв. 15.06.2016 ; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.
11. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 2. P. 24–32.
12. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. Москва : Химия, 1988. 176 с.
13. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. Санкт-Петербург : Политехника, 2007. 425 с.
14. Шумакова Т.А., Шаповалов В.И., Гутько Ю.И. Инструмент для виброабразивной обработки деталей : монографія. Луганск : Ноулидж, 2011. 59 с.
15. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation : dissertation EngD ; The University of Birmingham. UK, 2012. 311 p.
16. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behavior in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A : Measurement and Reconstruction of Turbulent Mixer Motion using Positron Emission Particle Tracking. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010. Vol. 59, No. 3. P. 217–238.
17. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа : монографія. Москва : Машиностроение, 2009. 220 с.
18. Трофимов А.В. Исследование движения сыпучих материалов во вращающихся барабанах без внутренних устройств : дисс. ... канд. техн. наук : 05.17.08. Москва, 1973. 224 с.
19. Першин В.Ф., Минаев Г.А. Использование энергетического подхода при определении режимов движения сыпучего материала во вращающемся барабане. *Теоретические основы химической технологии*. 1989. Т. 23. № 5. С. 659–662.
20. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behavior in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B : Investigation of Flow and Mixing in the Turbula® mixer. *Powder Technology*. 2011. No. 212. P. 17–24.

21. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder Technology*. 2012. No. 217. P. 540–547.
22. I. Panasyuk I.V., Zalyubovskiy M.G. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 3. P. 260–264.
23. Mayer-Laigle C., Gatumel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. March 2015. Volume 95. P. 248–261.
24. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Визначення залежності режиму руху робочого середовища у ємкості зі складним рухом від кутової швидкості ведучого валу. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2015. № 1. С. 43–52.

Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. PERSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR PART PROCESSING AND MIXING OF BULK MATTERS INTO MOBILE WORKING CAPACITIES (PART 1: METHODS OF TECHNICAL OPERATIONS)

In various industries, small polymer and metal parts are widely used. Usually their shaping occurs by casting or machining. After shaping, they require further labor-intensive tumbling technological operations. The most effective way to mechanize tumbling technological operations is to use the processing of parts by the technological environment. Taking into account the properties of the parts and the requirements for their processing, an analysis of tumbling technological processes for processing parts, as well as mixing of finely divided bulk solids, is recommended that rational types of technological process using appropriate equipment are recommended. The main methods and technologies for processing small polymer and metal parts, as well as mixing bulk solids in moving working capacities with different nature of their movement. The data on the specifics of the implementation of technological processes to improve the quality of product surfaces, as well as the separation of parts from gates. The use of refrigerants reduces the elasticity of polymer parts, significantly increases their fragility, and makes it possible, with a relative strain of <10%, to separate polymer parts from gates. The use of equipment with complex spatial movement of working capacities for technological operations to improve the quality of the surface of products allows 1.5–2 times to increase the intensity of this technological operation. The nature of the movement of bulk technological medium in mixing and tumbling working capacities, regardless of the nature of their movement, can be realized due to the emergence of cascade, mixed or waterfall modes of movement. Each mode of movement corresponds to a certain type of processing parts of various industries or mixing bulk solids. A correspondence was established between the modes of movement of the technological medium in the middle of mobile working tanks and the corresponding types of tumbling technological operations and the intensity of mixing of bulk solids.

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

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.735

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/06>

Владов С.І.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Шмельов Ю.М.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Пилипенко Л.М.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Назаренко Н.П.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Тугова Н.В.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Дерев'янка І.Г.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Пономаренко А.В.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117 НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Предметом дослідження в статті є авіаційний двигун ТВ3-117 і методи контролю та діагностики його технічного стану. Мета роботи – реалізація компонентних математичних моделей авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі для контролю та діагностики його технічного стану. У статті вирішуються наступні завдання: обґрунтування передумов розробки математичних моделей авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі, розроблення обчислювальної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі. Використовуються такі методи: методи математичного моделювання, методи побудови багаторівневої обчислювальної моделі на основі семантичної мережі. Отримано наступні результати: визначено, що контроль і діагностика технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 може бути реалізована на основі FDI-методу на базі моделей двигуна, що є мережею з елементарних (тришарових) блоків або незамкнених графів з однією вершиною-параметром і трьома ребрами. Ці елементарні об'єкти містять параметри, посилання на трьох «сусідів» і потрібні алгоритми зв'язку – попарно з двома з трьох «сусідів». Активізує об'єкти в мережі програма-вирішувач відповідно до «прапорів», які виставляють об'єкти. Алгоритми елементарних об'єктів аналізують, які параметри, що приходять від «сусідів», вибирають з урахуванням цього один із трьох власних алгоритмів для виконання, виставляють для зовнішнього вирішувача

значення «прапора». Водночас задачі контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 розв'язуються без ітерацій. Висновки: запропоновано метод побудови математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі розширеної семантичної мережі, що дозволяє шляхом реконфігурації математичної моделі й адаптації її характеристик до індивідуального двигуна, розв'язувати широкий набір задач контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у польотних режимах. Отримана мережа може розширюватися шляхом залучення нових параметрів у складі додаткових елементарних блоків відповідно до закономірностей, що описують закономірності робочих процесів і взаємозв'язок у вузлах двигуна.

Ключові слова: авіаційний двигун, математична модель, семантична мережа, граф.

Постановка проблеми. Безпека функціонування авіаційного двигуна ТВ3-117 вимагає безперервного контролю та діагностики його технічного стану в режимі реального часу. В цих умовах найбільш актуальною проблемою є розробка й впровадження інтелектуальних технологій – активних експертних систем (далі – ЕС) [1–3], здатних якісно й ефективно розв'язувати поставлені задачі. Це особливо важливо зараз, оскільки своєчасне виявлення та локалізація відмов дозволить виключити численні аварійні й катастрофічні ситуації, тому що це пов'язано із численними похибками контролю та прийняття рішень. Рівень впливу людського чинника зі зростанням числа контрольованих і діагностованих параметрів знижується [4], а спектр задач контролю та діагностики параметрів авіаційних двигунів істотно розширився з впровадженням активних ЕС на борт повітряного судна (далі – ПС). Зокрема, можливе проведення на борту ПС не тільки реєстрації та запобігання аварійних ситуацій, а й налаштування, налагодження, поглиблений діагноз стану рухових установок. Зазначене вище потребує розробки й адаптації в середовищі баз знань (далі – БЗ) активних ЕС, незважаючи на відомі методи, методики й алгоритми нових методологій і принципи побудови ЕС контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. Усе це повинно стати складовою частиною загальної інформаційно-керувальної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [5], діагностику авіаційних двигунів можна здійснювати з різним ступенем деталізації. В активній ЕС може бути організований трирівневий діагноз стану й несправностей двигуна [5]: аварійний діагноз, або діагноз малої глибини; діагноз середньої глибини; діагноз значної глибини. Аварійний діагноз здійснюється за таблицями несправностей (граф причинно-наслідкових зв'язків, допусковий контроль) [6–8]. Якщо ж аварійний діагноз не дає переконливої відповіді, то прийняття рішення щодо активної ЕС здійснюється на основі гетерогенної БЗ (далі – ГБЗ), у складі якої застосовуються семантичні мережі, фрейми, продукції, логічні моделі.

Основною вимогою, що висувається до таких ЕС, є робота в реальному масштабі часу й гетерогенні (різномірні) БЗ. Забезпечення режиму реального часу здійснюється активною ЕС за допомогою інтерфейсу із зовнішнім світлом (датчики – контролери – виконавчі механізми). ГБЗ включає: бази концептуальних знань (далі – БКЗ) (поняття з конкретної предметної області, факти, математичні залежності, закономірності, таблиці тощо); бази експертних знань (далі – БЕЗ) (евристика; апріорна, апостеріорна, експертна інформація тощо); бази знань прецедентів (далі – БЗП).

Збережені знання в ГБЗ можуть бути статичними й динамічними. Статичні ГБЗ накопичують досвід експлуатації двигуна незалежно від часу. Динамічні ГБЗ накопичують досвід у режимі реального часу: запам'ятовується характеристика перехідного процесу (перехідні й несталі режими роботи); частотні характеристики тощо. БЗП у середовищі активної ЕС є новою парадигмою [9–10] в процесі прийняття рішень під час виникнення проблемних ситуацій у реальному масштабі часу.

Постановка завдання. В основу ідеології розроблених експертних систем контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 покладено використання методу FDI (Fault Detection and Identification), який базується на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних показників у режимі реального часу з формулярними [7; 8].

Для організації контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 із застосуванням FDI-методу важливо уявляти й знати, яким чином «обробляються» його моделі універсальною програмою-вирішувачем під час постійного контролю та діагностики параметрів авіаційного двигуна. Натепер моделі авіаційних двигунів формуються на основі об'єктноорієнтованого підходу. Обчислення за такої умови зводяться до «обробки» динамічно сформованих моделей вирішувачів.

Найчастіше розв'язок задач контролю та діагностики проводиться з використанням компонентної математичної моделі, складеної з об'єктів, що утворюють багаторівневу структуру

з односпрямованою асоціативністю в самій моделі [11; 12], коли внутрішні рівневі зв'язки між об'єктами реалізуються як односпрямовані «потокки», а вертикальні зв'язки – як спрямовані знизу вгору «адитивні» зв'язки. Двосторонню асоціативність забезпечує зовнішній (відносно моделі) вирішувач. Моделювання різних експлуатаційних ситуацій за допомогою таких моделей здійснюється варіаційними методами, коли користувач указує вирішувачу, які параметри варіювати, які підтримувати, а які «табулювати» – змінювати за певним законом.

Іноді формування такого закону розрахунку проводиться автоматично – шляхом аналізу параметрів «вільних» об'єктів й оцінки їхньої ролі в моделях. Варіації зазвичай створює вирішувач із використанням одного з оптимізаційних алгоритмів, що забезпечує мінімізацію функції «нев'язок» і функції мети, яка динамічно формується (для оптимізації групи параметрів з урахуванням заданих вагових коефіцієнтів). Функція «нев'язок» і функція мети штрафуються за вихід параметрів із зазначених користувачем меж. Такий підхід дозволяє уніфікувати процедури контролю та діагностики. Однак він вимагає застосування варіаційного методу, що свідомо знижує точність, надійність отримання результату й збільшує витрати машинних ресурсів. Тому провадяться кроки для пошуку й реалізації альтернативних методів, описаних у статті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Задля поставленої в роботі мети розглянемо математичну модель авіаційного двигуна ТВ3-117 у вигляді компонентної обчислювальної моделі, яка характеризується набором зовнішніх параметрів – вектором U й алгоритмом M , що моделює зв'язки компонент вектору U (зовнішніх параметрів) між собою. Якщо це алгоритм звичайного вигляду, то він спрямований і вимагає надати з вектора U вектор вхідних даних X і вектор вихідних даних Y : $U = X \cap Y$. Водночас кожній проектно-доводчій ситуації відповідає свій склад компонент векторів, заданих вхідних X і «вільних» (до моменту початку виконання завдання) вихідних Y даних алгоритму M . Якщо відповідно до цього групувати їх на вході й виході з алгоритму M , то отримаємо такі варіанти: $U = X_1 \cap Y_1 = X_2 \cap Y_2 = \dots = X_i \cap Y_i$, де i – варіант ситуації, що відрізняється тим, які параметри Y_i задані й тому ввійшли до вектора X_i , а які на момент розв'язку задачі не задані (вільні) й тому увійшли до вектора Y_i . Відповідно, в базі моделей (далі – БМ) БЗ і БД вирішувач повинен знаходити для конкретної ситуації свій варіант алгоритму M_i з набору: $Y_1 = F(X_1)$, $Y_2 = F(X_2)$, ..., $Y_i = F(X_i)$ і розв'язувати задачу «безпосередньо», без ітерацій.

Щоб перенести такий підхід на максимально низький рівень компонентної моделі, необхідно виділити елементарні структури, придатні для об'єднання в мережу. Такою елементарною структурою може бути пара взаємопов'язаних параметрів авіаційного двигуна ТВ3-117 x і y . Якщо в традиційній постановці записується $y = p(x)$, то в запропонованому варіанті це еквівалентно моделі, заданій парою алгоритмів M і M' , тобто «евристиками»: $y = F(x)$ і $x = F'(y)$. Однак, така структура (рис. 1) може з'єднуватися з іншими тільки послідовно. Тому елементарні структури повинні бути як мінімум потрійними. Відомо, що існують альтернативи – моделі можна зображувати графами (або мережами) або ж структурними схемами. За такої умови в першому випадку параметри є вершинами, а алгоритми – ребрами, в другому – все навпаки.

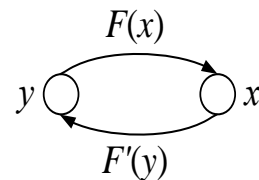


Рис. 1. Елементарна бінарна обчислювальна модель

Розглянемо перший варіант (рис. 2, а). Припустимо, зовнішній параметр u_1 пов'язаний із трьома «сусідами» u_2, u_3, u_4 так, що він може бути однозначно визначений через кожні два з них за допомогою функціоналів вигляду:

$$u_1 = P_{23} [f_{12}(u_2), f_{13}(u_3)];$$

$$u_1 = P_{43} [f_{14}(u_2), f_{13}(u_3)];$$

$$u_1 = P_{24} [f_{12}(u_2), f_{14}(u_4)]; \quad (1)$$

де функції P_{23} , P_{43} і P_{24} характеризують оператори в складі відповідних алгоритмів, у тому числі арифметичні дії, наприклад, $u_1 = f_{12}(u_2)f_{13}(u_3)$ або $u_1 = f_{12}(u_2) + f_{13}(u_3)$.

В останньому випадку для двох інших поєднань заданих «параметрів-сусідів» u_2, u_3 можна записати аналогічним чином $u_1 = f_{14}(u_4) + f_{13}(u_3)$ і $u_1 = f_{12}(u_2) + f_{13}(u_3)$. Вид оператора, що використовується у функції P_{ij} – знак або складніший оператор для кожної пари «параметрів-сусідів» з їхніми функціями впливу $f_{ij}(u_{ij})$ – може зберігатися в БД і використовуватися під час розв'язку задачі. Тоді

відповідна елементарна структура матиме вигляд фрейму й буде зображуватися ланкою мережі (типу «вершина з трьома ребрами»), показаним на рис. 2, б.

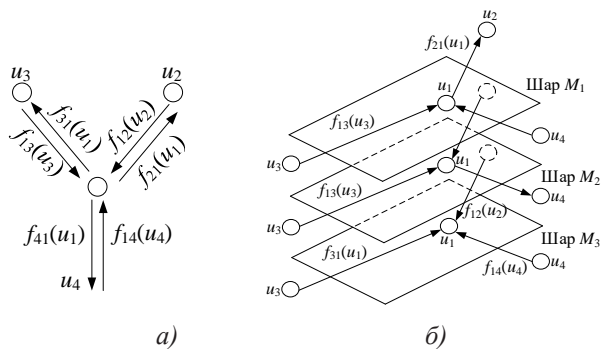


Рис. 2. Елементарна обчислювальна модель у вигляді тришарового незамкнутого графа

У кожному напрямку від вершини йдуть або приходять до неї ребра, на яких визначені взаємно зворотні функції: наприклад, $f_{12}(u_2)$ і $f_{21}(u_1)$ – це функції взаємного впливу параметрів (вершин) u_1 і u_2 один на одного. Цілком логічно, що елементарна структура тришарова – в кожному шарі своя пара заданих параметрів, свій напрямок графа. Так само будь-яке дерево зводиться до двійкового, де в кожній вершині три зв'язки, тоді можна показати, що будь-яка мережева модель може бути зображена показаними на рис. 2, б структурами.

Для другого варіанту подібним чином можна сформулювати елементарні блоки для структурних схем. Припустимо, що модель зображується функціоналом $F(x_1, x_2, x_3) = 0$. Практично завжди таку модель можна представити трійкою евристик: $x_1 = F(x_2, x_3)$, $x_2 = F(x_1, x_3)$, $x_3 = F(x_1, x_2)$. У цьому випадку елементарний структурний блок буде мати вигляд, як показано на рис. 3. Він теж логічно тришаровий – у кожному шарі є поєднання пари заданих і вихідних параметрів і свій напрямок руху в цьому блоці.

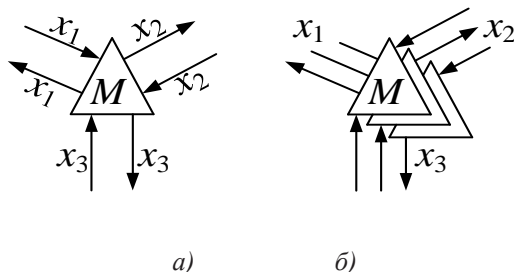


Рис. 3. Елементарний структурний блок для формування обчислювальної моделі

В обох варіантах такого роду структури (у вигляді: а – елементарних незамкнутих графів

або б – блоків, які логічно об'єднують три шари) можуть групуватися в мережу й створювати складні, але впорядковані структури (виникають аналогії з кристалічною або органічною решітками). Водночас елементарні осередки можуть бути три-, чотири-, п'яти-, шестикутними тощо (рис. 4).

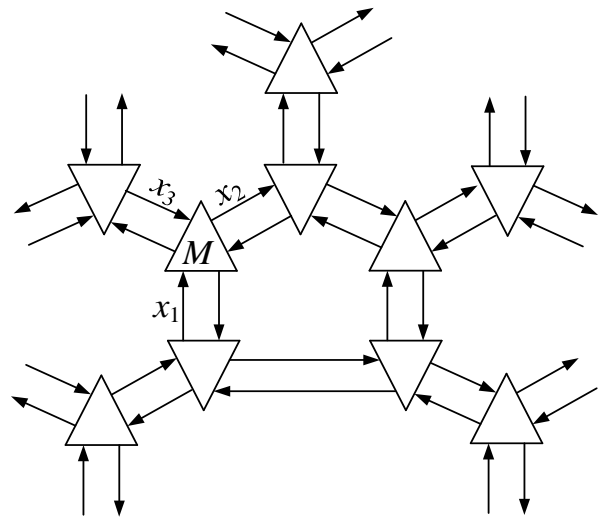


Рис. 4. Фрагмент обчислювальної моделі з елементарних структурних блоків

Якщо є необхідність, структури можуть бути тривимірними. Але логічно – вони, як і їхні складові частини елементарних блоків, тришарові. У такій тришаровій мережі в кожному шарі, в кожній вершині або елементарному блоці є тільки один напрямок подальшого руху вирішувача – в напрямку «третього сусіда» або вихідного параметра. Вибір вирішувачів (або самою вершиною, або елементарним блоком) одного з трьох алгоритмів M_i під час звернення до вершини (або елементарного блоку) еквівалентний вибору шару й напрямку для подальшого просування мережею. Для розпізнавання вирішувачів станів об'єктів (і їхніх входів) у них є ознака – «прапор» F , значення якого визначається числом заданих «параметрів-сусідів» і тим, чи виконувався вже алгоритм об'єкта в цій задачі.

Так, для першого варіанту (рис. 2, а) прапор кожної вершини F задається двома числами mn , де m – число заданих параметрів-«сусідів» (0, 1, 2, 3), n – ознака завдання самої вершини (0 – параметр у вершині не заданий і не обчислений, інакше 1). Тоді вирішувач повинен відшукувати й звертатися до вершин із прапором $F = 20$. Прапор $F = 31$ – нормально виконаний алгоритм об'єкта, а якщо прапор $F = 30$ – це ознака некоректності в задачі,

тоді потрібно виконати два або всі три алгоритми для цієї вершини й перевірити «нев'язування». У разі перевищення допустимої величини (точність задана в БД для цієї вершини) – виводиться діагностика.

У другому варіанті (рис. 2, б) перша величина m у «прапорі» F дорівнює числу заданих параметрів (ребер) блоку (0, 1, 2, 3), а друга n повідомляє вирішувач – запускався даний блок ($F = 1$) чи ні ($F = 0$). Тут вирішувач також шукає блоки з «прапором» $F = 20$ і звертається до них, обираючи відповідний алгоритм (один із трьох). Прапор $F = 31$ – нормально виконаний алгоритм блоку. Ознака некоректності – коли блок ще не виконувався, а всі три параметри вже задані ($F = 30$).

Остання ситуація виникає в обох варіантах хоча б один раз під час «обходу» вирішувачів. Навіть у випадку коректної задачі це відбувається в останній вершині або елементарному блоці, коли всі інші параметри вже визначені. Водночас перевірка, яку проводить вирішувач, є перевіркою дотримання точності.

Вибираючи в кожній вершині (а) або блоці (б) алгоритм, вирішувач просувається далі по відповідному шару. Відповідно до об'єктного підходу, як уже зазначалося, вибір одного з алгоритмів залежно від того, які параметри задані, може здійснювати логічна процедура в алгоритмі самого об'єкта (вершині або елементарному блоці). Вирішувачу необхідно тільки стежити за появою необхідних прапорів й активізувати «готові до виконання» об'єкти (вершини або блоки).

Обчислювальна модель авіаційного двигуна ТВ3-117 може складатися з фрагментів такої структури. Під час використання елементарних блоків «вільні» (не зайняті) двонапрямні ребра (входи-виходи) – це зовнішні параметри фрагмента мережі, які в конкретній ситуації відіграють роль входних чинників (якщо задані) або вихідних параметрів (якщо не задані) для компонентної моделі. До незайнятих («вільних») ребер можуть підключатися інші елементарні блоки або фрагменти структурних схем при нарощуванні цієї моделі.

Для першого варіанту подана модель зобразиться фрагментом мережі (рис. 5), з типових структур (модулів) якої може бути сформована загальна «павутина» – мережа, що характеризує модель авіаційного двигуна ТВ3-117 у цілому (рис. 6). На рис. 5 і 6 двонапрямними стрілками умовно замінені парні, протилежно спрямовані ребра.

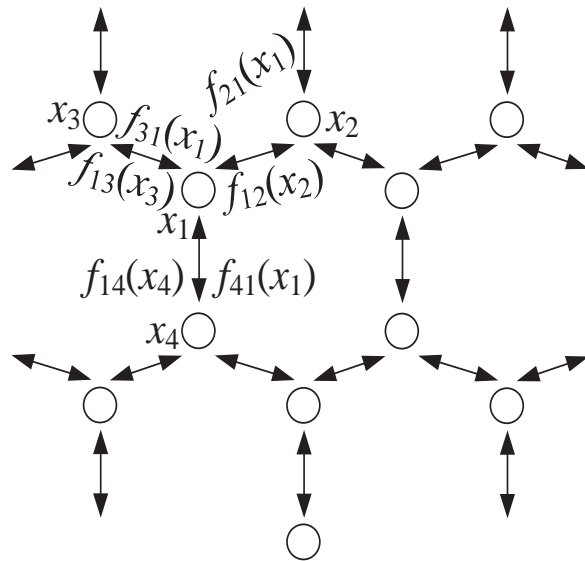


Рис. 5. Фрагмент семантичної мережі, яка виконує роль сполучного обчислювального осередку

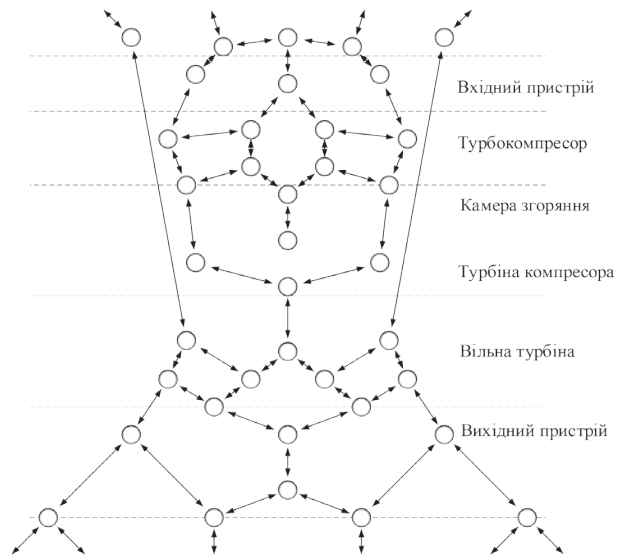


Рис. 6. Схеми багаторівневої обчислювальної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі

Області поблизу центру цієї мережі, де вершини (або дуги) – це основні вихідні дані двигуна, відповідають укрупненим моделям. Розширення меж мережі, тобто залучення нових параметрів, пов'язаних із розташованими ближче до центру, відповідає деталізації моделі двигуна. Певні зони в загальній мережі відповідають моделям окремих систем і підсистем двигуна. Відповідно, у БД, де зберігаються параметри й еталонні моделі двигуна, виділяються поля, в яких для кожного параметра зберігаються посилання на трьох «сусідів»: для варіанту а – на сусідні вершини (параметри) й на пов'язані з ними описи ребер мережі

(функціонали), або для варіанту b – на елементарні структурні блоки й зв'язувальні з ними ребра мережі.

У конкретній ситуації звернення до БД («дерево проєкту») дозволяє отримати значення певних параметрів; частина ж інших зовнішніх параметрів виявляється не заданою (вільною). Окрім того, є можливість відредагувати, задати або звільнити якийсь параметр. Під час роботи з такою моделлю програма-вирішувач діє залежно від того, як подана модель у вигляді мережі (рис. 4) з елементарних фрагментів незамкнених графів, або у вигляді структурної схеми (рис. 3) – з елементарних блоків. Так, у другому випадку вирішувач вибирає блоки M_i з прапором $F = 20$, для яких задана пара параметрів. Активізуючи їх (обираючи один із трьох внутрішніх алгоритмів, що може виробляти сам елементарний блок), він отримує треті параметри для цих блоків, тобто робить третє ребро теж заданим. Далі перегляд мережі повторюється, вибираються та активізуються нові блоки, які мають значення прапорів $F = 20$ – поки не виявиться певною вся мережа. На кожному кроці ті блоки, які вже активізувалися, більше не розглядаються, оскільки в них прапор $F = 31$. Водночас можуть виявитися ще до активізації будь-якого блоку заданими все три його параметри – прапор $F = 30$ (тобто виявляються придатними всі три внутрішніх алгоритми). Тоді повідомляється про «нев'язування» після виконання всіх трьох алгоритмів і порівняння результатів. Воно може виявитися в межах допустимості (що визначає користувач), або це результат некоректності завдання зовнішніх даних, неузгодженості в БД тощо. Проблема вирішується тим, що один або кілька параметрів мережі оголошуються користувачем «вільними».

У першому варіанті навпаки – все починається з параметрів. Перегляд мережі виявляє не задані вершини (параметри) з прапором $F = 20$, для яких задані обидва «сусіда», обирає відповідні дуги, активізує їх і визначає значення параметрів у шуканих вершинах. Водночас для результату кожної дуги використовується свій оператор у рекурентному вираженні – додавання, віднімання, множення, ділення або складніша дія. Ці оператори також зберігаються в БД або БЗ разом з описом дуг для кожного параметра. Далі цикл повторюється, поки не буде визначена вся мережа. Конфліктні ситуації, як це описано для другого варіанту, розпізнаються та вирішуються подібним чином.

Запропонований підхід добре узгоджується з об'єктною орієнтацією в сучасних інформаційних

технологіях. Локалізація параметрів і зменшення їхнього числа, спрощення зв'язків між ними дозволяє виділити елементарні блоки або елементарні дуги. Формування мережевої моделі для конкретного двигуна може виконуватися з використанням технології SADT.

Розглянемо формування центральної частини мережі, яка описує авіаційний двигун ТВ3-117 у найбільш укрупненій постановці – на рівні основних вихідних даних. З урахуванням особливостей робочого процесу основними закономірностями є рівняння збереження кількості руху (імпульсів), рівняння енергії, рівняння нерозривності. Задамо їм відповідно імена елементарних блоків B_1 , B_2 і B_3 . Зображуючи ці блоки в складі структурної схеми й деталізуючи параметри за викладеною методикою, для кожної із цих моделей (рівнянь) отримуємо фрагменти мережі (рис. 7, 8).

Як показано на рис. 7, у такій постановці модель двигуна в багатовимірному просторі параметрів є «клаптиковою поверхнею» у вигляді каркаса мережі з характерними точками (якщо розглядати значення параметрів у вершинах як координати в багатовимірному просторі, де в кожного параметра своя вісь і шкала), «переміщаючи» які отримуємо нову форму й нове положення в просторі параметрів цієї поверхні. До «вихідних» із вершин або блоків «назовні» стрілок (параметрів або дуг-функціоналів) можуть підключатися зовнішні системи.

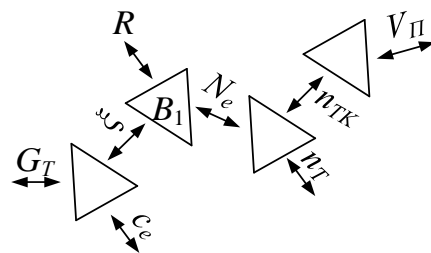


Рис. 7. Структурна мережа, що моделює закон збереження кількості руху на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження кількості руху, запишемо у вигляді:

$$B_1: R = \zeta_T \left(39,5 \eta_0 D \rho^{\frac{1}{2}} \xi N_e \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (2)$$

де R – тяга, яка на значному віддаленні від Землі визначається за формулою Жуковського; ζ_T – коефіцієнт витрати тяги; $\eta_0 = \frac{c_T^2}{2m_k}$ – відносний коефіцієнт корисної діяльності гвинта на режимі висіння; c_T – коефіцієнт тяги; $m_k = \frac{2N_{H.B}}{\rho F_{OM} (\omega r)^2}$ – коефіцієнт обертального моменту; $N_{H.B}$ – потужність

на валу опорного гвинта; F_{OM} – площа, що обмітається опорним гвинтом; ωr – окружна швидкість кінця лопаті; D – діаметр опорного гвинта; $\xi = \frac{c_e N_{номп}}{G_T}$ – коефіцієнт витрати потужності; c_e – питома витрата палива; $N_{номп}$ – потрібна потужність вертольоту на режимі горизонтального польоту; G_T – витрата палива; $N_e = f(n, n_T, p_H, T_H)$ – наявна потужність; $n = f(V_{II})$ – частота обертання ротора турбокомпресора; V_{II} – швидкість польоту; n_T – частота обертання вільної турбіни; p_H, T_H – відповідно тиск і температура навколишнього середовища; ρ – густина повітря.

На рис. 8 показано, як з урахуванням вищевикладеного до вихідного блоку B_2 підключаються додаткові блоки. Вершина цього «пагорба» знаходиться в центрі мережі, де розташовуються основні параметри двигуна. Геометрична інтерпретація тут пов'язана з тим, що в блочно-ієрархічній моделі двигуна всі вузли авіаційного двигуна ТВ3-117 розділені за рівнями – вхідний пристрій, турбокомпресор, камера згоряння тощо. Кожному з вузлів відповідає певна ділянка мережі. Введення поняття «рівень» дозволяє виділяти потрібні фрагменти мережі під час розв'язку конкретних задач.

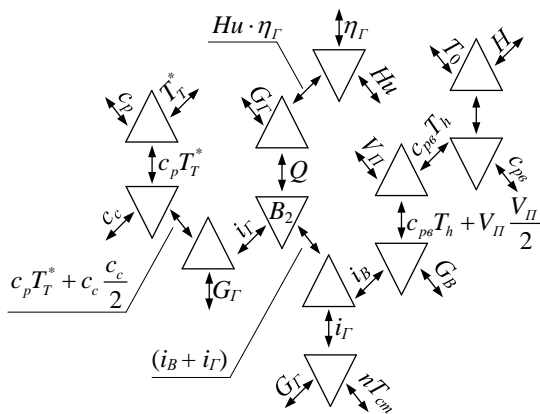


Рис. 8. Структурна мережа, що моделює закон збереження енергії на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження енергії на рівні двигуна, має вигляд:

$$B_2: Q = i_T - (i_B + i_T); \quad (3)$$

де Q – теплопідведення; i_T – повна ентальпія газу; i_B – повна ентальпія повітря; i_T – ентальпія палива.

Подібним чином для деталізації мережі, що моделює B_2 – закон збереження енергії – на рівні основних даних двигуна (рис. 8), використовується зв'язок:

$$i_T = G_T \left(c_p T_T^* + \frac{c_c^2}{2} \right); \quad (4)$$

де c_p – теплоємність робочого тіла; T_T^* – загальмована температура робочого тіла.

$$Q = G_T H_u \eta_T, \quad (5)$$

де G_T – витрата палива; H_u – нижча теплотворна здатність; η_T – повнота згоряння;

$$i_B = G_B \left(c_{ps} T_H + \frac{V_{II}^2}{2} \right); \quad (6)$$

де c_{ps} – теплоємність повітря; $T_H = f(T_0, H)$ – температура атмосферного повітря, яка підпорядковується закону стандартної атмосфери; T_0 – атмосферна температура в землі; H – висота польоту.

Як видно, фрагменти мережі, що моделюють основні рівняння на рівні двигуна, мають помічені кружками «вільні» параметри – незайняті дуги, якими ці фрагменти об'єднуються в загальну мережу, що моделює двигун.

Оскільки закони збереження енергії та кількості руху незалежні, то кожна з відповідних моделей добре поєднується з моделлю рівняння нерозривності. Однак, якщо ми хочемо мати модель, що об'єднує всі три рівняння, то дві дуги G_B і G_T виявляться ні до чого приєднати (вони вже виявляються «зайняті»). Це приводить до розуміння того, що додатково необхідні елементарні блоки-роздільники вигляду, показаного на рис. 9.

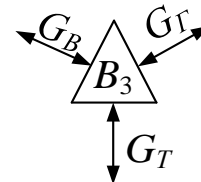


Рис. 9. Елементарна семантична мережа, що моделює закон збереження маси (нерозривності) на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження маси (нерозривності) на рівні двигуна, має вигляд:

$$B_3: G_T = G_B + G_T, \quad (7)$$

де G_T – витрата газу; G_B – витрата повітря; G_T – витрата палива.

Така структура означає появу деякої надмірності в базі моделей (моделі зберігаються у БД), але додаткові блоки по структурі дуже прості й відповідають функціоналу:

$$F(G_B = 0) \text{ або } G_B = 0,5 G_B + 0,5 G_B, \quad (8)$$

Під час роботи зі складною моделлю вирішувач, стикаючись із такими блоками, виявляє, що в них ще до активізації задані всі три параметри, але це не призводить до аварійних повідомлень і зупинок, оскільки під час виконання будь-якого з трьох алгоритмів блоку забезпечено узгодження результату з третім заданим вихідним ребром.

Отримана мережа може розширюватися шляхом залучення нових параметрів у складі додаткових елементарних блоків відповідно до закономірностей, що описують закономірності робочих процесів і взаємозв'язок у вузлах двигуна.

Отже, контроль і діагностика технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 може бути реалізована на основі FDI-методу на базі моделей двигуна, що є мережею з елементарних (тришарових) блоків або незамкнених графів з однією вершиною-параметром і трьома ребрами. Ці елементарні об'єкти містять параметри, посилання на трьох «сусідів» і потрібні алгоритми зв'язку – попарно

з двома з трьох «сусідів». Активізує об'єкти в мережі програма-вирішувач відповідно до «прапорів», які виставляють об'єкти. Алгоритми елементарних об'єктів аналізують, які параметри, що приходять від «сусідів», обирають з урахуванням цього один із трьох власних алгоритмів для виконання, виставляють для зовнішнього вирішувача значення «прапора». Водночас задачі контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 розв'язуються без ітерацій. Але для реалізації наведеного методу моделювання необхідна розробка специфічної керівної програми-вирішувача.

Висновки. У роботі запропоновано метод побудови математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі розширеної семантичної мережі, що дозволяє шляхом реконфігурації математичної моделі й адаптації її характеристик до індивідуального двигуна розв'язувати широкий набір задач контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у польотних режимах.

Список літератури:

1. Жернаков С.В. Активная экспертная система мониторинга и управления ремонтом авиационных газотурбинных двигателей. *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*. 2001. № 2. С. 80–84.
2. Жернаков С.В., Равилов Р.Ф. Контроль и диагностика технического состояния авиационного двигателя на основе экспертной системы С-PRIZ. *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16, № 6 (51). С. 3–11.
3. Васильев В.И., Жернаков С.В. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе экспертных систем. *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9, № 4 (22). С. 11–23.
4. Машошин О.Ф. Оценка диагностической ценности информации при решении задач в области эксплуатации авиационной техники. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 219. С. 53–56.
5. De Giorgi M. G., Campilongo S. and Ficarella A. A diagnostics tool for aero-engines health monitoring using machine learning technique. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 860–867.
6. Ntantis E.L. Diagnostic Methods for an Aircraft Engine Performance. *Journal of Engineering Science and Technology*. Rev. 8 (4). P. 64–72.
7. Шмельов Ю.М., Владов С.І., Клімова Я.Р. Застосування методології системного аналізу до вирішення проблеми ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3–117. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи* : матеріали Регіональної наук.-практ. конференції студентів, аспірантів і молодих науковців, м. Вінниця, 06–08 червня 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 278–282.
8. Шмельов Ю.М., Владов С.І., Хебда А.С., Котляров К.Г. Застосування правил нечіткої логіки у задачі ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3–117. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 30 (69), № 3. С. 34–40.
9. Shmelov Y., Vladov S., Klimova Y. and Kirukhina M. Expert system for identification of the technical state of the aircraft engine TV3-117 in flight modes. *System Analysis & Intelligent Computing* : IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 08–12 October 2018. 2018. P. 77–82.
10. Golanski P., Perz-Osowska M. and Szczekala M. A demonstration model of a mobile expert system with augmented reality user interface supporting M–28 aircraft maintenance. *Journal of KONBiN*. 2014. No. 3 (31). P. 23–31.
11. Otto B., Folmer E. and Ebner V. A characteristics framework for semantic information systems standards. *Information Systems and e-Business Management*. 2012. Vol. 10, Issue 4. P. 571–602.
12. Sarkar S., Singh D. S., Srivastav A. and Ray A. Semantic sensor fusion for fault diagnosis in aircraft gas turbine engines. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 29 June–01 July 2011. P. 220–225.

Vladov S.I., Shmelov Yu.M., Pylypenko L.M., Nazarenko N.P., Tutova N.V., Derevyanko I.G., Ponomarenko A.V. IMPLEMENTATION OF COMPONENT MATHEMATICAL MODELS OF TV3-117 AIRCRAFT ENGINE BASED ON SEMANTIC NETWORK

The subject of the study in the article is the TV3-117 aircraft engine and methods for monitoring and diagnosing its technical condition. The purpose of the work is the implementation of component mathematical models of the aircraft engine TV3-117 based on the semantic network for monitoring and diagnosing its technical condition. The following tasks are solved: substantiation of the prerequisites for the development of mathematical models of the TV3-117 aircraft engine based on the semantic network, development of a computational model of the TV3-117 aircraft engine based on the semantic network. The following methods are used: methods of mathematical modeling, methods for constructing a multi-level computational model based on the semantic network. The following results were obtained: It was determined that the control and diagnostics of the technical condition of the TV3-117 aircraft engine can be implemented based on the FDI method based on engine models, which is a network of elementary (three-layer) blocks or open graphs with one vertex parameter and three edges. These elementary objects contain parameters, links to three “neighbors” and triple communication algorithms – in pairs with two of the three “neighbors”. The solver program activates the objects in the network in accordance with the “flags” that expose the objects. Algorithms of elementary objects analyze which parameters that come from the “neighbors”, taking into account this, choose one of three proprietary algorithms for execution, set the values of the “flag” for the external solver. At the same time, the tasks of monitoring and diagnosing the technical condition of the TV3-117 aircraft engine are solved without iterations. Conclusions: A method is proposed for constructing a mathematical model of the TV3-117 aircraft engine based on an extended semantic network, which allows reconfiguring the mathematical model and adapting its characteristics with an individual engine to solve a wide range of tasks for monitoring and diagnosing the technical condition of the TV3-117 aircraft engine in flight modes. The resulting network can be expanded by attracting new parameters as part of additional elementary units in accordance with the laws describing the laws of work processes and the relationship in the engine nodes.

Key words: aircraft engine, mathematical model, semantic network, graph.

Морозов А.В.

Державне підприємство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОСПРЯМОВАНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Фундаментальна задача механіки композиційних матеріалів складається у обчисленні ефективних пружних характеристик по відомим пружним характеристикам структурних компонентів, тобто розгляд композиційного матеріалу на мікрорівні з наступним переходом на макрорівень. Натепер найбільш доцільним у визначенні ефективних пружних характеристик композиційних матеріалів є використання верифікаційних теоретичних методів, оскільки цей підхід передбачає можливість аналізу напружень і деформацій у мікрооб'ємах композиційного матеріалу. Теоретичні методи дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу для необхідних випадків навантажень і граничних умов, що дозволяє оптимізувати та раціонально проектувати структуру конструкції, виготовленої із композиційного матеріалу, на стадії розрахунків. Розробка теоретичної методики визначення ефективних пружних характеристик композиційного матеріалу являє собою економічно виправдану науково-технічну задачу, вирішення якої дозволить скоротити час створення деталей, виготовлених із композиційних матеріалів, з потрібними характеристиками міцності та пружності.

Робота присвячена актуальній проблемі визначення ефективних пружних характеристик односпрямованих волокнистих композиційних матеріалів. У роботі запропонована методика проведення серії чисельних експериментів, які необхідні для повного визначення ефективних пружних характеристик односпрямованого композиційного матеріалу. Також у роботі визначені граничні умови, які потрібні для моделювання необхідних чисельних експериментів. За допомогою програмного комплексу ANSYS здійснено математичне модулювання та чисельне дослідження представницького елемента об'єму односпрямованого волокнистого вуглецевого композиційного матеріалу та визначені ефективні пружні характеристики еквівалентного гомогенного матеріалу.

Розроблена чисельна методика дозволяє вирішувати задачі механіки композиційних матеріалів за допомогою сучасних програмних комплексів, що використовують в математичній основі, – метод скінчених елементів

Ключові слова: композиційні матеріали, ефективні пружні характеристики, чисельне усереднення, представницький елемент об'єму, чисельний аналіз.

Постановка проблеми. Використання сучасних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) у конструкції авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) характеризується низкою переваг порівняно з традиційними конструкційними матеріалами (металевими сплавами), серед яких високі питомі міцність та жорсткість і, як наслідок, вагова ефективність, можливість проектування конструкції з потрібними властивостями. На етапі проектування деталей з композиційних матеріалів необхідно проведення комплексу розрахункових та експериментальних досліджень як компонентів матеріалу, зразків композиційних матеріалів, так і готового виробу з ПКМ, що потребує багато часу. Скорочення часу впровадження деталей з ПКМ в конструкцію ГТД можливо шляхом розробки і застосування верифікаційних методів до цієї проблеми.

Постановка завдання. Метою статті є визначення ефективних пружних характеристик односпрямованого композиційного матеріалу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для здійснювання аналізу напруженого та деформованого стану (НДС) конструкції, виготовленої із композиційного матеріалу, потрібна інформація про його пружні властивості. Є два основних шляхи одержання характеристик міцності композиційних матеріалів.

Перший феноменологічний підхід пов'язаний з експериментальними дослідженнями зразків, виготовлених із композиційного матеріалу, що дозволяє визначити ефективні (еквівалентні, приведені, усереднені) пружні характеристики матеріалу, не зважаючи на його внутрішню структуру і вважаючи його однорідним анізотропним середовищем. Такий підхід використовує теорію анізотропних середовищ у розрахунках макроскопічних характеристик. При цьому немає можливості визначення полів напружень і деформацій у мікрооб'ємах композиційного матеріалу, зокрема на міжфазних межах [1]. Експериментальне визначення пружних

характеристик виявляє себе складну і кошовну технічну задачу, також у разі будь-якої зміни виду плетіння, характеристик волокна чи матриці, об'ємного вмісту компонентів, технології виготовлення матеріалу потребує повторного проведення всієї низки експериментів.

Другий підхід використовує методи структурного аналізу і пов'язаний з теоретичним визначенням ефективних пружних характеристик за відомими властивостями вихідних компонентів і структури композиційного матеріалу. Цей підхід передбачає аналіз напружень і деформацій усереднені компонентів та на міжфазних границях. Це дозволяє прогнозувати характеристики міцності та пружності для необхідних випадків навантажень і граничних умов, через що можливо оптимізувати та раціонально проектувати структуру конструкції, виготовленої із композиційного матеріалу.

Теоретичні методи визначення ефективних пружних характеристик композиційних матеріалів. Класичним є метод знаходження усереднених матеріальних функцій на зразках з неоднорідного матеріалу, в яких однорідний напружений або деформований стан (НДС) здійснюється тільки в середньому. Знайдені матеріальні функції описують ефективні визначаючі співвідношення [2]:

$$\hat{\sigma} = \check{F}(\hat{\varepsilon}, \bar{x}) \quad \langle \hat{\sigma} \rangle = \check{f}(\langle \hat{\varepsilon} \rangle, \bar{x}) \quad (1)$$

$$\hat{\varepsilon} = \check{G}(\hat{\sigma}, \bar{x}) \quad \langle \hat{\varepsilon} \rangle = \check{g}(\langle \hat{\sigma} \rangle, \bar{x}) \quad (2)$$

де $\hat{\sigma}$ – тензор напружень;

$\hat{\varepsilon}$ – тензор деформацій;

\check{F} – деякий оператор, тензор другого рангу;

\check{G} – обернений \check{F} оператор;

$\langle \dots \rangle$ – середні значення величин.

Цей класичний метод має назву теорії ефективного модуля і не дозволяє здійснювати аналіз НДС всередині відокремлених компонентів композиційного матеріалу.

Фундаментальні основи методів визначення механічних характеристик полікристалів, закладені Фойгтом (Voight) [3] та Реуссом (Reuss) [4], також названі правилом суміші (rule of mixtures) [5]. Процедура усереднення по Фойгту припускає, що композиційний матеріал знаходиться в умовах постійної деформації, по Реуссу – постійного напруження. Ці оцінки являють собою середнє арифметичне та середнє гармонічне характеристик компонентів композиційних матеріалів.

$$E_{eff}^V = \sum_{i=1}^n f_i E_i, \quad E_{eff}^R = \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i}{E_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

де f_i – об'ємна концентрація компоненти композиційного матеріалу;

n – число компонент.

Недоліки цього підходу видимі: використання схеми Фойгта надає завищену оцінку ефективного пружного модуля, а схеми Реусса – занижену.

Уточнення меж Фойгта-Реусса є актуальною задачею механіки композиційних матеріалів. Суттєвий вклад у рішення цієї задачі внесли Хашин і Штрікман [6; 7]. Підхід базується на варіаційному принципі для анізотропної неоднорідної середі і дозволяє визначити більш вузькі межі ефективних модулів. Особливістю метода є збіжність верхньої та нижньої межі у разі рівності модулів зсуву його компонентів.

Хілл у роботі [8; 9] запропонував під час визначення ефективних модулів використовувати гіпотезу рівності макроскопічної величини густини енергії деформації всього об'єму гетерогенного матеріалу середній величині густини енергії деформації всіх елементів цього об'єму. Також він зазначив, що найбільш вірогідним значенням ефективних модулів є середнє значення співвідношень (3).

У статті [10] стосовно ряду односпрямованих композиційних матеріалів визначено точність найбільш відомих методик визначення ефективних модулів.

Ефективні пружні постійні композиційного матеріалу

Оскільки об'єм матеріалу значно перевищує радіус волокна, то композиційний матеріал можна умовно вважати гомогенним з усередненими за об'ємом V значеннями компонентів тензору напружень і деформацій:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV \quad (1)$$

Для проведення розрахунків композиційний матеріал вважається гомогенним анізотропним матеріалом з усередненими пружними характеристиками, тому узагальнений закон Гука в тензорному запису має вигляд [11]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = A_{ijkl} \langle \sigma_{kl} \rangle \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (2)$$

де A_{ijkl} – константи податливості еквівалентного гомогенного матеріалу;

$\langle \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij} \rangle$ – усереднені значення напружень і деформацій.

Здебільшого структура композиційного матеріалу робочої пружності має певну симетрію.

Якщо композиційний матеріал є ортотропним і має три взаємно перпендикулярні площини пружної симетрії, і якщо через них провести систему координат, то закон Гука зручно зобразити у матричній формі [12, 13, 14]:

$$\begin{bmatrix} \langle \varepsilon_x \rangle \\ \langle \varepsilon_y \rangle \\ \langle \varepsilon_z \rangle \\ \langle \gamma_{xy} \rangle \\ \langle \gamma_{yz} \rangle \\ \langle \gamma_{zx} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \langle \sigma_x \rangle \\ \langle \sigma_y \rangle \\ \langle \sigma_z \rangle \\ \langle \tau_{xy} \rangle \\ \langle \tau_{yz} \rangle \\ \langle \tau_{zx} \rangle \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де a_{ij} – компоненти матриці податливості.

Коефіцієнти тензора податливості можна виразити через технічні пружні константи:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_x}; & a_{22} &= \frac{1}{E_y}; & a_{33} &= \frac{1}{E_z}; \\ a_{12} &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}; & a_{13} &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x} = -\frac{\nu_{zx}}{E_z}; & a_{23} &= -\frac{\nu_{yz}}{E_y} = -\frac{\nu_{zy}}{E_z}; \\ a_{44} &= \frac{1}{G_{xy}}; & a_{55} &= \frac{1}{G_{yz}}; & a_{66} &= \frac{1}{G_{zx}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де E_x, E_y, E_z – модулі пружності; $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}, \nu_{zx}, \nu_{yz}, \nu_{zy}$ – коефіцієнти Пуассона; G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} – модулі зсуву.

Узагальнений закон Гука в тензорному запису у зворотній формі має вигляд:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = B_{ijkl} \langle \varepsilon_{kl} \rangle \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (5)$$

де B_{ijkl} – константи жорсткості еквівалентного гомогенного матеріалу.

$[B]$ – обернена матриця пружних постійних $[B] = [A]^{-1}$

У матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \langle \sigma_x \rangle \\ \langle \sigma_y \rangle \\ \langle \sigma_z \rangle \\ \langle \tau_{xy} \rangle \\ \langle \tau_{yz} \rangle \\ \langle \tau_{zx} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_x \rangle \\ \langle \varepsilon_y \rangle \\ \langle \varepsilon_z \rangle \\ \langle \gamma_{xy} \rangle \\ \langle \gamma_{yz} \rangle \\ \langle \gamma_{zx} \rangle \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де b_{ij} – компоненти матриці жорсткості.

Односпрямований композиційний матеріал

Розглянутий нижче підхід заснований на визначенні ефективних властивостей КМ згідно з властивостями його компонентів. Оскільки композиційний матеріал має періодичну структуру – вводиться поняття представницького елемента об’єму, в якому всі усереднені за об’ємом компоненти напружень і деформацій дорівнюють відповідним величинам, обчисленим для розглянутого композиту в цілому [15]. Результатом мікромеханічної постановки задачі є обчислення ефективних пружних постійних моношару композиційного матеріалу, що дозволяє надалі проводити дослідження на новому рівні абстрагування.

Під час визначення ефективних пружних постійних моношару композиту по відомим пружним характеристикам волокон і в’язучого потрібно моделювання чотирьох експериментів – при навантаженні шару уздовж та поперек армування, при поздовжньому та поперечному зсуві. Спільна робота волокон і в’язучого з різними пружними характеристиками є складною математичною задачею. Для рішення задачі використовуються моделі волокна і в’язучого з урахуванням їх спільної роботи.

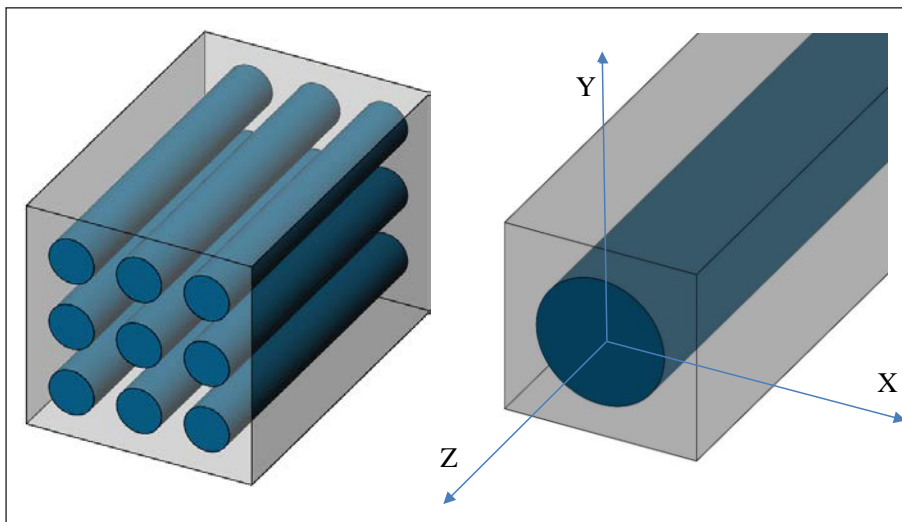


Рис. 1. Структура односпрямованого композиційного матеріалу та представницького елемента об’єму

Розрахункові експерименти проводяться з припущеннями, що:

1. Міжфазна межа має ідеальний контакт, тобто описується безперервністю переміщень і поверхневих напружень між волокном і в'язучим.

2. Компоненти композиту – однорідні і лінійно-пружні матеріали.

3. Волокна – прямі, паралельні, розподілені рівномірно.

Властивості композиційного матеріалу у напрямках x та y однакові, тому, враховуючи симетрію, маємо співвідношення:

$$\begin{aligned} b_{11} &= b_{22}, \\ b_{13} &= b_{23}, \\ b_{55} &= b_{66} \end{aligned} \quad (7)$$

Чисельними експериментами моделюються чотири випадки деформування: розтягнення у напрямках Z , X та зсув у площинах XY , YZ .

Перший чисельний експеримент моделює розтягнення у напрямку Z . Визначаються компоненти жорсткості:

$$b_{13} = \frac{\langle \sigma_x \rangle}{\langle \varepsilon_z \rangle}; \quad b_{33} = \frac{\langle \sigma_z \rangle}{\langle \varepsilon_z \rangle} \quad (8)$$

Другий чисельний експеримент моделює розтягнення у напрямку X . Визначаються компоненти жорсткості:

$$b_{11} = \frac{\langle \sigma_x \rangle}{\langle \varepsilon_x \rangle}; \quad b_{21} = \frac{\langle \sigma_y \rangle}{\langle \varepsilon_x \rangle} \quad (9)$$

Третій чисельний експеримент моделює зсув у площині XY . Визначається компонента жорсткості:

$$b_{44} = \frac{\langle \tau_{xy} \rangle}{\langle \gamma_{xy} \rangle} \quad (10)$$

Четвертий чисельний експеримент моделює зсув у площині YZ . Визначається компонента жорсткості:

$$b_{55} = \frac{\langle \tau_{yz} \rangle}{\langle \gamma_{yz} \rangle} \quad (11)$$

У ПК ANSYS для проведення визначених експериментів використано скінчений елемент PLANE 183, що має 8 вузлів та дві степені вільності у кожному вузлу: переміщення у напрямках X та Y . Скінчений елемент застосовується для рішення плоских задач та має опцію узагальнена плоска деформація (*generalized plane strain*).

Для знаходження останньої константи, щоб не будувати тривимірну модель представницького

об'єму, доцільно використати математичну аналогію між задачею поздовжнього зсуву у площині YZ та задачею стаціонарного теплового аналізу у площині YZ .

Для двовимірного температурного поля $T(x, y)$ диференціальне рівняння теплопровідності стаціонарного теплового режиму має вид [16; 17]:

$$\nabla^2 T = 0, \quad (12)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа.

Тепловий потік визначається співвідношеннями:

$$Q_x^1 = K_1 \frac{\partial T}{\partial x}; \quad Q_y^1 = K_1 \frac{\partial T}{\partial y}; \quad Q_x^2 = K_2 \frac{\partial T}{\partial x}; \quad Q_y^2 = K_2 \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

Функція переміщення $w(x, y)$ у напрямку армування повинна задовольняти рівнянню:

$$\nabla^2 w = 0 \quad (14)$$

Зв'язок дотичних напружень з переміщеннями у поздовжньому напрямку з урахуванням різних модулів зсуву волокон та в'язучого виражається:

$$\tau_{xz}^1 = G_1 \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \tau_{yz}^1 = G_1 \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \tau_{xz}^2 = G_2 \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \tau_{yz}^2 = G_2 \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (15)$$

де G_1, G_2 – модулі зсуву.

На межі волокна та в'язучого потрібні виконуватися умови неперервності. В задачі стаціонарної теплопровідності між температурою і тепловим потоком, в задачі поздовжнього зсуву між переміщеннями і дотичними напруженнями.

Як видно, крайові задачі стаціонарної теплопровідності (12), (13) та поздовжнього зсуву (14), (15) аналогічні. Тобто потрібно прийняти $K_1 = G_1$, $K_2 = G_2$ і значення температури $T(x, y)$ стануть рівними переміщенню $w(x, y)$, а теплові потоки Q_x, Q_y стануть рівними дотичним напруженням τ_{xz}, τ_{yz} .

Під час моделювання задачі про стаціонарне розподілення температури був використаний 8-ми вузловий скінчений елемент PLANE77 з однією степеню вільності в кожному вузлу.

Проведення чисельних експериментів

Для моделювання представницького елемента об'єму використані наступні дані щодо пружних властивостей компонентів композиційного матеріалу:

– волокно – $E_a = 250$ ГПа; $G_a = 104.17$ ГПа; $\nu_a = 0.2$; $\text{den} = 1790$ кг/м³;

– матриця – $E_m = 4$ ГПа; $G_m = 1.43$ ГПа; $\nu_m = 0.4$; $\text{den} = 1250$ кг/м³.

Розміри представницької моделі: довжини сторін одиничні; радіус волокна $r = 0,8$; коефіцієнт об'ємного вмісту $0,5027$.

Після завершення аналізу у постпроцесорі обчислювались середні значення напружень:

$$\begin{aligned} \langle \sigma_x \rangle &= \int_0^1 \sigma_x(x=1, y) dy; \quad \langle \sigma_y \rangle = \\ &= \int_0^1 \sigma_y(x, y=1) dx; \quad \langle \sigma_z \rangle = \iint_0^1 \sigma_z dx dy \end{aligned} \quad (16)$$

Чисельні експерименти реалізовано за допомогою програмного комплексу ANSYS. Скінчено-елементна сітка має 17 211 елементів та 52 126 вузлів (рис. 2).

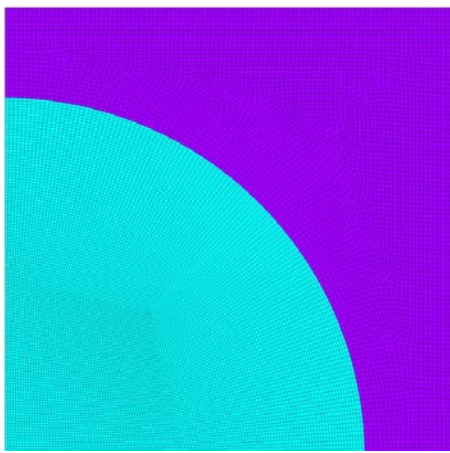


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка представницької моделі

Моделювання розтягнення у напрямку Z.

Граничні умови задаються наступним чином:

- на лініях $x = 0, y = 0$ – умови симетрії;
- на лініях $x = 1, y = 1$ – відсутність відповідних переміщень $u_x = 0, u_y = 0$ і дотичних напружень $\tau_{xy} = 0, \tau_{yx} = 0$.

За допомогою опції *generalized plane strain* задається зусилля у напрямку армування, яке завдяки одиничним розмірам моделі буде дорівнювати значенню напруження σ_z . Для обчислення σ_z приймалось рівним 10^6 Па.

Вектор середніх деформацій має вигляд:

$$\langle \epsilon \rangle = [00 \langle \epsilon_z \rangle 000]^T \quad (17)$$

де $\langle \epsilon_z \rangle$ обчислюється у постпроцесорі.

Результати чисельного експерименту дозволяють визначити на основі співвідношення (8) пружні характеристики еквівалентного матеріалу b_{13}, b_{33} .

Моделювання розтягнення у напрямку X.

Граничні умови задаються наступним чином:

- на лініях $x = 0, y = 0$ – умови симетрії;
- на лінії $y = 1$ – переміщення $u_y = 0$, дотичне напруження $\tau_{yx} = 0$;
- на лінії $x = 1$ – переміщення $u_x = \epsilon$, дотичне напруження $\tau_{xy} = 0$.

Для обчислення ϵ приймалось рівним 10^{-3} .

Вектор середніх деформацій має вигляд:

$$\langle \epsilon \rangle = [\langle \epsilon_x \rangle 00000]^T \quad (18)$$

Результати чисельного експерименту дозволяють визначити на основі співвідношення (9) пружні характеристики еквівалентного матеріалу b_{11}, b_{21} .

Моделювання зсуву у площині XY.

Граничні умови задаються наступним чином:

- на лініях $x = 0, x = 1$ – переміщення $u_y = 0$;
- на лінії $y = 0$ – переміщення $u_x = 0$;
- на лінії $y = 1$ – переміщення $u_x = \epsilon$.

Для обчислення ϵ приймалось рівним 10^{-3} .

Вектор середніх деформацій має вигляд:

$$\langle \epsilon \rangle = [000 \langle \gamma_{xy} \rangle 00]^T \quad (19)$$

У постпроцесорі обчислюється середнє значення дотичного напруження:

$$\langle \tau_{xy} \rangle = \int_0^1 \tau_{xy}(x=1, y) dy \quad (20)$$

Результати чисельного експерименту дозволяють визначити на основі співвідношення (10) пружну характеристику еквівалентного матеріалу b_{44} .

Моделювання зсуву у площині YZ.

Граничні умови задаються наступним чином:

- на лініях $x = 0, x = 1$ – тепловий потік $Q_y = 0$;
- на лінії $y = 0$ – температура $T = 0$;
- на лінії $y = 1$ – температура $T = 10^{-3}$.

Вектор середніх деформацій має вигляд:

$$\langle \epsilon \rangle = [0000 \langle \gamma_{yz} \rangle 0]^T \quad (21)$$

У постпроцесорі обчислюється середнє значення дотичного напруження:

$$\langle \tau_{yz} \rangle = \int_0^1 \tau_{yz}(x, y=1) dx \quad (22)$$

Результати чисельного експерименту дозволяють визначити на основі співвідношення (11) пружну характеристику еквівалентного матеріалу b_{55} .

Результати чисельних експериментів

Розтягнення у напрямку Z (рис. 3, 4).

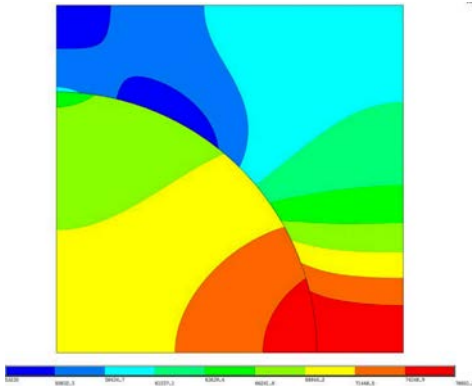


Рис. 3. Напруження σ_x

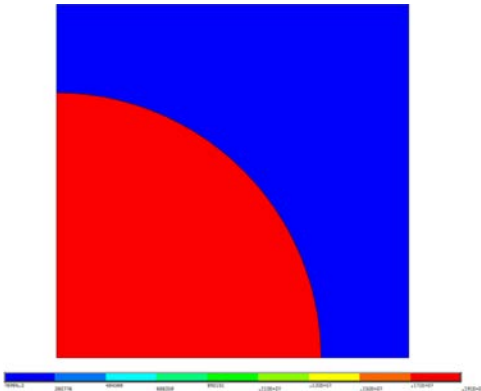


Рис. 4. Напруження σ_z

Визначені в постпроцесорі величини (формули 16, 17):

$$\langle \varepsilon_z \rangle = 0.753 \cdot 10^{-5} ;$$

$$\langle \sigma_x \rangle = \langle \sigma_y \rangle = 0.6603 \cdot 10^5 \text{ Па} ;$$

Компоненти матриці жорсткості (формули 8):

$$b_{13} = 0.8769 \cdot 10^{10} \text{ Па} ;$$

$$b_{33} = 13.2802 \cdot 10^{10} \text{ Па} .$$

Розтягнення у напрямку X (рис. 5).

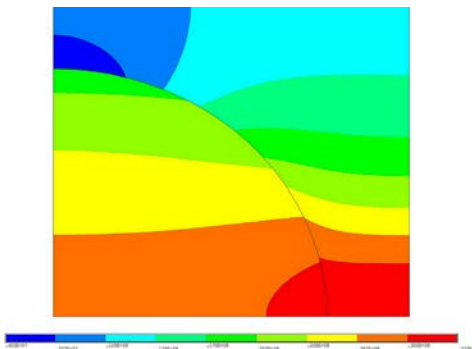


Рис. 5. Розподіл напружень σ_x

Визначені в постпроцесорі величини (формула 16):

$$\langle \sigma_x \rangle = 0.21098 \cdot 10^8 \text{ Па} ;$$

$$\langle \sigma_y \rangle = 0.91430 \cdot 10^7 \text{ Па} .$$

Компоненти матриці жорсткості (формули 9):

$$b_{11} = 2.1098 \cdot 10^{10} \text{ Па} ;$$

$$b_{21} = 0.9143 \cdot 10^{10} \text{ Па} .$$

Зсув у площині XY (рис. 6).

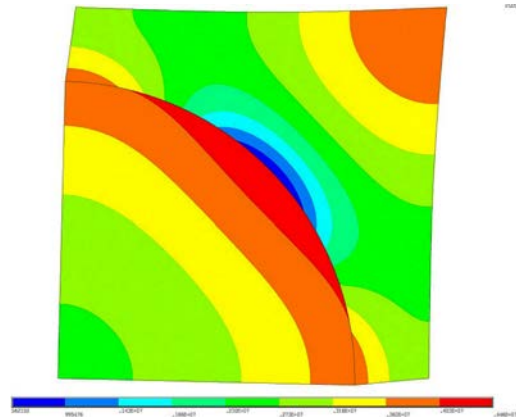


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень

Визначена в постпроцесорі величина (формула 20):

$$\langle \tau_{xy} \rangle = 0.31184 \cdot 10^7 \text{ Па} .$$

Компонента матриці жорсткості (формула 10):

$$b_{44} = 0.3118 \cdot 10^{10} \text{ Па} ;$$

Зсув у площині YZ (рис. 7).

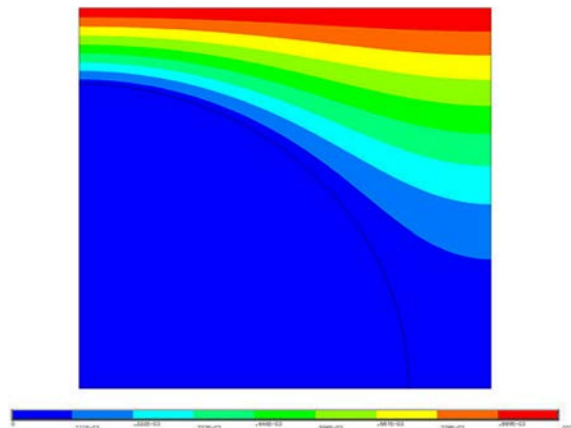


Рис. 7. Розподіл переміщень w

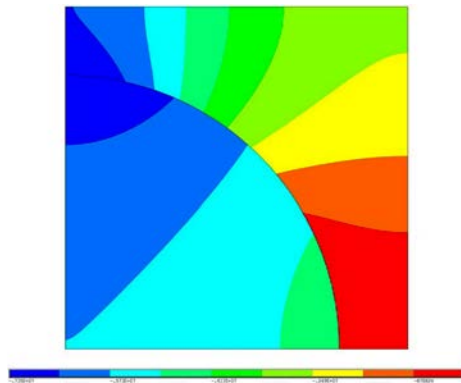


Рис. 8. Дотичні напруження τ_{yz}

Визначена в постпроцесорі величина (формула 22):

$$\langle \tau_{yz} \rangle = 0.42709 \cdot 10^7 \text{ Па} .$$

Компонента матриці жорсткості (формула 11):

$$b_{55} = 0.42709 \cdot 10^{10} \text{ Па} ;$$

Отже, матриця жорсткості має вигляд:

$$B = 10^{10} \cdot \begin{bmatrix} 2.1098 & 0.9143 & 0.8769 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9143 & 2.1098 & 0.8769 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8769 & 0.8769 & 13.2802 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3118 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4271 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4271 \end{bmatrix}$$

Матриця податливості:

$$A = 10^{-10} \cdot \begin{bmatrix} 0.5902 & -0.2463 & -0.0227 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2463 & 0.5902 & -0.0227 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0227 & -0.0227 & 0.0783 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.2072 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3414 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3414 \end{bmatrix}$$

Ефективні пружні характеристики композиційного матеріалу наведені в таблиці 1.

Визначені ефективні модулі еквівалентного гомогенного матеріалу знаходяться в інтервалі між значеннями, визначеними за методом Реуса та Фойгта, а ефективний модуль E_z співпадає зі значенням, одержаним за Фойгтом.

Висновки. Робота присвячена розробці чисельної методики визначення ефективних пружних характеристик односпрямовано армованих волокнистих композиційних матеріалів. Дослідження здійснене методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Виконано математичне моделювання представницького елемента об'єму та чисельне визначення ефективних пружних характеристик вуглецевого ПКМ за допомогою проведення серії чисельних експериментів.

Запропонована методика потребує подальшого розвитку для можливості розрахунків ефективних пружних характеристик тривимірно армованих композиційних матеріалів.

Таблиця 1

Ефективні пружні постійні односпрямованого композиційного матеріалу

Модуль пружності, МПа			Коефіцієнт Пуассона			Модуль зсуву, МПа		
E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{zx}	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}
16945	16945	127717	0.4173	0.0340	0.0900	3118.4	4270.9	4270.9

Список літератури:

1. Карпинос Д.М. Композиционные материалы. Справочник / Д.М. Карпинос. Киев : Наукова думка, 1985. 592 с.
2. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1984. 336 с.
3. Voight W. Lehrbuch der Kristallphysik. Berlin: Teubner, 1928. 962 p.
4. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Zs. Angew. Math. und Mech.*, Vol. 9, №. 1, 1929. pp. 49–58.
5. Harris B. Engineering Composite Materials. London : The Institute of Materials, 1999. 194 p.
6. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials. *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 11, 1963. pp. 127–140.
7. Hashin Z. On some variational principles in Anisotropic and Nonhomogeneous Elasticity. *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 10, 1962. pp. 835–842.
8. Hill R. The Elastic Behavior of a Crystalline Aggregate. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. A65, Pt 5, n 389 A, 1952, pp. 349–354.
9. Hill R. Self-Consistent Mechanics of Composite Materials. *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 13, 1965. pp. 213–222.

10. Бахина Е.В. Выбор аналитических методик для определения механических характеристик однонаправленных композиционных материалов на основе стекловолокон. *ISSN 0556-171X. Проблемы прочности*. 2014. № 1.
11. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. Москва : Машиностроение, 1980. 375 с.
12. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А., Соппротивление жестких полимерных материалов. Изд. 2, «Зинатне», Рига, 1972.
13. Robert M. Jones, *Mechanics of composite materials / 2nd ed.*, 1999.
14. Dvorak G.J. *Micromechanics of Composite Material, Solid Mechanics and Its Applications* 186, DOI 10.1007/978-94-007-4101-0, Springer Science + Business Media B.V. 2013.
15. Механика композиционных материалов / ред. Дж. Сендецки, Т 2, Москва, «Мир»., 1978.
16. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва : Высшая школа, 1967, 625 с.
17. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов ANSYS и САЕ-проектирование. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 149 с.
18. Szabo V. Unidirectional fiber-reinforced composite laminae: Homogenization and localization. *Computers and Mathematics with Applications* (2015). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2015.02.015>.
19. Huang Z.M. Simulation of the mechanical properties of fibrous composites by the bridging micromechanics model. *Composites: Part A* 32, 2001, pp. 143–172
20. Meguid S.A. et al. On the local elastic–plastic behaviour of the interface in titanium/silicon carbide composites. *Composites: Part A* 33, 2002, pp. 1629–1640
21. A.B. Tran et al. A simple computational homogenization method for structures made of linear heterogeneous viscoelastic materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 200, 2011, pp. 2956–2970.

Morozov A.V. DETERMINATION OF EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITE MATERIAL

The fundamental goal of the Mechanics of composite materials is to calculate effective elastic characteristics on the basis of known elastic characteristics of structural components, i.e. to consider a composite material at the micro level with subsequent transition to the macro level. At present, the most appropriate approach in determining the effective elastic characteristics of composite materials is the use of theoretical verification methods as this approach provides for the analysis of stresses and strains in the micro volumes of a composite material. Theoretical methods allow to predict the material behavior for required load cases and boundary conditions, which enables to optimize and rationally design the structure of constructions made of a composite material in the calculation stage. The development of theoretical methods for determining effective elastic characteristics of the composite material is an economically justified scientific and technical problem, the solution of which will reduce the time of creation of parts made of composite materials with the required characteristics of strength and elasticity.

The paper is devoted to the actual problem of determining effective elastic characteristics of unidirectional fiber composite materials. This paper offers a method to perform a series of numerical experiments are necessary to fully define the effective elastic characteristics of the unidirectional composite material. The paper also defines the boundary conditions required to simulate the necessary numerical experiments. With the help of the ANSYS software package, the mathematical modeling and numerical analysis of a representative volume element of unidirectional carbon fiber composite material is performed and defines the effective elastic characteristics of equivalent homogeneous material defined.

The developed numerical method allows to solve the problems of the mechanics of composite materials with the help of modern software systems, in which mathematical framework the finite element method is used.

Key words: *composite materials, effective elastic characteristics, numerical homogenization, representative volume element, numerical analysis.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391.052

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/08>

Сотніченко Ю.О.

Київський коледж зв'язку

МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ НА ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ СПОРУДАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У роботі розглянуто новий метод захисту інформаційних потоків, що передаються лініями оптичного зв'язку. В основі його лежить формування спеціальних лінійних кодів з підвищеною кількістю одиниць, яка може бути значно збільшена порівняно з кількістю одиниць основного коду на вході в лінію. При цьому для формування лінійних кодів та зворотної операції використовуються винятково пасивні оптичні елементи, а саме: волоконні розгалужувачі та лінії затримки на певну частину тактового інтервалу. Використання спеціального лінійного коду значно підвищує захищеність інформації при несанкціонованому доступі до лінійних споруд. Проте під час використання постійного типу коду виникає небезпека його перехоплення під час несанкціонованого доступу та подальшого аналізу з розробленням відповідних заходів протидії. З огляду на це в роботі передбачено регулярну зміну лінійних кодів за псевдовипадковим законом під час використання таких активних пристроїв, як оптичні комутатори, які відрізняються практично нехтовно малим часом переключення, і за рахунок цього можуть бути застосовані при усіх можливих, в тому числі і найвищих швидкостях передавання. Запропоновано відповідну побудову лінійного оптичного тракту для переключення двох типів кодів з визначенням місць підключення пасивного та активного обладнання. Як базові коди для подальшого формування лінійних кодів запропоновано використання оптичних кодів з поверненням до нуля. З метою подальшого рівня захищеності в роботі пропонуються динамічні переключення трьох типів сформованих лінійних кодів. Застосування запропонованого методу з високою швидкістю переключення ряду типів кодових комбінацій значно підвищує захищеність такої критичної інфраструктури, як оптична мережа зв'язку, від несанкціонованого доступу до інформації на рівні лінійних споруд.

Використання пасивних та активних елементів дозволяє створити ефективні принципи динамічного захисту інформації на лінійних спорудах оптичних мереж зв'язку. Ці принципи поєднують як формування ряду типів захищених лінійних кодів, так і регулярне швидке переключення їх у випадкові моменти часу. Це значно підвищує рівень захисту.

Додатковою перевагою є можливість виконання пасивних та активних оптичних елементів в інтегрально-оптичному виді.

Ключові слова: оптичне волокно, несанкціонований доступ, захист інформації, оптичний розгалужувач, оптичний комутатор.

Постановка проблеми. На цей час обсяг конфіденційної інформації, що передається оптичними мережами зв'язку, постійно зростає. Це ставить виклик щодо захисту такої критичної інфраструктури, як мережі зв'язку, від несанкціонованого доступу, зокрема, на рівні лінійних споруд, які здебільшого розташовані за межами приміщень.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження застосування методу динамічного захисту інформації на оптичних лінійних спорудах критичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження. Волоконно-оптичні лінії зв'язку, через особли-

вості розповсюдження електромагнітної енергії в оптичному волокні, мають підвищену захищеність від доступу до інформації, що передається лінійним трактом [1, с. 39]. Проте існують ситуації, за яких процес зняття інформації стає можливим, і це призводить до необхідності розробки заходів для протидії таким спробам.

Захисна оболонка, броньовий покрив й інші елементи конструкції оптичного кабелю (ОК) настільки сильно послаблюють можливе випромінювання поза волоконним світловодом (ВС), що воно практично не проникає за межі оболонки. Отже, перехоплення інформації може бути лише

внаслідок порушення цілісності зовнішньої оболонки та інших захисних покривів кабелю з метою безпосереднього доступу апаратури перехоплення до оптичних волокон (ОВ). Але навіть у цій ситуації без додаткових дій над волокном перехоплення оптичного сигналу є неможливим, оскільки випромінювання за межі ОВ практично відсутнє.

Для забезпечення випромінювання за межі ВС у цій ситуації формується вигин ОВ. У місці такого вигину порушується закон повного внутрішнього відбиття і спостерігається випромінювання енергії світлового сигналу за межі ВС [2, с. 18]. Через це в точці перехоплення інформації волокно характеризується підвищеним рівнем втрат [3, с. 12], що можна визначити методом оптичної рефлектометрії [4, с. 17] або за рахунок збільшення коефіцієнта помилок у лінії [3, с. 13]. При цьому від моменту зняття інформації до моменту виявлення несанкціонованого підключення минає деякий час, який залежить від принципів організації моніторингу лінії та апаратури, застосованої для контролю. Якщо для зняття інформації використовується спеціалізована високочутлива апаратура, то випромінювання на вигині ВС, необхідне для її функціонування, може бути доволі незначним. У цьому разі за допомогою апаратури контролю лінії нелегко встановити сам факт та визначити місце підключення. Існує метод визначення моменту та місця порушення броньових покривів кабелю у процесі несанкціонованого підключення до лінії [5, с. 33], але він дозволяє проводити контроль на порівняно невеликих відстанях від пункту контролю. Існує метод визначення моменту несанкціонованого доступу до оптичних лінійних муфт на всій довжині регенераційної дільниці [6, с. 84]. Він дозволяє точно визначити розміщення муфти та сам момент доступу, але при цьому лінійні споруди між муфтами залишаються непідконтрольними. Таким чином, для запобігання несанкціонованому доступу до потоків інформації на оптичних лініях необхідно, поряд з методами визначення наявності доступу, застосувати додаткові методи, які унеможливають адекватну інтерпретацію інформації до моменту визначення факту доступу та його ліквідації. З цією метою в роботах [7, с. 92; 8, с. 74; 9, с. 144] запропоновано застосування постійного додаткового кодування (маскування) оптичних лінійних кодів типу RZ за допомогою пасивних оптичних пристроїв.

Формування лінійних кодів за допомогою пасивних елементів

На цей час на оптичних мережах зв'язку має місце використання лінійного коду типу RZ

(з поверненням до нуля) [10, с. 22; 13, с. 81]. Основна відмінність цього коду полягає в тому, що величина сигналу, яка відповідає передачі одиничного символу, повертається до нульового значення до закінчення тактового інтервалу. При цьому тип коду з поверненням до нуля на половині тактового інтервалу T позначається, як RZ-0,50, а на чверті тактового інтервалу позначається як RZ-0,25. Тип коду, тривалість одиничного символу якого становить повний тактовий інтервал T , позначається як NRZ (без повернення до нуля).

Як показують дослідження, під час використання оптичною системою передавання лінійного коду RZ-0,25 існує можливість, використовуючи виключно такі пасивні оптичні елементи, як оптичні лінії затримки та оптичні розгалужувачі, провести додаткове кодування (маскування) сигналу на вході в лінію з метою захисту інформації, що передається по лінійному тракту [7, с. 92].

На рис. 1 наведено метод маскування оптичного сигналу з метою захисту його від несанкціонованого доступу до лінійного тракту та подальшого його декодування на приймальному кінці. На рис. 2 показано побудову лінійного тракту, що використовує цей принцип. Як видно з рисунку, вихідний сигнал системи передавання, який водночас є вхідним сигналом для лінійного тракту, на базі коду RZ-0,25, позначений як $I_{\text{вх}}$, подається на оптичний розгалужувач (РО). Оптичний розгалужувач працює як дільник оптичної потужності навіпіл. Після чого на входи другого дільника, що працює в режимі суматора, подається та частина сигналу, що пройшла через оптичну лінію затримки (ОЛЗ) з часом затримки $T/2$ ($I_{\text{вх}(T/2)}$), та незатримана частина сигналу. В результаті цього на виході другого дільника формуються кодові комбінації, що відрізняються від вихідних подвійною кількістю одиниць (I_2), які і передаються лінійним трактом. На виході лінійного тракту включено дільник оптичної потужності навіпіл. При цьому на другий дільник, що працює в режимі суматора, подається незатримана частина сигналу, та частина сигналу, що пройшла через лінію затримки (ОЛЗ) з часом затримки $T/4$ ($I_{\text{вх}(T/4)}$). Після складання цих частин формується оптичний сигнал, відповідний початковому, тільки в коді NRZ ($I_{\Sigma\text{вхNRZ}}$).

Подвійна кількість одиниць в оптичному лінійному тракту під час передавання робить неможливим адекватне відновлення сигналу при спробах несанкціонованого доступу до інформації. Таким чином, забезпечується захист інформації, що передається.

Запропонований метод можна розвинути, удосконалити і поширити його на інші види коду RZ. Так, наприклад, на рис.3 зображено метод маскування лінійних кодових комбінацій оптичного сигналу з метою захисту його від несанкціонованого доступу до лінійного тракту та подальшого його декодування на приймальному кінці при використанні оптичного коду RZ-0,125 [7, с. 92; 8, с. 74; 9, с. 144]. На рис.4 показано побудову лінійного тракту, що використовує цей принцип. Побудова лінійного тракту в цьому разі містить на одну ступінь оптичної затримки більше, ніж у попередньому випадку.

Оптичний сигнал, що використовує код RZ-0,125, подається на дільник PO_1 та лінію затримки ОЛЗ₁ на чверть тактового інтервалу ($T/4$). Після чого складові частини сигналу складаються, і на виході оптичного розгалужувача в режимі суматора (PO_2) утворюється кодовий сигнал з подвійною кількістю одиниць ($I_{\Sigma 1}$). Цей сигнал подається на розгалужувач PO_3 . Одна зі складових частин після виходу з дільника проходить через оптичну лінію затримки ОЛЗ₂ (час затримки $T/2$) та складається з незатриманою частиною у суматорі PO_4 . Кількість одиниць після такого процесу формування в лінійній кодовій комбінації

буде в чотири рази більше, ніж у вихідній. Сформований та захищений сигнал $I_{\Sigma 2}$ з виходу PO_4 подається у лінійний тракт. На виході з лінійного тракту сигнал подається на оптичний розгалужувач PO_5 , який розділяє його на дві складові частини.

Одна з цих частин проходить через оптичну лінію затримки ОЛЗ₃ (час затримки $T/8$) і складається з незатриманою частиною кодової комбінації у оптичному суматорі PO_6 . При цьому на виході PO_6 утворюється оптичний сигнал з кодовими комбінаціями, що адекватні початковим кодовим комбінаціям, тільки в коді NRZ ($I_{\Sigma \text{вихNRZ}}$).

Цей метод можна узагальнити для коду RZ- $(1/2^{n+1})$, де n – ціле додатне число. Випадки, коли $n = 1$, та $n = 2$, були розглянуті вище. Побудова лінійного тракту з ростом числа n буде зводитись на приймальному кінці до підключення певної кількості ланок, що виконують розділення сигналу навпіл, затримку одного зі складників на відповідну частину тактового інтервалу та подальше їх складання. На приймальному кінці функцію переводу лінійного коду в код NRZ буде виконувати така ж ланка з використанням оптичної лінії затримки на час $T/2^{n+1}$. Кількість одиниць у кодових комбінаціях оптичного лінійного тракту буде в 2^n раз більше, ніж у початкових комбінаціях.

Використання досить недорогих пасивних оптичних елементів для маскування оптичних лінійних кодів значно підвищує надійність процесу захисту інформації, порівняно з використанням активного обладнання.

Динамічний захист інформації на оптичних мережах

Враховуючи той факт, що системи несанкціонованого доступу можуть бути адаптовані до певного фіксованого варіанту лінійних кодів, у роботі запропоновано динамічну систему перемикавання варіантів лінійних кодів за псевдовипадковим законом.

Блок-схема такого пристрою наведена на рис. 5. В цьому разі використано дві системи формування лінійних кодових комбінацій, що перемикаються за псевдовипадковим законом. З цією метою в роботі пропонується використовувати дві системи формування лінійних кодів на базі вхідних кодів (наприклад, RZ-0,25, RZ-0,125), як це

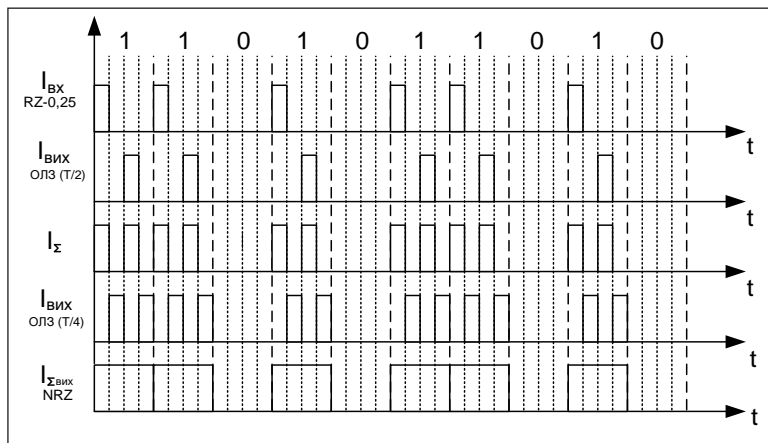


Рис. 1. Метод формування лінійного коду для оптичного сигналу в коді RZ-0,25 при передачі його по лінійному тракту та відновлення вихідного сигналу в коді NRZ

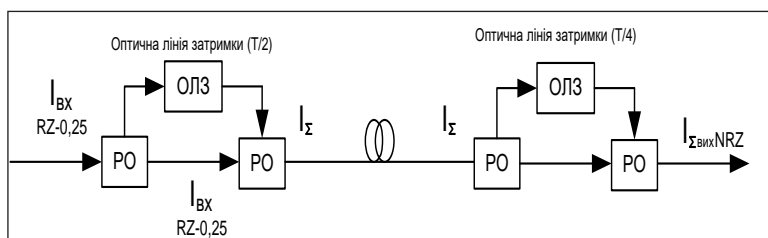


Рис. 2. Побудова лінійного тракту, що використовує лінійне кодування та декодування оптичного сигналу в коді RZ-0,25 за допомогою пасивних елементів

показано на рис. 5. В цьому разі на передавальному кінці в систему формування лінійних кодів (ФЛК) надходять сигнали системи передавання в кодах RZ-0,25 та RZ-0,125 відповідно. В лінійний тракт надходять сигнали у вибраному коді згідно з сигналами з генератору псевдовипадкових часових інтервалів (ГПВЧІ). Сигнал з виходів 1,2 генератору подається на вхід оптичних комутаторів K_1 та K_2 , що працюють у ключовому у режимі. Вихідний сигнал ГПВЧІ з виходу 3 подається в систему передавання для формування пілот-сигналу у разі зміни лінійного коду. Враховуючи той факт, що сигнали на виходах 1,2 генератора повинні бути взаємно інвертовані, на вхід лише одного з формувачів лінійного коду (ФЛК $_1$ або ФЛК $_2$) подається відповідний сигнал. Після формування лінійної кодової комбінації вона надходить до розгалужувача оптичного РО $_1$, що працює в режимі об'єднання сигналів, і далі спрямовується в оптичний лінійний тракт. На приймальному кінці лінійна кодова комбінація надходить у розгалужувач оптичний РО $_2$ та на входи оптичних комутаторів K_3 та K_4 , що працюють у ключовому у режимі. На керуючі входи комутаторів при цьому надходить сигнал з керуючого пристрою (КП), що формується на приймальному кінці після надходження пілот сигналу з передавального кінця. Сигнал з КП забезпечує проходження лінійного сигналу на відповідний формувач коду NRZ (ФКNRZ $_{1,2}$) та подальше подання коду в форматі NRZ через розгалужувач оптичний РО $_3$, що працює в режимі об'єднання сигналів, на вхід оптичного приймача. Таким чином, здійснюється захист інформаційних потоків від несанкціонованого доступу на рівні лінійних споруд оптичного зв'язку. За необхідності підвищення рівня захисту можна додатково до вхідних кодів RZ-0,25 та RZ-0,125 використовувати код RZ-0,0625 та відповідний формувач лінійних кодів. При цьому побудова захисту ускладнюється за рахунок появи додаткових елементів. Швидкодія переключення варіантів лінійних кодів визначається часом переключення оптичних комутаторів, серед яких слід відзначити комутатори на основі інтерферометра Маха-Цендера (ІМЦ) та електрооптичні комутатори (ЕОК) [11, с. 277; 12, с. 169].

Електрооптичні комутатори також використовують спрямовані розгалужувачі для формування світлового потоку на одному з вихідних портів. Але це робиться за рахунок зміни коефіцієнту зв'язку між оптичними хвилеводами. Зміна зв'язку здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заломлення матеріалу розгалужувача в зоні оптичного зв'язку.

На рис. 7 представлена схема оптичного комутатора на основі спрямованого розгалужувача X – типу.

Світловоди 1 та 2 на ділянках MN та DF виконані з електрооптичного матеріалу. З зовнішніх сторін між світловодами наявні прозорі електроди. За рахунок прикладеної напруги можна змінювати показники заломлення світловодів, змінюючи коефіцієнт спрямованості розгалужу-

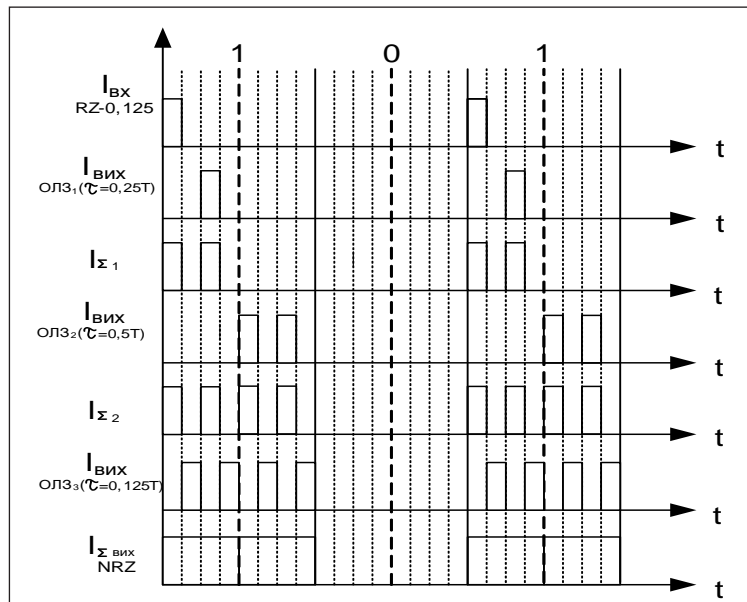


Рис. 3. Метод формування лінійного коду для оптичного сигналу в коді RZ-0,125 під час передачі його по лінійному тракті та відновлення вихідного сигналу в коді NRZ

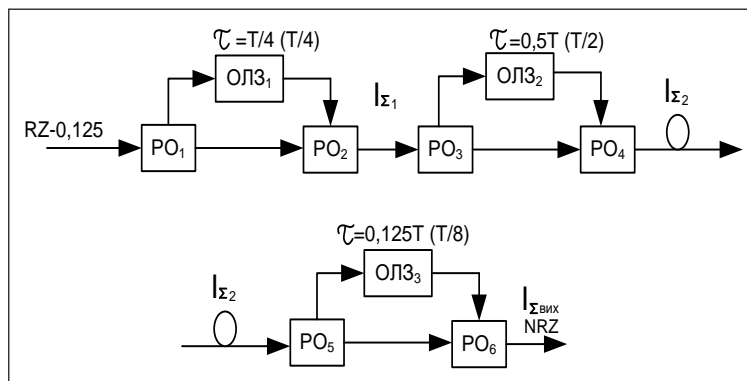


Рис. 4. Побудова лінійного тракту, що використовує лінійне кодування та декодування оптичного сигналу в коді RZ-0,125 за допомогою пасивних елементів

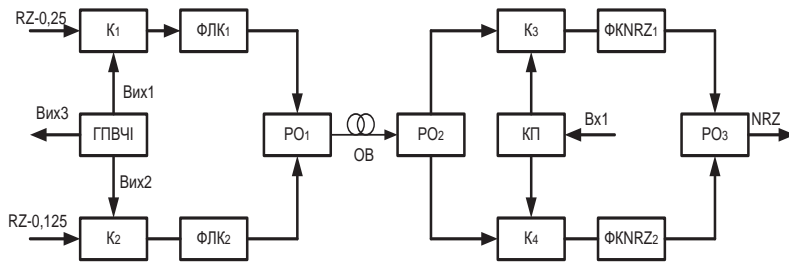


Рис. 5. Побудова лінійного тракту, що використовує динамічний захист інформації

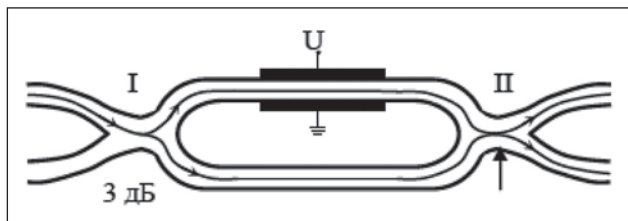


Рис. 6. Комутатор на основі інтерферометра Маха - Цендера

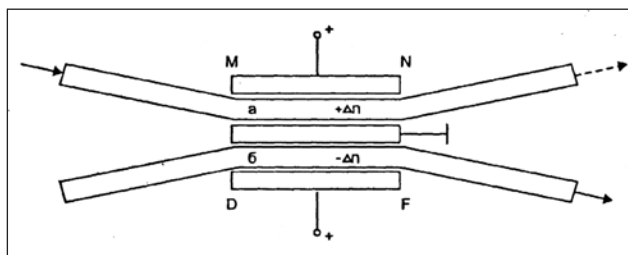


Рис. 7. Комутатор на основі спрямованого розгалужувача X – типу

Комутатор на основі ІМЦ побудований на базі двох послідовно об'єднаних оптичних розгалужувачів (коефіцієнт відгалуження 3 дБ), які пов'язані між собою двома оптичними хвильоводами різної оптичної довжини для створення на виході II різниці фаз шляхом зміни напруги U, що подається на одне з плечей інтерферометра рис. 6.

Враховуючи той факт, що оптичний хвильовод, до якого прикладене електричне поле, виконаний з електрооптичного матеріалу, наприклад, з ніобату літія (LiNbO_3), його показник заломлення змінюється зі зміною напруги. При цьому змінюється різниця фаз між сигналами, що надходять до виходу II і відбувається перерозподіл потужностей сигналу між виходами інтерферометра таким чином, що він може бути спрямований повністю на один з двох виходів інтерферометра. При використанні лише одного виходу комутатор може працювати в ключовому режимі.

Електрооптичні комутатори мають велику перевагу, що проявляється у швидкодії, яка досягає величини порядку 10–100 пс [10, с. 327], а також у малих величинах керуючих напруг – 2,5–3 В. Перевагою електрооптичних комутаторів є також можливість інтегрально-оптичного виконання.

Таким чином, використання пасивних (розгалужувачі та лінії затримки) та активних елементів (комутаторів) дозволяє створити ефективні принципи динамічного захисту інформації на лінійних спорудах оптичних мереж зв'язку. Ці принципи поєднують як формування ряду типів захищених лінійних кодів, так і регулярне швидке переключення їх у випадкові моменти часу. Це значно підвищує рівень захисту, оскільки робить практично неможливим адекватне та своєчасне простежування та визначення конкретного типу у реальному часі.

Висновки. Запропонований у роботі новий метод динамічного захисту інформації на лінійних спорудах критичної інфраструктури, якими є мережі оптичного зв'язку, дозволяє підвищити захищеність оптичних мереж від несанкціонованого доступу. Головною перевагою методу є швидке переключення за псевдовипадковим законом ряду лінійних кодів, що сформовані за спеціальним алгоритмом за допомогою пасивних оптичних елементів. При цьому кількість одиниць у лінійних кодових комбінаціях може значно перевищувати кількість одиниць основного коду. Завдяки цьому адекватне сприйняття основного коду стає неможливим. Проте в разі постійного застосування певного типу лінійного коду є можливість, в результаті аналізу, прийняття заходів до його адекватного сприйняття. З метою недопущення такої ситуації в роботі запропоновано динамічний принцип захисту, що полягає в швидкому переключенні типів лінійних кодів за псевдовипадковим законом. Враховуючи високу швидкість переключення, або малий його час, та псевдовипадковий закон переключення в часі, адекватне сприйняття інформації стає практично неможливим.

Додатковою перевагою методу є можливість виконання усіх елементів, які він включає, в інтегрально-оптичному вигляді.

Список літератури:

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. Москва : Техносфера, 2003. 440 с.
2. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. Москва : ЛЕСАРарт, 2003. 288 с.
3. Яковлев А.В. Волоконно-оптическая система передачи конфиденциальной информации. *Электросвязь*. 1994. № 10. С. 11–13.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. Москва : ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.
5. Гордієнко С.С., Манько О.О., Гордієнко С.Б. Моніторинг лінійних споруд ВОЛЗ із метою захисту інформації від несанкціонованого доступу. *Зв'язок*. 2012. №1(97). С. 32–34.
6. Манько О.О. Захист лінійних споруд ВОЛЗ від несанкціонованого доступу з використанням металевих елементів оптичного кабелю. *Сучасний захист інформації*. 2012. № 3. С. 84–86.
7. Манько О.О. Використання маскування оптичних лінійних кодів для захисту інформації на ВОЛЗ. *Сучасний захист інформації, спеціальний випуск*. 2012. С. 90–92.
8. Manko O. Using Passive Optical Devices for the Protection of Information in the Optical Communication Lines. 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T'2016) October 4-6, 2016, Kharkiv, Ukraine, Conference Proceedings, P. 73–74.
9. Манько О., Шматок О., Петренко А. Використання пасивних оптичних пристроїв для захисту інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку та мережах. *Захист інформації*. Т. 19. №2, квітень – червень 2017, С. 143–147.
10. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е исправл. изд. Москва : Радио и связь, 2003. 468 с.
11. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. Москва : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. 262 с.
12. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2010. 272 с.
13. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. 2-е изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. Москва : ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. 576 с.

Sotnichenko Yu.O. METHOD OF DYNAMIC PROTECTION OF INFORMATION ON OPTICAL LINEAR STRUCTURES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

This paper describes a new method of protecting the information flows transmitted by optical links. It is based on the formation of special linear codes with an increased number of units, which can be significantly increased compared to the number of units of the main code at the entrance to the line. At the same time, only passive optical elements are used to form linear codes and reverse operations, namely: fiber splitters and delay lines for a certain part of the clock interval. Using a special linear code significantly increases the security of information in case of unauthorized access to linear structures. However, when using a constant type of code, there is a risk that it will be intercepted during unauthorized access and further analyzed to develop appropriate counter-measures. Taking into account this, regular change of linear codes by pseudorandom law is envisaged in the use of active devices such as optical switches, which differ in almost negligible switching time, and at the expense of which they can be applied at all possible including the highest transmission rates. An appropriate construction of a linear optical path is proposed for switching two types of codes with determining the connection points of passive and active equipment. The use of optical codes with a return to zero is proposed as the base codes for the further formation of linear codes. For the sake of further level of security in the work dynamic switches of three types of generated linear codes are offered. The application of the proposed method with a high rate of switching of several types of code combinations significantly increases the security of such critical infrastructure as the optical communication network from unauthorized access to information at the level of linear structures.

The use of passive and active elements allows you to create effective principles for the dynamic protection of information on linear structures of optical communications networks. These principles combine both the formation of a number of types of secure line codes and the regular rapid switching of them at random times. This greatly increases the level of protection.

An additional advantage is the ability to perform passive and active optical elements in integral-optical form.

Key words: optical fiber; unauthorized access, information security, optical splitter; optical switch.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.91:378.145

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/09>

Гайтан О.М.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ГЕНЕРАЦІЇ РОЗКЛАДУ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ УНІВЕРСИТЕТУ

У статті розглядається питання автоматизації генерації розкладу навчального процесу університету, досліджуються системи складання розкладу, виявлені їх функціональні особливості, проаналізовані переваги та недоліки. Описано у формалізованому вигляді постановку задачі побудови розкладу, виявлено та систематизовано основні жорсткі та м'які обмеження, що накладаються на створений розклад. Запропоновано гібридний підхід до комп'ютерної генерації розкладу навчального процесу, який ґрунтується на методах мурашиної колонії (Ant colony optimization) та генетичних алгоритмах (genetic algorithms). Поєднання цих методів дозволить зменшити час збіжності алгоритму та збільшити ймовірність знаходження глобального оптимуму.

Також представлено програмну систему складання розкладу навчального процесу вищого навчального закладу, яка на основі постійних довідників (дані про кафедри, спеціальності, навчальні групи, викладачів, навчальні корпуси, аудиторний фонд), які зберігаються в sql-базі даних, та оперативної семестрової інформації (навчальні плани, штатне навантаження викладачів, календарі доступності та пріоритети учасників навчального процесу), імпортованої з xml-довідників, забезпечує можливість ручного, автоматичного та автоматизованого складання розкладу навчального процесу в університеті з використанням розглянутого методу та технології drag&drop.

Передбачена можливість ручного корегування створеного розкладу та його експорт в xml і xlsx-файли. Використання цієї системи у вищих навчальних закладах дозволить полегшити та підвищити ефективність роботи диспетчерів, які займаються складанням розкладу, та якість навчального процесу за рахунок контролю відсутності конфліктів учасників навчального процесу та максимальному врахуванню побажань учасників навчального процесу при складанні розкладу.

Ключові слова: генетичний алгоритм, комбінаторна оптимізація, метаевристика, метод мурашиних колоній, розклад, таймслот.

Постановка проблеми. Генерація розкладу навчального процесу університету є важливим складником системи забезпечення навчального процесу, оскільки від якості складеного розкладу залежить комфорт учасників навчального процесу, його якість та ефективність. Незважаючи на широке використання інформаційних технологій, у багатьох вищих навчальних закладах розклад складається вручну, а комп'ютер використовується лише для візуалізації та розповсюдження складеного таким чином розкладу. Тому задача автоматичної генерації комп'ютерного розкладу навчального процесу в університеті є актуальною.

Проблема складання розкладу навчального процесу в університеті полягає в розподілі набору занять згідно навчальних планів в межах заданої

кількості аудиторій і періодів часу (пар). Основна відмінність розкладу в університеті від середньої школи полягає в тому, що університетські курси можуть мати спільних студентів, тоді як шкільні класи – це множини учнів, які не перетинаються. Якщо два заняття мають спільних студентів, вони не можуть бути заплановані на той самий період. Крім того, необхідно передбачити можливість поділу академічних груп на підгрупи та об'єднання лекційних занять у потоки.

В проблемі складання розкладу університету важливу роль відіграє наявність аудиторій (їх розмір, тип і обладнання, належність до відповідної кафедри), тоді як в середній школі цим нехтують, оскільки можна припустити, що кожен клас має свій кабінет, а окремі вимоги висуваються лише

до занять з іноземної мови, інформатики, хімії та фізкультури.

Основна мета статті полягає в розробленні гібридного методу автоматичної генерації розкладу навчального процесу та побудові програмної системи на її основі.

Об'єкт дослідження – методи та системи автоматичного складання розкладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі автоматизованої генерації розкладу навчального процесу протягом останніх десятиліть приділяється значна увага.

Публікації з цього питання можна поділити на декілька категорій:

– *Формалізація предметної області.*

В [1] розглянуто математичну постановку задачі складання розкладу занять у ВНЗ в умовах розбіжності вимог і побажань викладачів і студентів, введено поняття «віртуальних та узагальнених груп і підгруп», проаналізовано жорсткі і нежорсткі обмеження в задачі складання розкладу. Робота [2] присвячена стандартизації даних для складання розкладу в навчальних закладах. Автори описують формат представлення даних в частині опису навчального плану і розкладу занять на основі XML-технологій.

– *Аналіз існуючих та розробка нових алгоритмів та методів складання розкладу.*

В роботі [3] проведено огляд методів складання розкладу ВНЗ, проаналізовані їхні переваги та недоліки. Опис основних методів, які використовуються для розв'язання цієї задачі, також наведено в [4]. Для автоматичного складання широко використовуються як класичні методи (лінійне цілочисельне програмування, метод розфарбовування графу, метод імітаційного моделювання), так і метаевристичні методи.

Оскільки цю задачу можна віднести до класу NP-важких задач зі значною кількістю обмежень і складністю побудови математичної моделі, то

використання класичних методів обмежене. Тому натеper для розв'язання задачі складання розкладу ВНЗ дуже поширене застосування метаевристичних методів. Застосовують такі методи як імітацію відпалу, генетичні алгоритми, метод мурашиних колоній тощо.

Метаевристичні методи зазвичай мають дві важливі особливості:

– в результаті їх роботи послідовно будуються кілька розв'язків;

– побудова кожного нового рішення ґрунтується на накопичених знаннях про якість попередніх отриманих рішень.

Класифікація основних метаевристичних методів, які застосовуються при автоматичному складанні розкладів, наведена на Рис. 1.

Метаевристичні методи починають з одного або декількох початкових розв'язків і використовують стратегії пошуку, за допомогою яких намагаються уникнути локальних оптимумів. Ці алгоритми пошуку можуть забезпечувати високоякісні рішення, але часто мають значну обчислювальну вартість. Класичні методи здебільшого використовують ітераційну техніку неперервної оптимізації, тому можливе зациклення в локальному оптимумі. Для пошуку глобального оптимуму доцільно використовувати еволюційні алгоритми.

В роботі [4] розроблено алгоритм побудови розкладу для дистанційного навчання на основі генетичного алгоритму, реалізованого в якості підсистеми для системи дистанційного навчання «Віртуальний Університет». Генетичний алгоритм для побудови розкладу також розглядається в роботі [14] для побудови розкладу іспитів. При цьому особлива увага приділяється послідовності іспитів.

В роботі [5] запропоновано новий варіант алгоритму імітації відпалу, який називається FastSA, для автоматичної побудови розкладу іспитів у ВНЗ. В FastSA кожен іспит, обраний для плану-

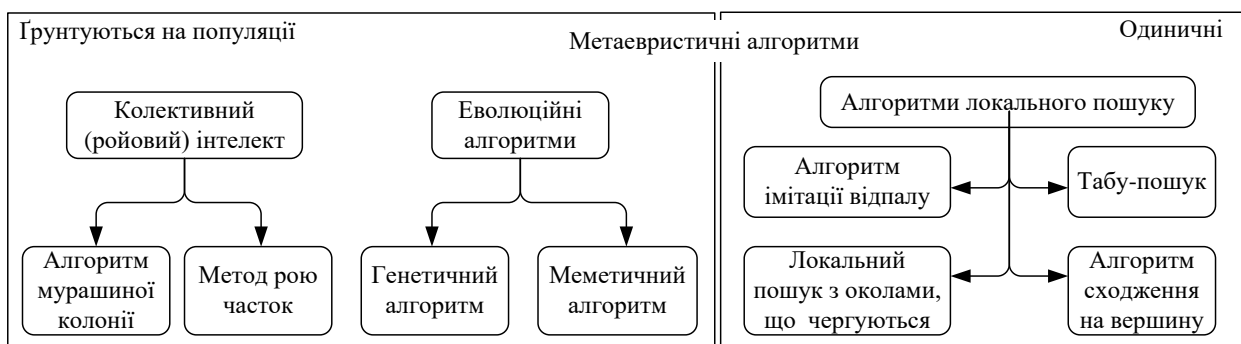


Рис. 1. Класифікація основних метаевристичних методів

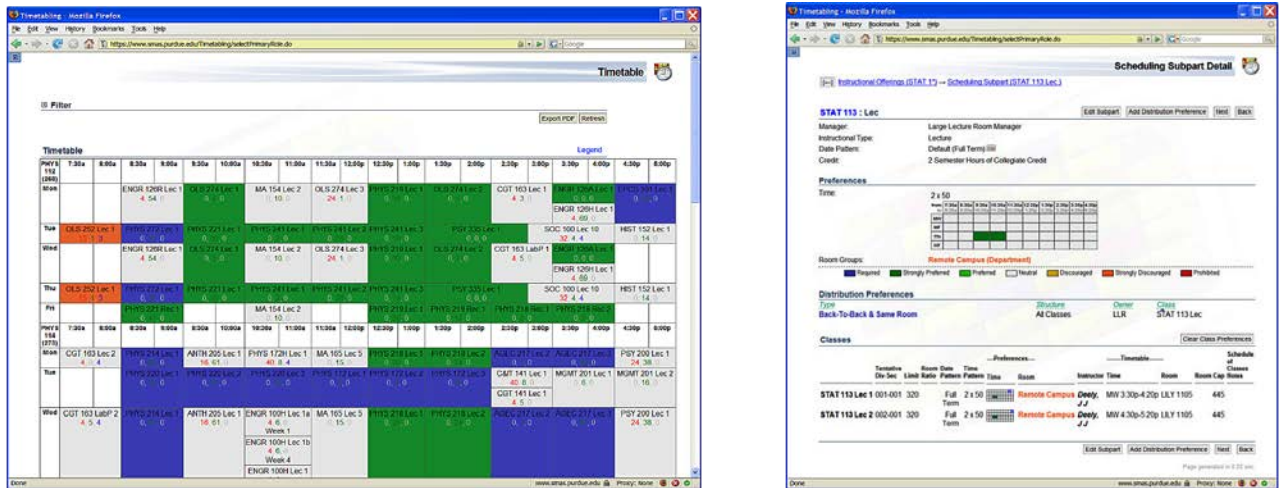


Рис. 2. Екранні форми системи UniTime

вання, переміщається (і такий рух оцінюється) лише в тому випадку, якщо цей іспит мав якісь прийняті рухи на попередньому відрізку температури. Сформовано 10 температурних діапазонів з рівною кількістю оцінювань в кожному з них. Емпірично було помічено, що якщо іспит мав нульові прийняті рухи в попередньому діапазоні температури, то, ймовірно, в майбутньому буде мало або не буде зовсім прийнятих рухів, оскільки він кристалізується. Отже, рух всіх іспитів, закріплених таким чином, більше не оцінюються, що забезпечує меншу кількість оцінювань порівняно зі стандартним алгоритмом імітації відпалу. Для побудови початкового рішення використовується евристика на основі ступеня насичення, поєднана зі статистикою на основі конфліктів, щоб уникнути зациклення.

В [6] розглядається побудова нейронної мережі для розв'язання цієї задачі:

– *Аналіз існуючих та розробка нових програмних засобів генерації комп'ютерного розкладу: технології, які використовуються, та їх програмна реалізація [7–11].*

1. Комплексна система складання університетського розкладу UniTime [7], розроблена зусиллями групи викладачів, студентів і співробітників університетів Північної Америки та Європи.

UniTime підтримує складання розкладів курсів та іспитів, управління змінами в цих розкладах, спільне використання аудиторій з іншими заходами і розподіл студентів за окремими курсами. Це розподілена система, яка дозволяє декільком відповідальним особам координувати зусилля зі створення і зміни розкладу, що відповідає їхнім організаційним потребам, мінімізуючи конфлікти в ході роботи.



Рис. 3. Структура системи UniTime

Систему можна використовувати окремо для створення і ведення розкладу занять і/або іспитів або для взаємодії з існуючою інформаційною системою ВНЗ. Дані для розкладу можуть вводитися безпосередньо в системі або імпортуватися із xml-файлів.

Алгоритм пошук в UniTime ґрунтується на ітеративному алгоритмі прямого пошуку (iterative forward search algorithm). Цей алгоритм схожий з локальними методами пошуку, але він працює з допустимими, але не обов'язково повними рішеннями. В цих рішеннях деякі заняття можуть залишатися не розміщеними. Однак всі жорсткі обмеження щодо призначених занять повинні виконуватися. Такі рішення простіші для візуалізації та більш значущі для користувачів, ніж повні, але нездійсненні рішення. Через ітеративний характер алгоритму останній може запускати, зупиняти або продовжувати обробляти будь-яке допустиме рішення – повне або неповне.

Це програмне забезпечення поширюється безкоштовно за ліцензією з відкритим вхідним кодом для забезпечення можливості використання іншими коледжами та університетами, а також для сторонніх дослідників, які захочуть внести вклад у поточні дослідження в цій області. Недоліком цієї системи є орієнтація на англомовні країни.

2. Система Галактика: Розклад навчальних занять [8, 9].

Система Галактика: Розклад навчальних занять призначена для автоматизації процесу складання розкладів навчальних занять в освітніх установах вищої та середньої професійної освіти. Система може використовуватися як самостійний додаток, так і в комплексі з іншими системами, наприклад із Галактикою ERP (Галактика Управління Вузом). Дані для розкладу можуть вводитися безпосередньо в системі або імпортуватися із зовнішніх систем у xml та excel-файлах.

«Галактика» автоматизує процес складання розкладу з огляду на множину обов'язкових, умовно обов'язкових і бажаних умов, зокрема облаштування аудиторій під окремі дисципліни, приналежність до одного або різних навчальних корпусів, завантаженість викладачів, формування зведених груп студентів. Важливим інструментом системи є можливість планування порядку вивчення академічних предметів. Ця опція включає графік вивчення дисциплін протягом тижня і технологічну карту з послідовністю їх проходження.

Система розкладу навчальних занять дозволяє паралельно вести кілька розкладів по різних корпусах, днях тижня, групах; контролювати зв'язок вільних аудиторій, зокрема спеціально обладнаних, із предметами, видами робіт, кафедрами, факультетами; налаштовувати пріоритети використання ресурсів; враховувати віддаленість корпусів, їх пріоритетність; підтримувати різні



Рис. 4. Структура системи системи Галактика: Розклад навчальних занять

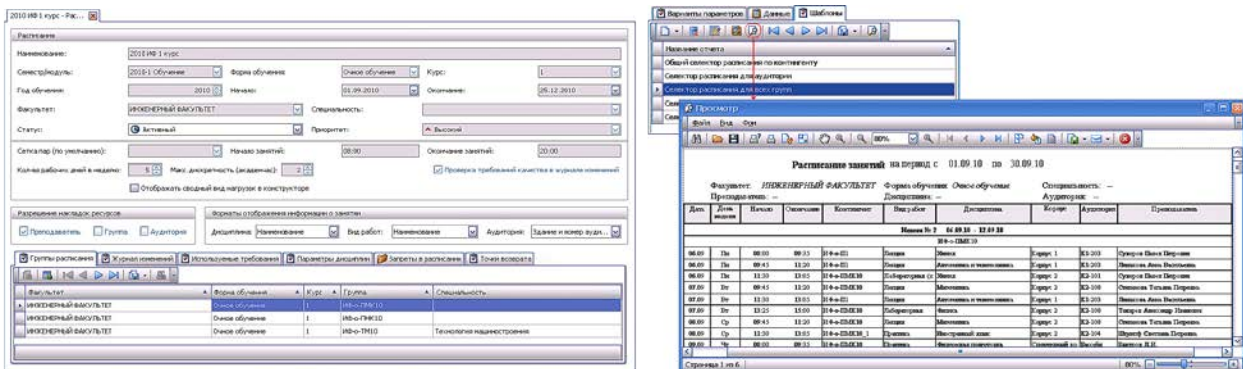


Рис. 5. Екранні форми системи Галактика: Розклад навчальних занять

групи студентів (потік, підгрупа, зведена група), контролювати їх переміщення при формуванні розкладу, щоб заняття не дублювалися і не перетиналися; використовувати чотири десятки показників ефективності розкладу.

На відміну від попереднього рішення, головна мета системи Галактика – системність рішень, спроба уникнути клаптикової автоматизації, коли для кожної критичної області, в тому числі і для складання розкладу, застосовується окрема система. Така система орієнтована на російськомовну аудиторію і використовується переважно в російських ВНЗ. Вартість ліцензії – індивідуальна для кожного ВНЗ.

3. Програма «1С: Автоматизированное составление расписания. Университет» [10].

Продукт призначений для автоматизованого складання розкладів, управління ними під час навчального процесу і оперативного управління приміщеннями. З його допомогою складати розклад можна в автоматичному, ручному і змішаному режимах, а також в режимах вибірки по приміщеннях, по групах, по викладачах з урахуванням обмежень і умов. При цьому можна побудувати як допустимий розклад, так і оптимізований, в якому зменшено кількість вікон або кількість використовуваних приміщень.

Система розкладу навчальних занять дозволяє ручну модифікацію розкладу перетягуванням drag&drop; складання кількох розкладів і вибір кращого; консолідацію розкладів і оптимізацію за одним з критеріїв; враховувати побажання і можливості викладачів, груп студентів, приміщень; перевіряти на допустимість при складанні розкладу (за показниками: тип приміщення / тип заняття, площа приміщення / кількість студентів у групі); обирати довільну періодичність розкладу; вести облік паралельних занять, розбиття на під-

групи і потоки лекцій; регулювати максимально допустиму кількість занять в день для групи студентів або викладача при складанні розкладу; вести облік змін; оперативно резервувати приміщення.

Для автоматичної генерації розкладу навчального процесу така програмна система використовує алгоритм розв'язання задачі, запропонований співробітниками лабораторії № 68 «Теорії розкладів і дискретної оптимізації» Інституту проблем управління ім. В.А. Трапезникова РАН. Система орієнтована на російськомовну аудиторію і використовується здебільшого в російських ВНЗ. Крім того, компанія-постачальник ERP-систем «1С» підпадає під дію економічних санкцій згідно Указу Президента України № 133/2017. Вартість ліцензії – 70 000 руб.

4. Програма «Ректор-ВУЗ» [11].

Розклад занять можна складати в автоматичному, ручному або змішаному режимах. При складанні розкладу в автоматичному режимі програма враховує всі сформульовані вимоги до розкладу. При складанні розкладу в ручному режимі програма підказує можливі варіанти розстановки занять обраного викладача, можливі варіанти заповнення порожніх клітин у розкладі групи, стежить за кількістю місць в аудиторіях. Розклад занять груп і викладачів можна зберегти у форматах Microsoft Word, Excel або HTML. Така система використовується здебільшого в російських ВНЗ, але має переклад на українську мову.

Серед розглянутих систем програма «Ректор-ВУЗ» має найменший функціонал, оскільки не забезпечує врахування паралельних занять, поділу на підгрупи при складанні розкладу, оперативного резервування приміщень, врахування побажань викладачів і студентських груп тощо. Вартість ліцензії – 12 000 руб. на рік (оренда на

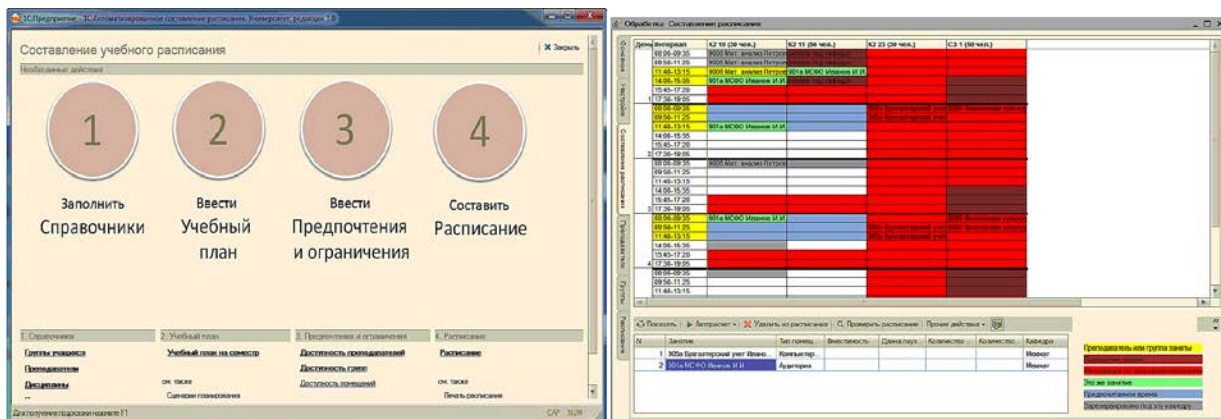


Рис. 6. Екранні форми системи

3 комп'ютери). Порівняльний аналіз функціональних можливостей систем «ІС: Автоматизоване складання розкладів. Університет», «Ректор-ВНЗ» та «Галактика» наведено у [16].

Постановка завдання. Задачу генерації розкладу навчального процесу у формалізованому вигляді можна представити таким чином:

У семестрі необхідно прочитати n навчальних дисциплін S_1, S_2, \dots, S_n : для кожного $i, i = \overline{1..n}$ дисципліна S_i складається з lec_i лекцій, $pract_i$ практичних занять і семінарів й lab_i лабораторних робіт. Заняття s проводиться визначеним викладачем pr_j . Є gr навчальних планів G_1, G_2, \dots, G_{gr} , що є набором навчальних дисциплін, які читають групі студентів G_{rk} . Це означає, що дисципліни в $G_{jk}, k = \overline{1..gr}$ повинні бути рознесені в часі. ts_max – кількість навчальних періодів (пар), r_max_k – максимальна кількість занять, яку можна запланувати в період t_k (кількість аудиторій, доступних у період t_k).

Необхідно розподілити заняття за всіма курсами в межах певної кількості аудиторій і періодів часу, тобто знайти таке $s_{jr}^{ijk} (i = \overline{1..d}, j = \overline{1..pr}, k = \overline{1..gr}, t = \overline{1..ts}, r = \overline{1..r_max})$, що

$$\forall i = \overline{1..d} \sum \{s_{jr}^{ijk} | j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} = lec_i + pract_i + lab_i$$

– розподіл всіх занять;

$$\forall t = \overline{1..ts_max} \sum \{s_{jr}^{ijk} | i \in D, j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} \leq r_max$$

– використання обмеженого аудиторного фонду;

$$\forall t = \overline{1..ts_max} \forall r = \overline{1..r_max} \sum \{s_{jr}^{ijk} | i \in D, j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts\} \leq 1$$

– запобігання накладкам по аудиторіях;

$$\forall t = \overline{1..ts_max} \forall k = \overline{1..gr} \sum \{s_{jr}^{ijk} | i \in D, i \in G_k, j \in Pr, t \in Ts, r \in R\} \leq 1$$

– запобігання накладкам по групах;

$$\forall t = \overline{1..ts_max} \forall j = \overline{1..pr} \sum \{s_{jr}^{ijk} | i \in D, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} \leq 1$$

– запобігання накладкам по викладачах;

$$\forall i = \overline{1..d} \forall k = \overline{1..ts} s_{ijk} \in \{0,1\}$$

$$s_{jr}^{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d_i \text{ призначено на пару } t, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

Загальна класифікація вимог до розкладу в університеті наведена на Рис. 7.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Методи, які використовуються.* Один із ефективних метаевристичних методів, які застосовують для розв'язання цієї задачі, – метод мурашиної колонії.

Метод мурашиної колонії – це ймовірнісна техніка розв'язання обчислювальних задач, яка може бути зведена до пошуку кращих шляхів за допомогою графів із використанням штучних мурах, які наслідують поведінку колонії природних мурах. Цей метод належить до класу ітеративних алгоритмів і ґрунтується на ідеї послідовного наближення до оптимального розв'язку [12].

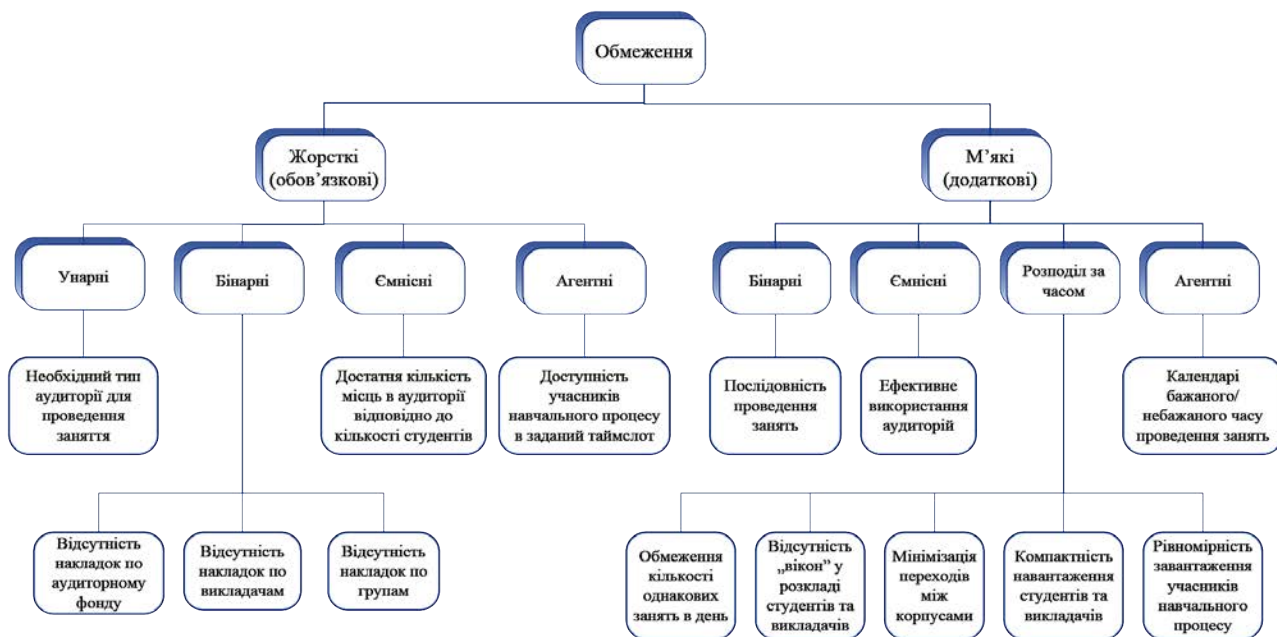


Рис. 7. Загальна класифікація обмежень до розкладу навчального процесу

Поеднаємо такий метод із генетичним алгоритмом. Використання генетичного алгоритму дозволяє зменшити час роботи алгоритму та збільшити ймовірність потрапляння в глобальний оптимум. Схема роботи алгоритму зображена на Рис. 8.

Робота системи. Основні користувачі системи автоматизованої генерації розкладу – посадові особи навчально-методичних підрозділів вищих навчальних закладів, відповідальні за формування розкладу. Для доступу до інформації, яка зберігається в системі, та для розмежування прав доступу до функціональності необхідно пройти авторизацію.

Робота програмної системи автоматизованого складання розкладу навчального процесу складається з таких етапів:

На початку роботи з системою необхідно ввести довідкову інформацію, яка необхідна при створенні розкладу. Існує два типи довідників: постійна інформація, яка може потребувати незначного редагування, та оперативна семестрова інформація. Постійні дані в системі зберігаються в sql-базі даних, доступ до якої реалізується за допомогою sql-запитів. Схема бази даних системи наведена на Рис. 10.

Створення та редагування постійних довідників може здійснюватися вручну або за допомогою функції імпорту з зовнішніх xml-файлів. Оперативна семестрова інформація завантажуюється лише за допомогою імпорту з зовнішніх xml-файлів. Можливі такі опції імпорту: імпорт – в цьому випадку відбувається видалення і повторне створення довідника з додаванням імпортованих даних; імпорт з оновленням – відбувається оновлення вже наявних і додавання відсутніх у довідниках даних;

Складання розкладу відбувається в автоматичному, ручному або змішаному режимах. При ручному режимі складання розкладу вибирається відповідне заняття із дерева занять і методом Drag&Drop переноситься в сітку розкладу. При цьому система підсвічує доступні та заборонені таймслоти. Розмістити конфліктуючі заняття в один час або одній аудиторії не можливо. Червоним кольором виділяються заборонені таймслоти, зеленим – такі самі заняття, вже розміщені в сітці розкладу, сірим – не рекомендовані, блакитним – рекомендовані варіанти. Рекомендовані та не рекомендовані варіанти розміщення визначаються типом занять, календарями завантаження учасників навчального процесу та даними про заняття, які містяться в імпортованих файлах.

Автоматична генерація виконується відповідно до розглянутого вище методу.

Висновки. В роботі розглядається побудова програмної системи для автоматизації складання розкладу навчального процесу в університеті. Використання цієї системи в університеті дозволить полегшити та підвищити ефективність роботи диспетчерів, які займаються складанням розкладу, та якість навчального процесу за рахунок контролю відсутності конфліктів учасників навчального процесу та максимального врахування побажань учасників навчального процесу при складанні розкладу.

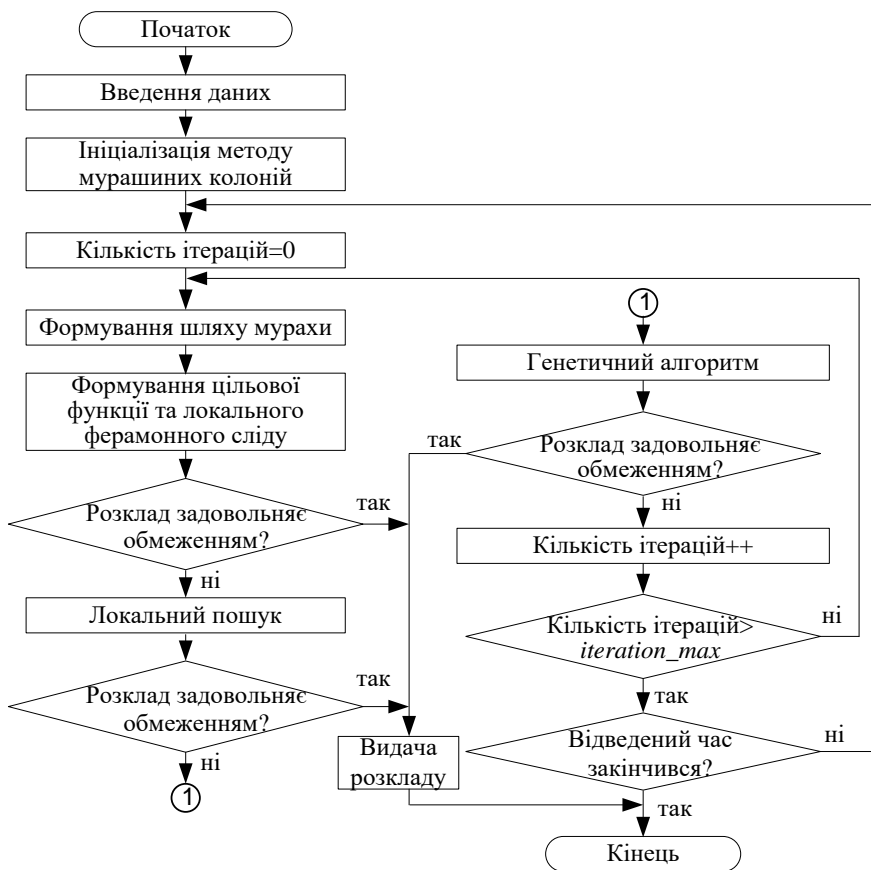


Рис. 8. Схема роботи алгоритму



Рис. 9. Загальна схема автоматизованого складання розкладу навчального процесу

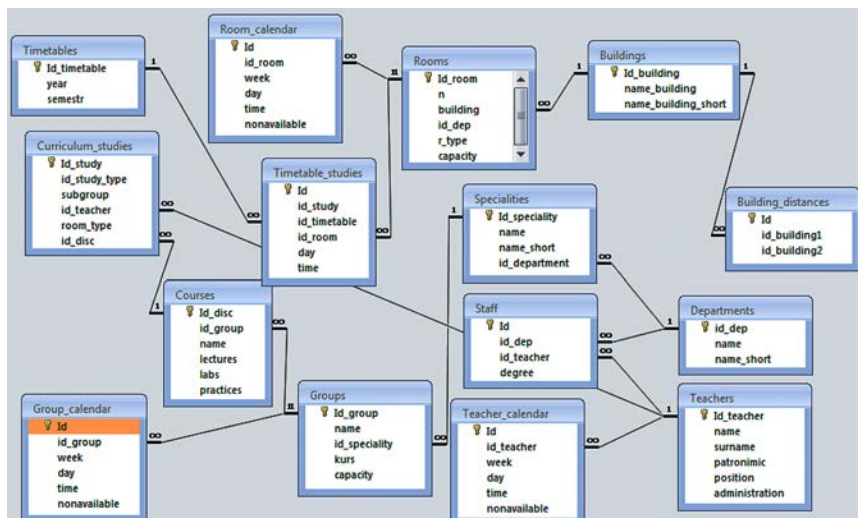


Рис. 10. Схема бази даних

а)

б)

Дінь	Час	101-ПН	102-ПН
Понеділок			
2	08:30 - 09:50	Дискретна математика, Ляб.	Дискретна П.Д., 302л
3	10:00 - 11:20	Висхідна математика, Ляб., Вулиця І.К., 301л	Висхідна І.К., 301л
4	11:30 - 13:10	Дискретна математика, Ляб., Діагональ П.Д., 302л	
5	13:20 - 14:40		
6	14:50 - 16:10		
7	16:20 - 17:40		
Вівторок			
8	08:30 - 09:50	Дискретна математика, Ляб., Діагональ П.Д., 302л	Висхідна математика, Ляб., Вулиця І.К.(2), 102л
9	10:00 - 11:20	Фізика, Ляб., Вулиця А.Р., 100л	Фізика, Ляб., Вулиця А.Р., 100л
10	11:30 - 13:10	Програмування, Ляб., Глинка Р.В., 101л	Семінар Д.К.(2), 102л
11	13:20 - 14:40		
12	14:50 - 16:10		
13	16:20 - 17:40		
Середа			
14	08:30 - 09:50		Програмування, Ляб., Глинка Р.В., 101л
15	10:00 - 11:20	Висхідна математика, Ляб., Вулиця І.К., 301л	Висхідна математика, Ляб., Вулиця І.К., 301л
16	11:30 - 13:10		Фізика(група)
17	13:20 - 14:40		
18	14:50 - 16:10		
19	16:20 - 17:40		
Четвер			
20	08:30 - 09:50	Дискретна математика, Ляб., Діагональ П.Д., 302л	Фізика, Ляб., Радик М.Б., 410л
21	10:00 - 11:20	Висхідна І.К.(1), 101л; Висхідна математика, Ляб., Семінар Д.К.(2), 102л	Дискретна математика, Ляб., Діагональ П.Д., 302л
22	11:30 - 13:10		
23	13:20 - 14:40		
24	14:50 - 16:10		
25	16:20 - 17:40		
П'ятниця			
26	08:30 - 09:50	Фізика, Ляб., Радик М.Б., 410л	Дискретна математика, Ляб., Діагональ П.Д., 302л
27	10:00 - 11:20	Програмування, Ляб., Глинка Р.В., 100л	Програмування, Ляб., Глинка Р.В., 100л

в)

Рис. 11. Екранні форми системи: а) редагування даних про аудиторії; б) генерація розкладу в ручному режимі; в) результат автоматичної генерації розкладу

Список літератури:

1. Бурнасов П.В. Математическая постановка задачи составления расписания занятий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 4(87). С. 12–18.
2. Бульонков М.А., Емельянов П.Г., Пак Е.В. К стандартизации данных для составления расписания в учебных заведениях. *Открытое образование*. 2010. № 3. С. 45–57.
3. Дворянкин А.М., Чалышев В.С. Обзор методов составления расписания вузов. *Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»*, 2011. Вып. 11. № 9. С. 110–113.
4. Томашевський В.М., Новіков Ю.Л., Камінська П.А. Складання розкладів занять у дистанційних системах навчання. *Вісник НТУУ КПІ. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*, 2011. Вип. 52. С. 118–130.
5. Leite Nuno, Melicio Fernando, Rosa Agostinho. A fast simulated annealing algorithm for the examination timetabling problem. *Expert Systems with Applications*. 2018. № 122.
6. Гусейн А. Разработка механизма интеллектуального управления отношениями «студент-преподаватель» в пространстве виртуального образования с применением нейронных сетей. *Open education*. V. 22. № 5. 2018. P. 94–103.
7. UniTime | University Timetabling. URL: www.unitime.org.
8. Система для составления расписаний в вузах. URL: <https://ru.osvita.ua/vnz/53319/>.
9. Галактика: Расписание учебных занятий. URL: http://galaktika.ua/manuals/ruz/index.html?ruz_raspisanie.htm (дата звернення: 01.03.2020).
10. 1С: Автоматизированное составление расписания. Университет. URL: https://solutions.1c.ru/catalog/asp_univer (дата звернення: 05.03.2020).
11. Расписание занятий: «Ректор-ВУЗ». URL: <http://rector.spb.ru/raspisanie-vuz-4u.php> (дата звернення: 01.03.2020).
12. Blum C. Ant colony optimization: Introduction and recent trends // *Physics of Life Reviews* 2, 2005. С. 353–373.
13. Бойко О.М. Еволюційна технологія розв'язування задачі складання розкладів навчальних занять. *Штучний інтелект*. 2006. № 3. С. 341–348.
14. Астахова И.Ф., Фирас А.М. Составление расписания учебных занятий на основе генетического алгоритма. *Вестник ВГУ, Серия «Системный анализ и информационные технологии»*, 2013. № 2. С. 93–99.
15. Thepphakorn T., Pongcharoen P., Hicks C. An ant colony based timetabling tool. *International Journal of Production Economics*. 2014, № 149(3). С. 131–144.
16. Юрчак І.Ю., Москович Т.Р. Дослідження генетичних алгоритмів та застосування їх в автоматизованій системі розподілу навантаження для викладачів і студентів. URL: <http://eom.lp.edu.ua/sntk/doc/ksm2018/moskovytch.pdf>.

Haitan O.M. THE UNIVERSITY COURSE TIMETABLING AUTOMATION

The issue of automating of the university course timetabling is considered in the paper; the existing timetabling systems are explored, their functional features, as well as benefits and disadvantages are analyzed. The problem statement of the timetabling problem is formalized, the basic hard and soft constraints that imposed on the created schedule are identified and systematized. It is proposed a hybrid approach for computer timetabling based on the ant colony optimization and genetic algorithms. Combining of these methods will reduce the convergence time of the algorithm and increase the probability of a global optimum finding.

It is also described a software for university course timetabling, which based on constant data stored in a sql database (data of departments, specialties, teaching groups, teachers, teaching buildings, teaching rooms) and operational semester information imported from xml files (curricula, staff load, availability calendars, and priorities of the learning process participants), provides the possibility of manual, automatic and automated course timetabling using the described method and drag&drop technology.

It is possible to edit manually the created schedule and export it to xml and xlsx files. The use of this system in higher education institutions will facilitate and increase the efficiency of timetabling dispatchers and the educational process quality by controlling the absence of conflicts for the educational process participants and maximally taking into account their wishes during timetabling.

Key words: genetic algorithm, combinatorial optimization, ant colony method, schedule, metaheuristics, timeslot.

Говорущенко Т.О.

Хмельницький національний університет

Чубатий М.А.

Хмельницький національний університет

Шуригін А.С.

Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ WEB-СИСТЕМИ БОТАНІЧНОГО САДУ ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

У сучасних умовах web-система потрібна не лише для комерційних організацій, але й для таких структур, як, наприклад, ботанічний сад. Завдяки web-системі ботанічний сад може повідомити людей (зокрема, потенційних відвідувачів) про розмаїття своїх експонатів й експозицій. Актуальною задачею наразі є розроблення web-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету. Метою дослідження є аналіз ефективності засобів для розроблення web-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету. Для досягнення цієї мети слід розв'язати наступні задачі: проведення аналізу відомих технологій і засобів розроблення web-систем із визначенням їхніх переваг і недоліків з боку представлення великої кількості зображень на web-сторінці; проведення аналізу ефективності роботи відомих web-сторінок ботанічних садів України; дослідження систем управління баз даних для зберігання зображень експонатів й експозицій ботанічного саду. Аналіз завдань web-системи ботанічного саду дозволив зробити висновок, що ефективність роботи такої web-системи визначається трьома найважливішими факторами: простота й зручність використання; висока швидкість завантаження фотозображень; висока якість зображення фотокарток. Додатковими факторами ефективності такої web-системи є низька вартість, висока продуктивність і надійність її роботи. На основі аналізу переваг і недоліків технологій і засобів розроблення web-систем автори зробили вибір ефективної технології для розроблення web-системи. Для вибору бази даних для web-системи ботанічного саду було проведено порівняння найбільш відомих систем управління базами даних, у результаті чого автори обрали найефективнішу для розв'язання поставлених задач систему управління базами даних. Враховуючи проведені дослідження та виконаний вибір засобів для розроблення web-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету, наразі ведеться інтенсивна робота над розробленням і наповненням такої web-системи.

Ключові слова: web-система, web-система ботанічного саду, технології розроблення web-систем, засоби розроблення web-систем, система управління базами даних.

Постановка проблеми. Будь-якій організації потрібна web-система, яка повідомить про організацію та її діяльність якомога ширше коло людей. Не виключенням є і ботанічний сад, в який можна й потрібно залучати відвідувачів саме за допомогою web-системи. Web-система – це набір web-сторінок, пов'язаних між собою єдиною темою, загальним оформленням і посиланнями; це сучасний засіб передачі інформації, комунікації та реклами, який дає великі можливості у сфері пошуку й залучення клієнтів [1]. Повноцінна web-система може надавати всім охочим документи, фото-, аудіо- й відеоматеріали, необхідні для формування правильного уявлення про діяльність і

можливості компанії, а також допомагає миттєво поінформувати мільйони користувачів про нові продукти, послуги й події [2].

Web-система є найефективнішим способом передачі інформації у зв'язку з величезною швидкістю розвитку мережі Інтернет, використанням Інтернет-технологій все більшою кількістю людей, миттєвим доступом до найбільш актуальної інформації.

Тому в сучасних умовах web-система потрібна не лише для комерційних організацій, але й для таких структур, як, наприклад, ботанічний сад. Завдяки web-системі ботанічний сад може повідомити людей (зокрема, потенційних відвідувачів)

про розмаїття своїх експонатів та експозицій. Web-система ботанічного саду за своїми функціями й властивостями повинна бути візиткою (містити загальну інформацію про ботанічний сад) й інформаційним сайтом (містити вичерпну інформацію про рослини, наявні в ботанічному саду, а також такі сервіси, як опитування, голосування, розсилки) одночасно.

Ботанічний сад Хмельницького національного університету (далі – ХНУ) є пам'яткою природи в місті Хмельницькому. Загальна кількість рослин, які зростають на території Ботанічного саду ХНУ, становить близько 20 тисяч екземплярів. У колекції саду налічують 32 види рослин, занесених до Червоної книги України. Сад налічує 610 найменувань, видів і сортів культурних рослин. Серед експозицій Ботанічного саду ХНУ – «Японський сад», «Листяні рослини», «Долина пізнання», «Країна знань», «Сад студентської дружки» й інші.

Внаслідок відсутності web-системи ботанічного саду ХНУ про розмаїття експонатів й експозицій цього ботанічного саду знає навіть далеко не кожен хмельничанин, тим більше про це не знають люди, які мешкають у Хмельницькій області й за її межами. Звісно, потрібно інформувати людей про цю пам'ятку природи й залучати до неї відвідувачів, і робити це потрібно саме за допомогою web-системи.

Отже, *актуальною задачею* наразі є розроблення web-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету (ХНУ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні web-системи (сайти або сторінки на сайтах інших установ) мають більшість ботанічних садів України, наприклад: Національний ботанічний сад ім. М. Гришка [3], Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України [4], Ботанічний сад ім. О. Фоміна [5], Одеський ботанічний сад [6], у тому числі й ботанічні сади закладів вищої освіти: Ботанічний сад Львівського національного університету імені І. Франка [7], Ботанічний сад Чернівецького національного університету [8], Ботанічний сад Полтавського національного педагогічного університету ім. В.Г. Короленка [9] й інші.

Якщо проаналізувати відомі web-системи ботанічних садів, то стає очевидним, що фотографії експозицій і експонатів потребують якісного представлення на web-сторінці ботанічного саду у вигляді зображень. Тобто саме якісне й ефективне представлення фотозображень рослин і експозицій на web-сторінці дозволить представити розмаїття експонатів і масштаби ботанічного

саду, розширити коло потенційних відвідувачів (як у межах міста й області, так і за їх межами) і, як результат, залучити більшу кількість відвідувачів у ботанічний сад.

Постановка завдання. *Метою дослідження* є аналіз ефективності засобів для розроблення web-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету. Для досягнення цієї мети слід розв'язати наступні *задачі*: проведення аналізу відомих технологій і засобів розроблення web-систем із визначенням їхніх переваг і недоліків із боку саме представлення великої кількості зображень на web-сторінці; проведення аналізу ефективності роботи відомих web-сторінок ботанічних садів України; дослідження систем управління баз даних для зберігання зображень експонатів та експозицій ботанічного саду.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Аналіз та вибір ефективних технологій і засобів розроблення web-систем.* Для створення візуальної частини web-системи розробники використовують такі засоби, як HTML/CSS – використовується для створення базової частини web-системи, а також для структурування вмісту web-сторінки, щоб користувач без проблем зміг знайти те, що його цікавить [10]; JavaScript – допомагає в реалізації значної кількості ефектів для об'єктів, розміщених на сайті (за допомогою бібліотек можна реалізувати переміщення та анімацію об'єктів і таке інше) [10].

Класичним і найбільш популярним методом створення web-систем є використання HTML із застосуванням CSS і JavaScript [10]. Саме цей метод і використаний для створення ефективної web-системи ботанічного саду. Для розроблення web-системи ботанічного саду використовується мова програмування JavaScript із використанням бібліотеки Three.js [11]. Це інструмент, який спрощує розробку тривимірних сцен у браузері з використанням технології WebGL. Для оформлення інформації на сторінці веббраузера використовуються мова розмітки HTML і таблиця стилів CSS.

Як система для наповнення та редагування основного контенту сайту використовується система керування вмістом WordPress, яка викладена мовою програмування PHP. Саме такий підхід дозволяє авторам ефективно розв'язати поставлену задачу.

Аналіз ефективності роботи відомих web-систем ботанічних садів. З огляду на вищеописані завдання web-системи ботанічного саду, слід зробити висновок, що ефективність роботи таких web-сторінок визначається трьома найважливішими

факторами: простота й зручність використання; швидкість завантаження фотозображень; якість зображення фотокарток. Проведемо аналіз ефективності роботи відомих web-сторінок ботанічних садів України саме з позицій швидкості та якості зображення фотокарток – таблиця 1.

Аналіз наведених у таблиці 1 web-сторінок ботанічних садів показав, що кращою за якістю зображення фотографій є web-сторінка Національного ботанічного саду ім. М. Гришка, а за швидкістю завантаження – web-сторінка Ботанічного саду Полтавського національного педагогічного університету ім. В.Г. Короленка. Якщо розглядати web-інтерфейс сторінки Національного ботанічного саду ім. М. Гришка з позицій зручності й простоти використання, то можна зауважити, що він зрозумілий, простий, виконаний у стилі мінімалізму, має меню для переходу до всіх розділів сайту. Кольорова гамма інтерфейсу відповідає тематиці сайту. Кожний розділ ілюструється зображеннями, які мають високу якість. Отже, користувач може швидко й ефективно переглянути рослини-експонати й експозиції ботанічного саду. Web-сторінка Національного ботанічного саду ім. М. Гришка й буде орієнтиром для створення власної ефективної web-системи ботанічного саду ХНУ, але з урахуванням усіх найкращих характеристик і рішень інших проаналізованих web-сторінок.

Аналіз та вибір ефективних баз даних для зберігання зображень експонатів й експозицій ботанічного саду. Досить важливим фактором для створення

ефективної web-системи ботанічного саду є вибір бази даних для збереження фотозображень експонатів й експозицій.

Очевидно, найпростіший підхід під час вибору системи управління базою даних (далі – СУБД) заснований на оцінюванні того, якою мірою наявні системи задовольняють основним вимогам створюваного проекту. З боку потреби web-системи ботанічного саду у високій швидкості та якості зображення експонатів й експозицій, визначальними є наступні критерії вибору бази даних [12]: швидкість роботи, продуктивність (складається з часу завантаження бази даних, часу оновлення та зміни даних, часу виконання запитів [12; 13]), надійність зберігання даних у зовнішній пам'яті (можливість СУБД відновити останній погоджений стан БД після будь-якого апаратного або програмного збою [12; 13]), вартість реалізації. Проведемо порівняльний аналіз відомих СУБД з боку визначальних критеріїв вибору (таблиця 2) [12; 13].

Під час замовлення web-сторінки ботанічного саду увага організації-замовника насамперед фокусується на вартості замовлення, тому потрібно обрати безкоштовну СУБД із найкращими в порівнянні з іншими СУБД характеристиками швидкості опрацювання запитів, продуктивності й надійності. Враховуючи характеристики різних СУБД, наведені в таблиці 2, автори обрали систему MySQL, яка безкоштовна, має високі показники швидкості, продуктивності й надійності й може конкурувати з більшістю платних СУБД.

Таблиця 1

Результати аналізу ефективності роботи web-систем ботанічних садів України

Ботанічний сад	Адреса Web-сторінки	Швидкість завантаження зображень	Якість зображень
Національний ботанічний сад ім. М. Гришка	http://www.nbg.kiev.ua/	1.78 с	Відмінна
Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України	http://www.nas.gov.ua/UA/Org/Pages/default.aspx?OrgID=0000357	2.88 с	Достатня
Ботанічний сад ім. О. Фоміна	https://sad.ukr.bio.ua/articles/7513/	4.11 с	Хороша
Одеський ботанічний сад	http://www.odessatourism.org/ua/do/landmarks/odesskij-botanicheskij-sad	1.15 с	Відмінна
Ботанічний сад Львівського національного університету імені І. Франка	https://botanicgarden.lnu.edu.ua/	1.89 с	Хороша
Ботанічний сад Чернівецького національного університету	http://ibhb.chnu.edu.ua/dpt/botsad/pro-botsad	Зображення відсутні	Зображення відсутні
Ботанічний сад Полтавського національного педагогічного університету ім. В.Г. Короленка	http://www.tourism.poltava.ua/muzei/Botanichnij_sad/	1.11 с	Хороша

Приклади функціонування розробленої веб-системи ботанічного саду Хмельницького національного університету. Враховуючи проведені

дослідження та виконаний вибір засобів для розроблення веб-системи ботанічного саду ХНУ, наразі ведеться інтенсивна робота над розробленням

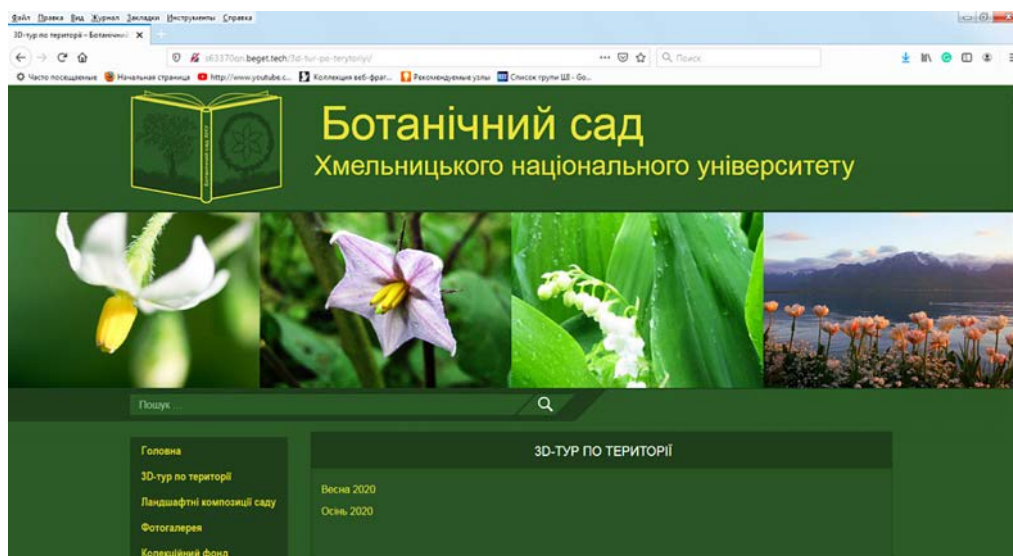


Рис. 1. Інтерфейсне вікно веб-системи з можливістю запуску 3D-туру ботанічним садом

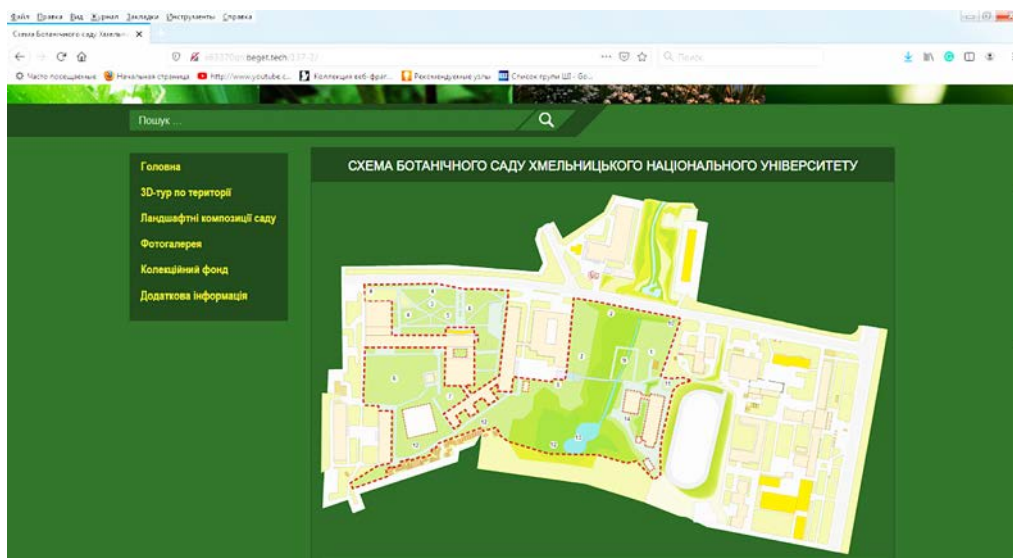


Рис. 2. Інтерфейсне вікно веб-системи зі схемою ботанічного саду ХНУ

Таблиця 2

Порівняльний аналіз СУБД для зберігання зображень експонатів й експозицій ботанічного саду

СУБД	Швидкість	Продуктивність	Надійність	Вартість
MySQL	Висока	Висока	Висока	Безкоштовна
PostgreSQL	Достатня	Висока	Висока	Безкоштовна
Oracle	Висока	Висока	Висока	Платна
Interbase	Достатня	Висока	Висока	Безкоштовна
Dbase	Висока	Достатня	Достатня	Платна
SyBase	Достатня	Висока	Висока	Платна
DB/2	Висока	Висока	Висока	Платна
XML	Низька	Низька	Низька	Безкоштовна
Парадокс	Достатня	Достатня	Достатня	Платна
CSV	Низька	Низька	Низька	Безкоштовна

web-системи ботанічного саду ХНУ, а саме наповнення бази даних зображеннями експонатів й експозицій, у тому числі 3D- та 360°-зображеннями. На рис. 1 представлено інтерфейсне вікно web-системи з можливістю запуску 3D-туру ботанічним садом ХНУ. На рис. 2 представлено інтерфейсне вікно web-системи зі схемою ботанічного саду ХНУ. На рис.3 представлено інтерфейсне вікно web-системи з переліком декількох рослин колекційного фонду ботанічного саду ХНУ. На рис. 4 представлено інтерфейсне вікно web-системи з інформацією про обрану рослину.

Висновки. Аналіз завдань web-системи ботанічного саду дозволив авторам зробити висновок, що ефективність роботи такої web-системи визначається трьома найважливішими факторами: простота й зручність використання; висока швидкість

завантаження фотозображень; висока якість зображення. Додатковими факторами ефективності такої web-системи є низька вартість, висока продуктивність і надійність її роботи.

На основі аналізу переваг і недоліків технологій і засобів розроблення web-систем автори зробили вибір ефективної технології для розроблення web-системи. Для вибору бази даних для web-системи ботанічного саду було проведено порівняння найбільш відомих систем управління базами даних, у результаті чого автори обрали найефективнішу для розв'язання поставлених задач за вищенаведеними критеріями СУБД.

Враховуючи проведені дослідження та виконаний вибір засобів для розроблення web-системи ботанічного саду ХНУ, наразі ведеться інтенсивна робота над розробленням такої web-системи.

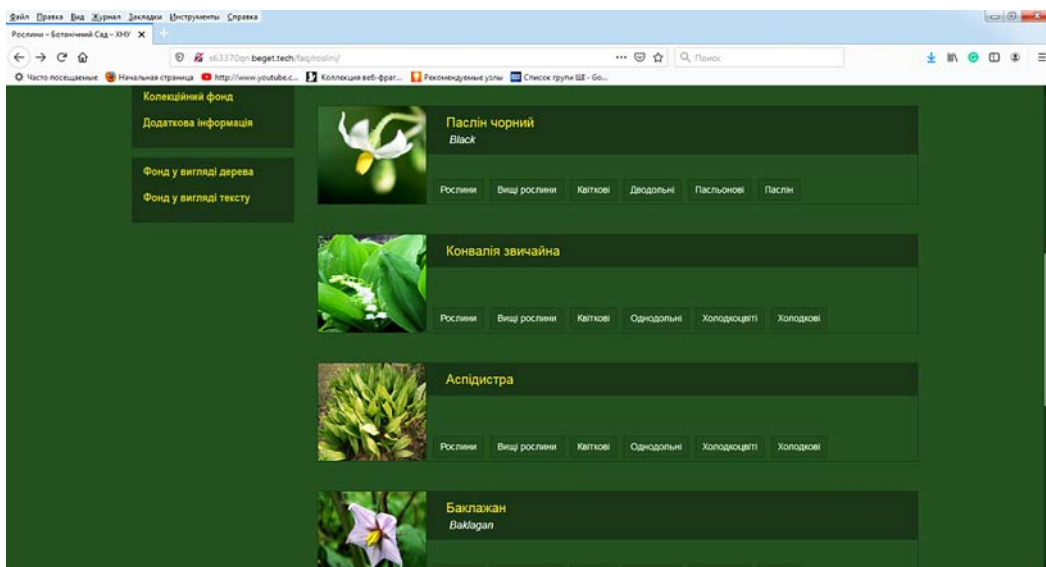


Рис. 3. Інтерфейсне вікно web-системи з переліком декількох рослин колекційного фонду ботанічного саду ХНУ

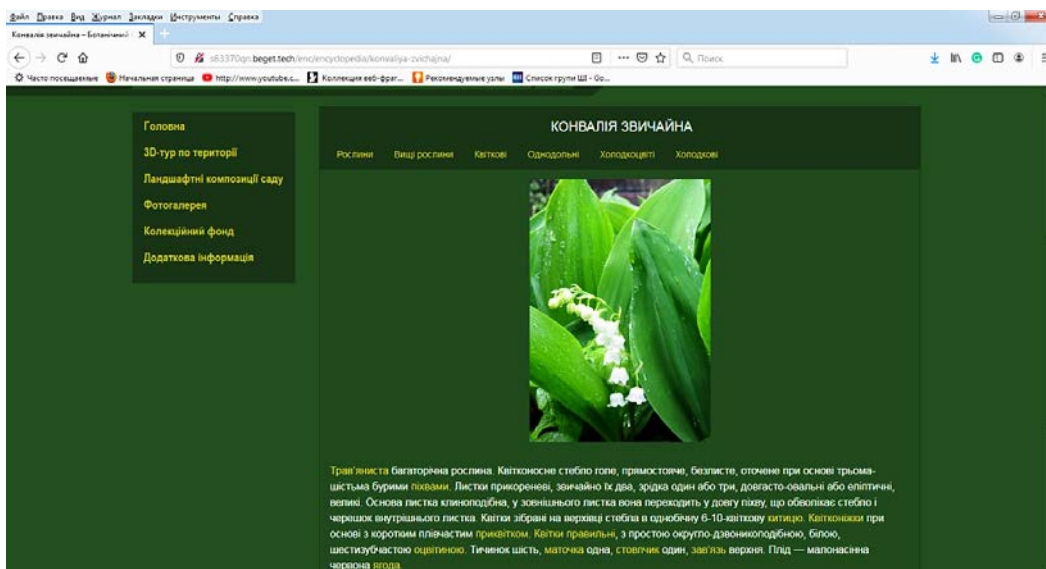


Рис. 4. Інтерфейсне вікно web-системи з інформацією про обрану рослину

Список літератури:

1. Для чого нам потрібен сайт? *PBB-design* : вебсайт. URL: <https://pbb.lviv.ua/statti-i-novyny/statti-shchodo-stvorennia-saitu/dlia-choho-nam-potriben-sait> (дата звернення: 20.02.2020).
2. Навіщо підприємству потрібен сайт? *ДЕБЕТ-плюс* : вебсайт. URL: <https://debet.com.ua/uk/webdesign/why> (дата звернення: 20.02.2020).
3. Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України. URL: <http://www.nbg.kiev.ua/> (дата звернення: 20.02.2020).
4. Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України. URL: <http://www.nas.gov.ua/Org/Org/Pages/default.aspx?OrgID=0000357> (дата звернення: 20.02.2020).
5. Ботанічний сад Олександра Фоміна. URL: <https://sad.ukr.bio.ua/articles/7513/> (дата звернення: 20.02.2020).
6. Одеський ботанічний сад. URL: <http://www.odessatourism.org/ua/do/landmarks/odesskij-botanicheskij-sad> (дата звернення: 20.02.2020).
7. Ботанічний сад Львівського національного університету імені І. Франка. URL: <https://botanicgarden.lnu.edu.ua/> (дата звернення: 20.02.2020).
8. Ботанічний сад Чернівецького національного університету. URL: <http://ibhb.chnu.edu.ua/dpt/botsad/pro-botsad> (дата звернення: 20.02.2020).
9. Ботанічний сад Полтавського національного педагогічного університету ім. В.Г. Короленка. URL: http://www.tourism.poltava.ua/muzei/Botanichnij_sad/ (дата звернення: 20.02.2020).
10. Лабберс П., Олберс Б., Салим Ф. HTML5 для професіоналів: потужні інструменти для розробки сучасних веб-прилогень (Pro HTML5 Programming: Powerful APIs for Richer Internet Application Development). Москва : «Вільямс», 2011. 272 с.
11. JavaScript в 3D: вступ до Three.js. *Хабр* : спільнота ІТ-спеціалістів. URL: <https://habr.com/ru/post/477956/> (дата звернення: 20.02.2020).
12. Конноллі Т., Бегг К. Бази даних. Проектування, реалізація та супровід. Теорія та практика. Москва : Інформікс, 2010. 890с.
13. Федько В.В., Тарасов О.В., Лосєв М.Ю. Організація баз даних та знань : навчально-практичний посібник для самостійної підготовки студентів. Харків : ХНЕУ, 2013. 198 с.

Hovorushchenko T.O., Chubatyi M.A., Shurygin A.S. ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TOOLS FOR DEVELOPING THE WEB-SYSTEM OF THE BOTANICAL GARDEN OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

In today's context, a web-system is needed not only for business organizations, but also for structures such as the Botanical Garden. Thanks to the web-system, the botanical garden can inform people (in particular, potential visitors) about the variety of their exhibits and exhibitions. The urgent task now is to develop a web-system of the Botanical Garden of Khmelnytskyi National University (KhNU). The purpose of this study is to analyze the effectiveness of tools for developing the web-system of the botanical garden of KhNU. To achieve this goal, the following tasks should be solved: analyzing well-known technologies and tools for developing the web-systems with identifying their advantages and disadvantages in terms of the presentation of a large number of images on a web page; analyzing the performance of the known web pages of Ukraine's botanical gardens; research of database management systems for storing images of exhibits and expositions of the botanical garden. The analysis of the tasks of the botanical garden web-system allowed the authors to conclude that the effectiveness of such a web-system is determined by three important factors: simplicity and usability; high speed of loading of photos; the high quality of displaying of photos. Additional factors of efficiency of such web-system are low cost, high productivity and reliability of its work. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of technologies and tools for developing web-systems, the authors made the choice of effective technology for web-system development. In order to select a database for the botanical garden web-system, a comparison of the most famous database management systems (DBMS) was carried out, as a result, the authors chose the most effective DBMS for solving the tasks. Considering the conducted researches and the choice of the means for development of the web-system of the botanical garden of KhNU, nowadays the intensive work is underway on the development and filling of such web-system.

Key words: *web-system, web-system of botanical garden, technologies of development of web-systems, tools for developing the web-systems, database management system (DBMS).*

Голуб Т.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Зеленьова І.Я.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Грушко С.С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Павлішин М.А.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ПІДСИСТЕМА АПАРАТНОГО ПРИСКОРЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТІВ У БАЗИСІ FPGA

Комп'ютерні засоби в галузі обробки природних мов, зокрема в задачах класифікації текстів, застосовуються в наш час досить інтенсивно. Актуальною метою досліджень у цій галузі є значне прискорення процесу класифікації текстових документів. Одним із способів вирішення подібних задач є апаратне прискорення, тобто перенесення частини обчислювальних функцій із програмної області в апаратну реалізацію.

В роботі запропоновано спосіб апаратного прискорення процесу класифікації текстових документів на основі принципів найвгоного методу Баєса. Досліджено процес апаратної класифікації на прикладі чотирьох вхідних масивів, які містять коди слів із різних текстів. Для визначення певної тематики використовується масив відповідних ключових слів, які попередньо були закодовані тим же способом, що і вхідні масиви.

Задачу вирішено в сучасному елементному базисі FPGA шляхом розпаралелювання обчислень в межах однієї мікросхеми. Розроблена підсистема апаратного прискорення класифікації забезпечує можливість паралельної обробки декількох текстів, а також масштабованості та перепрограмування, тобто настроювання на задану тематику. Наведено алгоритм роботи та структурну схему апаратного прискорювача, а також опис логіки функціонування основних складових блоків.

З метою тестування спроектованого пристрою в елементному базисі широкого використання обрано мікросхеми FPGA фірми Altera / Intel, мову опису апаратури VHDL. Для імплементації проекту обрано пакет IDE Quartus II, відповідний до продукції фірми-виробника мікросхем. Виконано аналіз часових та апаратних характеристик пристрою при його реалізації на мікросхемах FPGA фірми Altera / Intel в різних цінових діапазонах. Сформульовано рекомендації щодо вибору мікросхеми для ефективної реалізації прискорювача за критерієм співвідношення «ціна / якість». Визначено перспективні напрями подальшого пошуку рішень задачі апаратного прискорення класифікації текстів.

Ключові слова: апаратне розпаралелювання обчислень, FPGA, LUT, вбудовані блоки пам'яті, класифікація текстів.

Постановка проблеми. Комп'ютерні засоби в галузі обробки природних мов (англ. Natural Language Processing), зокрема в задачах класифікації текстів, застосовуються в наш час досить інтенсивно. Певним чином це пов'язано з тим, що із кожним роком обсяг інформації, яка зберігається на електронних носіях та жорстких дисках, значно збільшується, тому необхідні ефективні алгоритми та системи для обробки та аналізу природомовних документів.

Програмне вирішення задач класифікації зазвичай потребує багато машинного часу, оскільки

потрібно виконувати цикли повного перебору великих масивів даних, розміри яких мають тенденцію і надалі зростати. Отже, актуальною задачею є значне прискорення процесу класифікації текстових документів. Одним із способів вирішення подібних задач є апаратне прискорення, тобто перенесення частини обчислювальних функцій із програмної області в апаратну реалізацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класифікація текстів належить до групи задач комп'ютерної лінгвістики, яка включає визначення тематичної приналежності текстів, авторського

стилю, емоційного забарвлення висловлювань та багатьох інших характеристик досліджуваного тексту.

Вирішення задачі класифікації текстів – це складний багатоетапний процес аналізу змісту певного документа, а також автоматичного визначення приналежності цього документа до однієї або кількох категорій [1, 2, 4, 6] однієї тематики. В загальному плані методи побудови класифікаторів текстових документів можна поділити на дві групи: засновані на штучному інтелекті та аналітичні.

Методи класифікації, засновані на штучному інтелекті, зазвичай реалізовані на штучних нейронних мережах (ШНМ, artificial neural networks, ANN) [3, 7]. Застосування ШНМ характеризується складністю визначення вагових значень зв'язків між нейронами, великою кількістю нейронів і розрахунків.

До найпоширеніших аналітичних методів, згідно з описами в літературних джерелах, належить наївний метод Байєса (Naive Bayes, NB) [2]; метод опорних векторів (Support Vector Machine, SVM) [4]; метод k-найближчих сусідів (k-nearest neighbors (KNN) [4]; метод Роше (Rocchio) [2]; дерево рішень (decision tree) [4].

Аналітичні методи стосовно питань апаратної реалізації мають певні особливості. Так, метод опорних векторів при своїй простоті реалізації не дозволяє корегувати результати прийняття рішення, до того ж складно відслідкувати безпосередньо сам процес класифікації. Метод k-найближчих сусідів вимагає великого обсягу пам'яті для збереження базового переліку опорних документів і їх постійних перерахунків при аналізі кожного вхідного документа, що зумовлює збільшення кількості розрахунків [4, 6]. Метод Роше вимагає завантаження всього документа, призначеного для аналізу, що висуває додаткові вимоги до обсягів оперативної пам'яті. Дерево рішень характеризується великою надмірністю побудованої структури, яка вимагає недоцільних витрат оперативної пам'яті. Наївний метод Байєса є найпростішим для апаратної побудови класифікатора та забезпечує такі можливості як обробка вхідних даних у реальному масштабі часу, а також досягнення достатньої точності результату при високій швидкодії [1, 2, 6].

Для сучасної апаратної реалізації класифікаторів можуть використовуватися мікроконтролери (МК), програмований логічний контролер (ПЛК), інтегральна схема спеціального призначення (ASIC), програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) [7, 8, 10].

Особливістю апаратної реалізації класифікаторів текстових документів є необхідність його адаптації

під користувацькі вимоги. Важливо враховувати необхідність зміни переліку опорних даних у відповідності з потребами користувача, а також пристрій має бути відносно недорогим за ціною. Таку можливість без втрати швидкодії може забезпечити архітектура програмованої логічної інтегральної схеми класу FPGA, тому саме цю архітектуру було обрано в цій роботі.

Постановка задачі. Метою дослідження є прискорення процесу класифікації текстів шляхом організації паралельних обчислень у мікросхемах FPGA. Для досягнення цієї мети розроблено підсистему апаратного прискорення класифікації, що забезпечує можливості паралельної обробки декількох текстів, а також масштабованості та перепрограмування, тобто настроювання на задану тематику.

Виклад основного матеріалу дослідження. Апаратна підсистема прискорення процесу класифікації текстів («акселератор») є складовою частиною апаратно-програмного комплексу (Рис. 1), запропонованого авторами для загального вирішення задачі автоматичної обробки текстових документів, із включенням усіх етапів попередньої обробки, а також етапу класифікації.

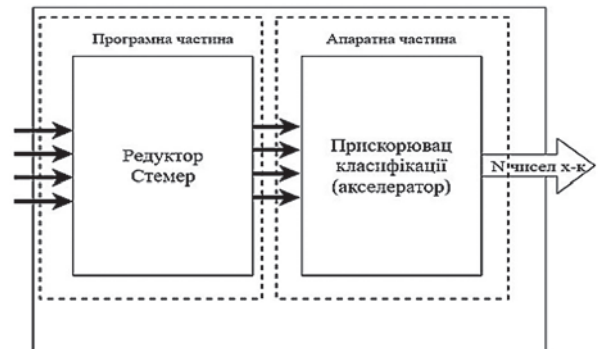


Рис. 1. Загальна структура програмно-апаратного комплексу для класифікації текстів

Розроблюваний програмно-апаратний комплекс має блочну структуру та складається з двох основних частин: програмний блок виконує первинну обробку текстових документів (кодування за ASCII кодами, видалення незначущих слів), а також функції стемінгу та редукції (скорочення простору ознак тексту, що підлягають аналізу); апаратний блок – акселератор, який виконує функції прийому та обчислення даних від програмного блоку та прискорює класифікацію шляхом паралельної обробки декількох масивів із кодами текстової інформації.

В роботі розглядається саме блок акселератора. З метою подальшого тестування та дослідження спроектованого пристрою в елементному базисі широкого використання було обрано мікросхеми

FPGA фірми Altera / Intel, мову опису апаратури VHDL, а також для імплементації проекту – пакет IDE Quartus II, відповідний до продукції обраної фірми-виробника мікросхем [11–14].

Попередньо оброблені вхідні дані завантажуються із програмного блоку до апаратного, а саме до спеціально зарезервованої внутрішньої пам'яті типу ROM або RAM у мікросхемі FPGA. В структурі комплексу на Рис. 1 програмна частина виконує попередні етапи – функції скорочення обсягу вхідної інформації та підрахунку частоти важливих слів. Частота, яка враховується в формі вагового коефіцієнту для кожного слова, представлена у вигляді чисел із комою. Відомо, що архітектура FPGA не досить пристосована для роботи із дійсними числами. Тому з метою прискорення обчислень було вирішено відмовитися від чисел із комою і використовувати формат, який ефективно підтримується архітектурою, зокрема тип *integer*. Зважаючи на те, що згідно із загальною постановкою задачі [5] сформовані редуктором числа мають лише два знаки після коми, було вирішено змістити кому на два розряди, тобто виконати множення на 10^2 . Таким чином, формуються аналоги частот вже не дійсного типу, а цілого.

Для зберігання таблиці закодованого тексту в пам'яті необхідно розробити формат даних. Згідно статистики, значуща частина слова може бути визначена достатнім набором із 10-16 літер, у цьому дослідженні – із 11 літер. Це частина слова після стемінгу, тобто без суфікса та закінчення. Літери необхідно закодувати, і найпростішим варіантом є їх перетворення за таблицею ASCII. Згідно таблиці ASCII, для кожної літери є числова відповідність, яка має розмір одного байту.

Необхідно закодувати 11 літер текстового слова, тобто створити відповідний двійковий код-ключ. Отже, необхідно зарезервувати $11 \cdot 8 = 88$ біт для представлення коду одного слова тексту (ключа), а для коду ознаки відповідного вагового коефіцієнта достатньо 8 біт. Для числового відображення відповіді класифікатора, враховуючи формування кінцевого результату шляхом зворотнього перетворення із формату *integer* до формату *real*, виділено 32 біта, що еквівалентно типу *integer* із максимальним значенням 2^{32} . Отже, формат даних – це двійкове слово, яке має довжину 96 біт, з яких 88 біт – довжина ключа, 8 – довжина відображення вагового коефіцієнта (Рис. 2).

В цій роботі досліджено процес апаратної класифікації на прикладі чотирьох вхідних масивів, які містять коди слів із різних текстів. Для визначення певної тематики використовується масив відповідних ключових слів, які закодовані тим же способом, що і вхідні масиви.

KEY	VALUE
0	87 88 95

Рис. 2. Формат даних внутрішнього масиву класифікатора

Запропонований алгоритм класифікації (Рис. 3) в узагальненому, концептуальному вигляді функціонує так: якщо у внутрішньому масиві є слово, то виконується пошук ключа цього слова у вхідному масиві (текст, оброблений програмно після проходження редуктора). Якщо знайдена відповідність ключа (KEY) із внутрішнього масиву у вхідному масиві, то необхідно перемножити значення частоти слова (VALUE) із вхідного та внутрішнього масивів і скласти всі результати множення. Якщо слово не знайдено, то беремо із внутрішнього масиву наступне слово та виконуємо ітерацію співставлення.

Після визначення формату даних і розробки загального алгоритму роботи блоку акселератора необхідно створити у VHDL-проекті внутрішні пристрої для збереження даних. Зважаючи на те, що в структурі FPGA є блоки, які функціонують як ROM або RAM [9, 10, 13], доцільно використовувати саме їх. Це дозволяє економити загальноновживані ресурси (LUT) за рахунок використання спеціальних (ROM, RAM). ROM – швидкодіюча пам'ять, яка не може бути перезаписана без перепрограмування, натомість RAM має можливість завантаження нових даних до пристрою. Згідно з поставленою задачею система повинна мати можливість завантаження нових даних (нових текстів для класифікації), тому обрано RAM-комірку. IDE Quartus II значно спрощує створення таких блоків завдяки мегафункціям.

Для початкової ініціалізації вмісту файлів використовуються *.mif файли, їх вміст ініціюється у блоках пам'яті і при симуляції ці дані є доступними. Доступ до вмісту блоків пам'яті здійснюється за відповідною адресою.

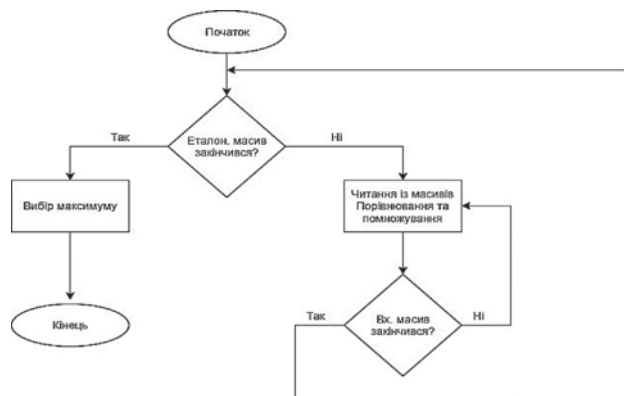


Рис. 3. Узагальнений алгоритм роботи блоку акселератора

Необхідно створити VHDL-сутність пристрою (Рис. 4) для того, щоб генерувати поточну адресу слова у внутрішньому масиві. Генератор адреси повинен мати сигнал дозволу роботи ENA, сигнал скидання R, сигналізувати про останнє слово в пам'яті isLast та генерувати адресу Addr. Логіку функціонування описано за допомогою ключового слова process. Команди в окремому процесі виконуються послідовно, але всі процеси синхронізуються сигналом CLK і виконуються паралельно, що важливо для прискорення обробки декількох масивів.

Генератор адреси та блоки пам'яті використовуються у безпосередньому зв'язку (Рис. 4). Для того, щоб слова не зчитувалися постійно, в схемі передбачено сигнал ReadENA, що дозволяє читання, та окремий сигнал WriteENA для дозволу запису.

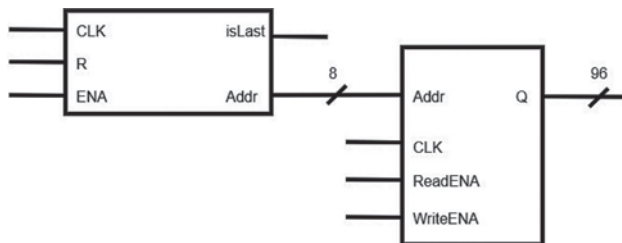


Рис. 4. Схема з'єднання генератора адреси та блоку пам'яті

Важливим функціональним блоком системи є помножувач-акумулятор (Рис. 5). У такій системі цей блок виконує функцію порівняння вхідного тексту із еталонним та перемноження коефіцієнтів у разі співпадиння. Таким чином зрозуміло, що необхідно отримувати два слова по 96 розрядів (входи A та B), порівнювати їх. Також необхідно забезпечити блок сигналом дозволу роботи для уникнення хибних результатів. Доцільно розробляти систему із передбаченням можливої масштабності. У мові VHDL існує спеціальна конструкція *generic* для того, щоб визначати та змінювати розмірність векторів. Таким чином, система стає більш гнучкою, можна із легкістю змінювати розмірності даних.

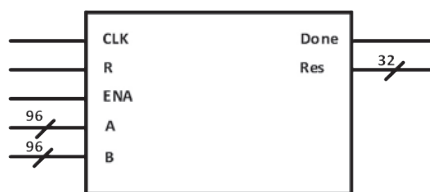


Рис. 5. Помножувач-акумулятор

Для вибору тексту, який найвірогідніше належить до певної категорії, виконується порівняння

значень, отриманих від помножувача-акумулятора, з метою вибору максимального з них. Функцію порівняння виконує схема компаратора. З метою масштабності пропонується синтезувати дво-портовий компаратор і розширити його до необхідного розміру (4 входи для однієї задачі). Очевидно, що входи компаратора повинні бути розрядністю в 32 біта згідно з розрядністю виходу Res помножувача-акумулятора, мати сигнали дозволу роботи, сигнали скидання та синхроімпульсу.

Завдяки зручності мови опису апаратури VHDL робота із числами є досить тривіальною задачею. Вона зводиться до звичного програмування та використання операцій «більше», «менше». Після створення одного блоку можна проводити масштабування до чотирьох. Всі спроектовані функціональні блоки потрібно об'єднати в схему пристрою із забезпеченням алгоритмічного порядку роботи. Для цього необхідний керуючий автомат. Існують декілька типів керуючих автоматів, але в цій роботі автори використовують модель Мура, оскільки вона характеризується більш стійким функціонуванням.

Граф-схему алгоритму (ГСА) автомата Мура розроблено згідно з узагальненим алгоритмом роботи акселератора (Рис. 3). Необхідно визначитися із вхідними умовами та функціями, які буде генерувати автомат. Автори визначають умови, які необхідно аналізувати для роботи схеми акселератора:

- X_1 – перевірка, чи закінчився внутрішній масив ключів;
- X_2 – перевірка, чи всі масиви відпрацювали свої дані;
- X_3 – перевірка, чи закінчився вхідний масив;
- X_4 – вибір режиму завантаження або роботи над класифікацією.

Всі вихідні функції керуючого автомату по суті є сигналами дозволу роботи для окремих функціональних блоків акселератора. До сигналів, які генерує схема керуючого автомату, належать:

- Y_1 – дозвіл читання RAM пам'яті внутрішнього масиву;
- Y_2 – дозвіл читання RAM пам'яті зовнішнього масиву;
- Y_3 – дозвіл роботи компаратора;
- Y_2 – дозвіл роботи помножувача-акумулятора;
- Y_4 – сигнал про завершення роботи;
- Y_5 – дозвіл запису RAM пам'яті внутрішнього масиву.

Варто зазначити, що при проектуванні цифрових пристроїв може виникати ситуація очікування. Для того, щоб такі стани можна було опрацювати, необхідно вводити спеціальний пустий стан (який

не генерує вихідної функції). Стани автомату Мура при розмітці зручно позначати безпосередньо в операторних вершинах, оскільки вихідні сигнали залежать тільки від поточного стану (Рис. 6).

Пропонується підійти до проектування автомату комбінованим шляхом: основну частину описати за допомогою ГСА, а інші частини (дозвіл роботи та запису до RAM) позначити в коді. Це спрощує схему та код. Далі виконується синтез схеми автомата Мура за класичною методикою, для зберігання станів використовуються тригери D-типу [8–9]. Тестування схеми пристрою було виконано в пакеті ActiveHDL, що підтвердило коректність роботи. Етап тестування є обов’язковим і перехідним між розробкою та прошивкою готової схеми пристрою до реальної мікросхеми.

З метою аналізу функціонування розробленої апаратної частини експериментальне дослідження апаратного блоку, тобто акселератора, проводилося окремо від програмно реалізованого блоку [11–13]. У зв’язку з цим вхідні дані для експериментів – масиви кодів у форматі слова внутрішньої пам’яті – генеруються за допомогою консольної програми мовою C++, яка дозволяє створювати *.mif файли необхідного синтаксису для ініціації вхідних масивів у додатку Quartus II 9.2 Web Edition.

Необхідно перевірити коректність роботи паралелізму – виконати тестування послідовної і паралельної задач, порівняти час виконання. Отримані часові діаграми при реалізації на мікросхемі Cyclone III показали, що час роботи пристрою із одним тестовим масивом (662 us) приблизно дорівнює часу роботи із чотирма масивами (670 us). Це свідчить про те, що схема акселератора працює паралельно на чотирьох наборах вхід-

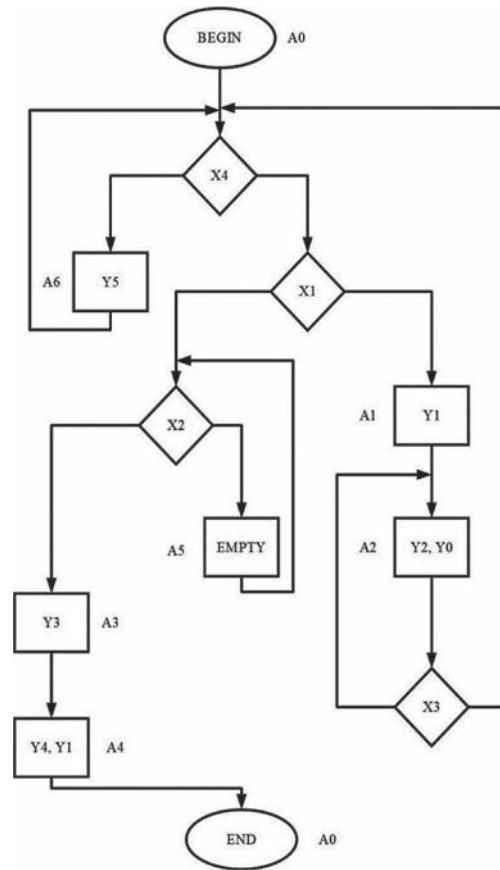


Рис. 6. Розмічена ГСА для автомату Мура

них даних. Невелика різниця в часі пояснюється витратами на пересилки даних і керуючих сигналів через збільшення загального обсягу схеми, а також різне внутрішнє розташування блоків на кристалі FPGA. Результати тестування свідчать про коректність функціонування акселератора, що є необхідною умовою для подальших досліджень.

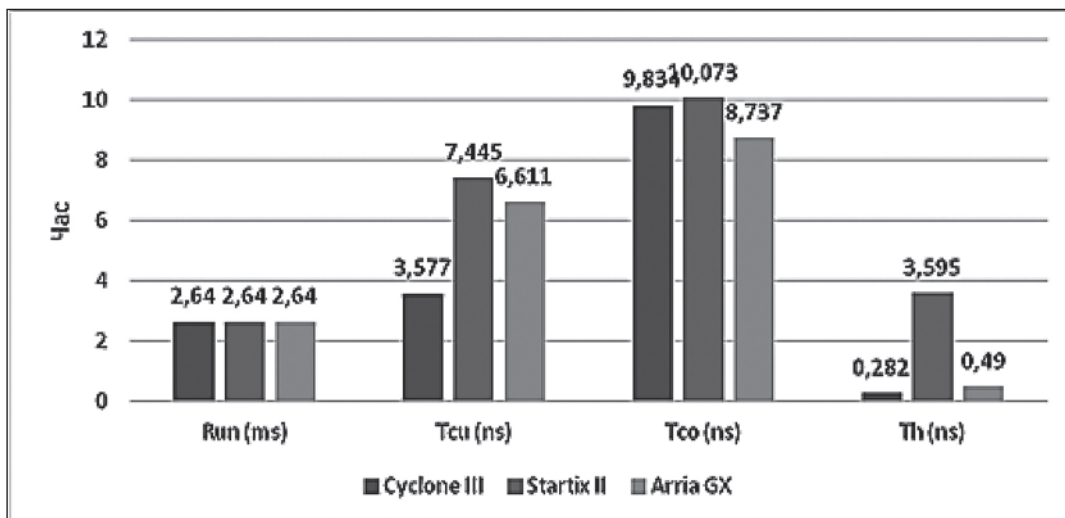


Рис. 7. Діаграма часових витрат недорогих серій мікросхем різних ціннових категорій фірми Altera

За допомогою програмного продукту Quartus II 9.2 Web Edition можна проводити імплементацію в різні мікросхеми, отримувати часові характеристики роботи пристрою, апаратні витрати, температури та на основі проведених досліджень обрати найбільш підходящу мікросхему для прошивки за критерієм «ціна-якість» [11]. Проведені тестування апаратних та часових витрат для мікросхем фірми Altera / Intel в різних цінових категоріях. Офіційний поділ на цінові сегменти виглядав так: дешевий сегмент – Cyclone, середній – Arria, Stratix – дорогий сегмент, а також необхідно зазначити, що в кожному ціновому сегменті є дорогі, дешеві та середні мікросхеми [13]. Сегментація відповідає логічній ємності мікросхем.

Результати, представлені на Рис. 7 та в Табл. 1–2, отримані за допомогою генерування звітів про імплементацію з використанням стандартних компонентів EDA Quartus.

Аналіз отриманих результатів показав, що з практичних міркувань особливий інтерес викликають мікросхеми серії Cyclone III, тому що вони належать до недорогої лінійки, але в межах цих досліджень забезпечують кращі характеристики системи, ніж середня та дорога лінійки.

Висновки. Основна ідея паралельності в FPGA полягає у створенні незалежних блоків, що виконують незалежні функції, які потім необхідно трактувати від одного синхроімпульсу [14]. Необхідно створити чотири RAM блоки (обрана мікросхема не дозволяє більше) для зберігання даних, чотири генератори адрес,

чотири помножувачі-акумулятори, але один компаратор. Над усіма цими пристроями необхідний керуючий пристрій для забезпечення взаємодії, ним є один керуючий автомат. Процес створення паралельної схеми є точно таким же, як і для послідовної.

Особливістю цього пристрою є те, що є можливість вирішувати й обернену задачу, тобто пошук для одного тексту найбільш підходящої теми з декількох можливих. Для цього необхідно внести відповідні зміни у схему пристрою, а саме керуючий автомат залишається таким же, але треба додати ще три внутрішні ключові масиви, видалити три пристрої для вхідних даних та змінити порядок підключення функціональних блоків. Необхідно зазначити, що в загальному випадку кількість вхідних масивів може бути довільною, бо це залежить від характеристик обраної мікросхеми FPGA, особливо від її логічної ємності.

Задача апаратного прискорення класифікації шляхом розпаралелювання процесів на мікросхемі FPGA є вирішеною в загальному сенсі. Перспективи подальшого розвитку досліджень в цьому напрямі полягають в апаратній реалізації на одній мікросхемі всього комплексу, включаючи функції програмного блоку. Також архітектуру прискорювача можливо вдосконалювати, наприклад шляхом застосування конвеєрів, суміщених моделей мікропрограмних автоматів, переміщенням схеми керуючого автомату до внутрішньої пам'яті [15], що потенціально може призвести до ще більшого прискорення функціонування пристрою.

Таблиця 1

Апаратні витрати недорогих серій мікросхем різних цінових категорій фірми Altera

Family	LE	Rg	Pins	Mem (kbit)	Multipliers (шт.)	DSP (шт.)
Cyclone III	577	312	236	122.88	4	0
Startix II	295	120	236	122.88	0	16
Arria GX	298	120	236	122.88	0	16

Таблиця 2

Максимально допустимі частоти для проекту різних цінових категорій мікросхем фірми Altera (МГц)

Family	Fmax (low cost)	Fmax (middle cost)	Fmax (expensive)
Cyclone III	162.25	132.73	150.42
Arria GX	156.18	132.73	150.16
Startix II	149.01	130.5	133

Список літератури:

1. Rubin T.N., Chambers A., Smyth P., Steyvers M. Statistical topic models for multilabel document classification. *Machine Learning*. 2012. Vol. 88. No. 1–2. P. 157–208.
2. Mbaikodzi E., Dral' A.A., Sochenko I.V. The method of automatic classification of short text messages. *Information technologies and computer systems*. 2012. Vol. 3. P. 93–102.
3. Yampolsky L.S. Analytical approach to the choice of neural network topologies to solve the applied problems. *Adaptive systems of automatic control*. 2012. Vol. 20. P. 159–179.
4. Thangaraj M., Sivakami M. Text classification techniques: A literature review. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*. 2018. Vol. 13. P. 117–135.
5. Голуб Т.В., Тягунова М.Ю. Метод уменьшения размера вектора термов для классификации текстовых документов по категориям. *Проблемы региональной энергетики (Problemele energeticii regionale) (специальный выпуск)*. 2019. (SI) 2019. № 1–2(41). С. 84–94. DOI: 10.5281/zenodo.3240216.
6. Brindha S., Sukumaran S., Prabha K. A survey on classification techniques for text mining. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*. IEEE. Coimbatore, Indi. 2016. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICACCS.2016.7586371>.
7. Соловьев В.Д. Один подход к классификации текстов на основе нейронных сетей. *Исслед. по информ.*, 2004. Выпуск 7. С. 21–28.
8. Baranov S. Logic and System Desing of Digital Systems. Tallinn, 2008. 267 p.
9. Sklyarov V., Sklyarova I., Barkalov A., Titarenko L. Synthesis and Optimization of FPGA – based Systems. Berlin, 2014. 432 p.
10. Склярова И., Скляров В. Аппаратные ускорители на базе FPGA. Конспект лекций по электротехнике. Springer Nature Switzerland. 2019. P. 566. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20721-2_2.
11. Описание САПР Quartus II. Основные этапы проектирования СБИС ПЛ – Формирователь OFDM сигнала на плис стандарта 802.16d. URL: <http://www.tnu.in.ua/study/refs/d79/file156314.html> (дата звернення: 20.02.2020).
12. Иванец С., Зубань Ю., Казимир В., Литвинов В. Проектування комп'ютерних систем на основі мікросхем програмованої логіки. Суми, 2007. 312 с.
13. Altera documentation. 2018. URL: www.altera.com/support/literature/lit-index.html (дата звернення: 20.02.2020).
14. Краткий курс HDL. Часть 11. Асинхронные частоты, пересечение клоковых доменов и синхронизация URL: https://www.kit-e.ru/articles/circuit/2009_02_102.php (дата звернення: 20.02.2020).
15. Баркалов А.А., Титаренко Л.А., Зеленева И.Я., Грушко С.С. Исследование автомата с программируемой логикой в составе цифровой информационно-управляющей системы на FPGA (Research of the Finite State Machine with Programmable Logic as a Part of Digital Information and Control System based on FPGA). *Проблемы региональной энергетики (Problemele energeticii regionale) (специальный выпуск)*. 2019. № 1–2. С. 36–45.

Golub T.V., Zeleneva I.Ya., Hrushko S.S., Pavlishyn M.A. THE SUBSYSTEM OF HARDWARE ACCELERATION OF TEXT CLASSIFICATION IN THE FPGA BASIS

Computer tools in the field of natural language processing and particularly in the problems of text classification, are used quite intensively in our time. The actual goal of research in this area is to accelerate the classification process of text documents quite significantly. One way to solve such problems is hardware acceleration, that is, the transfer of part of the computational functions from the software domain to the hardware implementation. The paper proposes a method of hardware acceleration for the process of text documents classifying based on the principles of the naive Bayes method. The process of hardware classification is studied on the example of four input arrays that contain codes of words from different texts. To determine a specific topic, an array of relevant keywords is used that were previously encoded in the same way as the input arrays.

The problem is solved in the modern hardware basis of FPGA by parallelizing computations within a single chip. The developed hardware subsystem for acceleration of classification provides the possibility of parallel processing of several texts, as well as scalability and reprogramming, that is, settings for a given topic. The algorithm of operation and the structural diagram of a hardware accelerator is given, as well as a description of the functioning logic for each of the main components is given.

In order to test the designed device in the basis of widespread use, Altera / Intel FPGAs and the VHDL hardware description language were selected. To implement the project, the IDE Quartus II was selected, which corresponds to the products of the microcircuit manufacturer. The analysis of the time and hardware characteristics of the device due to its implementation on FPGAs from Altera / Intel in various price ranges is performed. Recommendations on the choice of microcircuit are formulated for the effective implementation of the accelerator according to the criterion of the “price / quality” ratio. Promising areas for further search of solutions in the field of hardware acceleration for text classification process are identified.

Key words: hardware parallelization of calculations, FPGA, LUT, embedded memory, text classification.

Грабар О.І.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Лисогор Ю.І.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Скачков В.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВІЗУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ СОРТІВ РОСЛИН ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВЕБСЕРВІСУ

Основна мета полягає у проєктуванні, розробленні й створенні вебсервісу для розпізнавання рослин за зображенням. Високоякісне розпізнавання зображень рослин – складне завдання для комп'ютера через нерівномірний вигляд і складну структуру рослин. Розглядається стан сучасного машинного навчання та задачі розпізнавання від ідентифікації конкретних органів рослини до загального розпізнавання всієї рослини «в дикій природі». З боку машинного навчання, розпізнавання рослин є дрібнозернистим класифікаційним завданням із високою мінливістю між класами й часто малими міжкласовими відмінностями, які пов'язані з таксономічною ієрархічною класифікацією. Для опису текстури незалежно від розміру візерунка й орієнтації на зображенні необхідно мати інваріантний опис для обертання та масштабу. Для практичного застосування також потрібне ефективне обчислення. Нижче наведено декілька методів для розпізнавання текстур. Показано локальне подвійне зображення та гістограма Фур'є, що описується на основі локальних двійкових шаблонів. Функції Фур'є та гістограми локальних двійкових шаблонів (LBP) можна узагальнити на будь-який набір рівномірних візерунків. У першому випадку використовується опис LBP-HF-SM, де для побудови дескриптора розраховуються функції Фур'є-гістограми як знаків, так і величини-LBP. Величина-LBP перевіряє, чи величина різниці сусіднього пікселя відносно центрального пікселя перевищує порогове значення t_p . У глибоких навчальних завданнях є поширеною практикою навчання декількох мереж на різних підмножинах навчальних даних. Об'єднання таких мереж зазвичай відбувається за допомогою простого механізму й прагне перевершити індивідуальні мережі. Визначення видів рослин із фотографій із використанням текстурного визнання за допомогою сучасних методів дає можливість досягти досить хороших результатів, водночас зберігаючи обчислювальні вимоги, що робить його придатним для обробки в реальному часі для створення вебсервісу.

Ключові слова: машинне навчання, розпізнавання, вебсервіс, полярні перетворення Фур'є, метадані, нейронна мережа.

Постановка проблеми. Інтерес до методів візуальної класифікації рослин стрімко виріс в останній час. Це пов'язано з глобальним розповсюдженням пристроїв, оснащених камерами, й розвитку вебсервісів у глобальній мережі. Саме розпізнавання рослин розглядалось, майже без винятків, як розпізнавання фотографій, що зображують виключно певний організм рослини, такий як квітка, кора, плід, лист або їхня комбінація.

Розпізнавання листів стало найпопулярнішим підходом до розпізнавання рослин, і в літературі зазначено широкий спектр таких досліджень. Розпізнавання листя зазвичай стосується лише визнання широких листів, голки розглядаються окремо. Для опису листів було запропоновано декілька прийомів, які часто ґрунтуються на об'єднаних

рисах різного характеру (особливості форми, особливості кольорів тощо).

Одним із хороших алгоритмів для розпізнавання листів є SIFT (Scale-invariant feature transform), методи геометричних особливостей, моментних інваріантів, моментів зерен і полярних перетворень Фур'є.

Аналіз останніх досліджень і публікацій у міжнародній літературі показав, що одним із найкращих із практичних рішень за останні роки являються дослідження Н. Кумара й співавторів [1], які описали алгоритми та розробили Leafsnap – комп'ютерну систему зору для автоматичної ідентифікації видів рослин, що була розроблена за допомогою більш ранньої системи ідентифікації рослин від Agarwaletal [3] та Belhumeural

[2]. Авторами [1] було представлено попередній фільтр на входних зображеннях, численні прискорення та додаткові постобробки в алгоритмі сегментації, використання простіших й ефективніших алгоритмів розпізнавання на основі кривини. По базі даних Leafsnap зі 184 порід дерев система розпізнавання знаходить правильні збіги серед перших 5 результатів для 96,8% запитів із набору даних.

Інша група вчених – С.Г. Ву й співавтори [4] – запропонувала імовірнісну нейронну мережу для розпізнавання листів із використанням 12 цифрових морфологічних ознак, отриманих із 5 основних рис: діаметр, фізіологічна довжина, фізіологічна ширина, площа листа, периметр листа. Автори зібрали загальнодоступну базу рослинних листів «Flavia» [4].

Розпізнавання рослин, що дають декілька зображень різних типів змісту, таких як різні органи рослини чи рослина, в принципі, повинні бути більш надійними, ніж розпізнавання лише одним зображенням одного конкретного органу рослини, такого як лист або кора. Однак завдання складніше, якщо надається зображення не визначеного органу рослини.

Існує проблема відкритого розпізнавання, тобто проблема, в якій система розпізнавання повинна бути надійною для відомих і невідомих категорій. Кожне зображення в задачі належить до одного з 7 типів контенту: лист, сканування листів, квітка, фрукти, стебло або ціла рослина. Хоча тип змісту доступний у метаданих, найкращі результати розрахунку використовують однакові глибинні мережі для всіх типів змісту [5–7]. Z. Ge й співавтори [8] показали, що в цьому завданні загальні функції ConvolutionalNeuralNetwork (далі – CNN) виконують краще, ніж контент специфічні функції CNN, і що їхнє поєднання підвищує точність. S. Choi [7] показав, що мікшування кількох універсальних CNN-підписів покращує точність, а також виграє ChallengePlantCLEF 2015.

Pl@ntNet [9] – це інша система розпізнавання рослин на основі змісту. Це спільна інформаційна система, що забезпечує програму для обміну фотографіями й пошуку для ідентифікації установок. Вона була розроблена вченими чотирьох французьких дослідницьких організацій (Cirad, INRA, INRIA й IRD) і мережі TelaBotanica. База даних дерева ідентифікується шляхом поєднання інформації із зображеннями середовища існування, квітки, фруктів, листя та кори. Точні алгоритми, що використовуються в вебслужбі визначення Pl@ntNet [10], не задокументовані публічно. Існує

також мобільний додаток Pl@ntNet [11], програма для обміну й отримання зображень для ідентифікації рослин.

Текстурна інформація є важливою ознакою для розпізнавання багатьох органів рослин. Текстурний аналіз є усталеною проблемою з великою кількістю наявних методів, багато з яких були описані в оглядах [12–15]. Саму текстуру важко визначити. Є різні визначення візуальної текстури, але вони часто не мають формальності й повноти. Так, за визначенням Дж.К. Хокінса [16], поняття текстури залежить від трьох інгредієнтів:

- 1) місцевий порядок повторюється на великому в порівнянні з розміром рослини об'ємі;
- 2) порядок полягає в не випадковому розташуванні елементарних частин;
- 3) частини є приблизно однорідними об'єктами, що мають однакові розміри в текстурованому об'ємі.

Кілька недавніх підходів до розпізнавання текстури відрізняються відмінними результатами в стандартних наборах даних, багато з яких працюють лише з інтенсивністю зображення та ігнорують доступну інформацію про кольори. Ряд підходів базується на популярних локальних подвійних патернах (LBP) [17; 18], таких як недавні паралельні обертання інваріантних локальних шаблонів двійника (X. Qi та інші [19]) або особливості Фур'є-гістограми (Т. Ахонен і співавтори [20; 21]).

Глибинні згорткові нейронні мережі (CNNs) досягли ряду завдань комп'ютерного зосередження, зокрема тих, що пов'язані зі складним розпізнаванням і виявленням об'єктів із великими базами даних навчальних зображень. К. Сегеді й співавтори [22] вивчають шляхи ефективного розширення мереж шляхом факторизованих згортоків й агресивної регуляризації. Їхнє вивчення виконується на мережах початкового стилю (тобто мережах з архітектурами, аналогічними GoogleNet). Вони пропонують так звану архітектуру Inception v3. Крім того, К. Сегеді й співавтори показують, що тренування із залишковими з'єднаннями значно прискорюють підготовку мереж початкових операцій, а залишкові мережі початкових показників можуть перевершувати аналогічно дорогі мережі початківців без залишкових зв'язків за тонкого поля.

Постановка завдання дослідження полягає в описі текстури незалежно від розміру візерунка рослини й орієнтації на зображенні. Необхідний опис, інваріантний для обертання та масштабу для практичного застосування в режимі реального часу для розробки вебсервісу. Також потрібне ефективне обчислення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нижче приведемо декілька методів для розпізнавання текстур.

Використовується локальне подвійне зображення та гистограма Фур'є. Перше описується на основі локальних двійкових шаблонів (LBP). Загальний оператор LBP локально обчислює ознаки відмінностей між центральним пікселем і його P сусідів по колу радіуса R . З функцією зображення $f(x, y)$ та точками координат точки (x_p, y_p) :

$$LBP_{p,r}(x, y) = \sum_{p=0}^{P-1} s(f(x, y) - f(x_p, y_p)) 2^p, s(z) = \begin{cases} 1 & \text{if } z \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Для досягнення інваріантності обертання ми приймаємо так звані Фур'є-функції гистограми LBP (LBP-HF), представлені Ahonen et al. LBP-HF описують гистограму рівномірних візерунків, використовуючи коефіцієнти дискретного перетворення Фур'є (DFT). Уніфіковані LBP – це шаблони з максимум двома просторовими переходами (побітові 0–1 зміни). На відміну від простих інваріантів обертання з використанням LBP, яке об'єднує всі однорідні візерунки з таким самим числом 1s в один контейнер, функції LBP-HF зберігають інформацію про відносне обертання шаблонів.

Позначення рівномірної картини $U_p^{n,r}$, де n – це число «орбіти», що відповідає кількості бітів «1», а r – обертання шаблону, DFT для заданого n виражається як:

$$H(n, u) = \sum_{r=0}^{P-1} h_r(U_p^{n,r}) e^{-2\pi i u r}, \quad (2)$$

де значення гистограми $h_r(U_p^{n,r})$ позначає кількість входжень рівномірного малюнка на зображенні. Функції LBP-HF дорівнюють абсолютному значенню величин DFT, і тому на них не впливає фазовий зсув, викликаний поворотом.

$$LBP - HF(n, u) = |H(n, u)| = \sqrt{H(n, u) \overline{H(n, u)}}, \quad (3)$$

Так, h_r реальні, $H(p, y) = \overline{H(p, P - y)}$ для $y = (1, \dots, P - 1)$, і тому тільки $\lfloor \frac{P}{2} \rfloor + 1$ від DFT магнітуди використовуються для кожного набору рівномірних візерунків з n «1» біт при $0 < n < P$. Три резус-представлення додається до трьох інших контейнерів, а саме: два для «1-рівномірних» візерунків (з усіма контейнерами одного значення) та одне для всіх неоднорідних візерунків.

Функції Фур'є та гистограми LBP можна узагальнити на будь-який набір рівномірних візерунків. У першому випадку використовується опис LBP-HF-SM, де для побудови дескриптора розраховуються функції Фур'є-гистограми як знаків, так і величини-LBP. Величина-LBP перевіряє, чи величина різниці сусіднього пікселя (x_p, y_p) відносно центрального пікселя (x, y) перевищує порогове значення t_p :

$$LBP - M_{p,r}(x, y) = \sum_{p=0}^{P-1} s(|f(x, y) - f(x_p, y_p)| - t_p) 2^p, \quad (4)$$

Прийнято загальну практику вибору порогового значення (для сусідів на p біт) як середнє значення всіх абсолютних різниць m у всьому зображенні:

$$t_p = \sum_{i=1}^m \frac{|f(x, y) - f(x_{ip}, y_{ip})|}{m}, \quad (5)$$

Гистограма LBP-HF-SM створюється шляхом об'єднання гистограм LBP-HF-S і LBP-HF-M (обчислено з рівномірного знаку-LBP і величини-LBP).

Для додавання інваріантів обертання функції LBP-HF, які використовуються в запропонованому описі, зазвичай будуються з DFT величини різномірних рівномірних візерунків. Можна використовувати всі LBP, а не тільки підмножину уніфікованих візерунків. У такому випадку деякі орбіти мають меншу кількість моделей, оскільки деякі неоднорідні шаблони демонструють симетрії. Шаблони на одній орбіті відрізняються лише за обертком. Інші інваріанти обертання обчислюються з перших коефіцієнтів DFT для кожної орбіти:

$$LBP - HF^+ = \sqrt{H(n, 1) \overline{H(n+1, 1)}}, \quad (6)$$

F^+ позначає метод, що використовує повний набір моделей для функцій LBP-HF і додавання додаткових функцій LBP-HF⁺.

Для визначення сегментових текстурних об'єктів можна розширити F^+ до сегментованих текстурних об'єктів, обробляючи кордон й інтер'єр об'єктного сегмента окремо. Якщо розглянути ділянку сегментованих об'єктів A , то можна описати лише ті точки, які мають всі сусіди в певній шкалі всередині A . Показано, що опис правильно сегментованих кордонів, тобто точки в A з одним або декількома сусідами поза A (див. рис. 1), додає додаткову дискримінаційну інформацію.

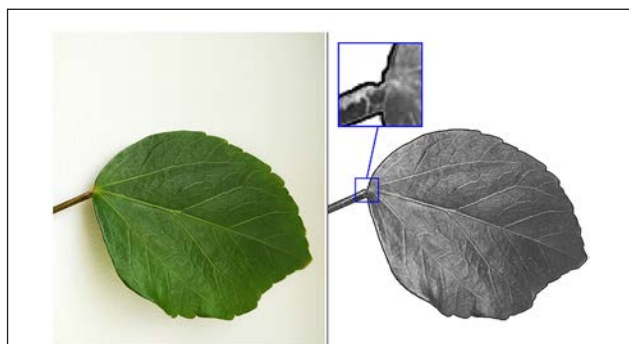


Рис. 1. Сегментація зображення листа (сірого кольору) й прикордонного регіону (чорного кольору) в різних масштабах за даними LBP радіусом R . Прикордонний регіон листа визначається як всі точки, які мають принаймні одного сусіда (у LBP, R) поза сегментованою областю

Було проведено експерименти з 5 варіантами способу розпізнавання, що відрізняються при обробці прикордонного регіону:

1. Описує всі пікселі в A та максимізує оцінку задньої імовірності (тобто імовірнісний вихід SVM Platt) над усіма n -рівнями шкали.

2. Описує лише сегмент інтер'єру, тобто пікселі в A з усіма сусідами в A .

3. Описує лише межу сегмента, тобто пікселі в A з принаймні одним сусідом поза A .

4. Перший $_{ib\Sigma}$ поєднує в собі опис F_{first_i} та F_{first_b} і максимізує суму їхніх оцінок задньої вірогідності над n_{conc} шкалами.

5. Перший $_{ib\Pi}$ поєднує в собі опис F_{first_i} та F_{first_b} і максимізує продукт своїх оцінок задньої вірогідності над n_{conc} шкалами.

Висновки. У глибинних навчальних завданнях є поширеною практикою навчання декількох мереж на різних (але не обов'язково несумісних) підмножинах навчальних даних. Визначення видів рослин із фотографій із використанням текстурного визнання за допомогою сучасних методів дає можливість досягти досить хороших результатів, водночас зберігаючи обчислювальні вимоги невеликими. Це робить його придатним для обробки в реальному часі й дає змогу розробити вебсервіс для мобільного пристосування.

Список літератури:

1. Kumar N., Belhumeur P.N., Biswas A., Jacobs D.W., Kress W.J., Lopez I.C., et al. Leafsnap: a computer vision system for automatic plant species identification. *Computervision–ECCV*. Springer, 2012. P. 502–516.
2. Belhumeur P.N., Chen D., Feiner S., Jacobs D.W., Kress W.J., Ling H., et al. Searching the world's herbaria: a system for visual identification of plantspecies. *Computervision–ECCV*. Springer, 2008. P. 116–29.
3. Agarwal G., Belhumeur P., Feiner S., Jacobs D., Kress W.J., Ramamoorthi R., et al. First steps toward an electronic field guide for plants. *Taxon*. 2006. № 55 (3). P. 597–610.
4. Wu S.G., Bao F.S., Xu E.Y., Wang Y.X., Chang Y.F., Xiang Q.L. A leaf recognition algorithm for plant classification using probabilistic neural network. *IEEE international symposium on signal processing and information technology*, 2007. IEEE, 2007. P. 11–16.
5. Hang S.T., Tatsuma A., Aono M. Bluefield (KDE TUT) at Life CLEF 2016 plant identification task. *Working notes of CLEF 2016 : conference and labs of thee valuation forum*, 2016. 10 p.
6. Ghazi M.M., Yanikoglu B., Aptoula E. Open-set plant identification using an ensemble of deep convolutional neural networks. *Working notes of CLEF 2016 : conference and labs of thee valuation forum*, 2016. 7 p.
7. Choi S. Plant identification with deep convolutional neural network: SNU Medinfoat LifeCLEF plant identification task 2015. *Working notes of CLEF 2015 : conference and labs of thee valuation forum*, Toulouse, September 8–11, 2015. CEUR-WS, 2015.
8. Ge Z., McCool C., Sanderson C., Corke P. Content specific feature learning for fine-grained plant classification. *Working notes of CLEF 2015 : conference and labs of thee valuation forum*, Toulouse, September 8–11, 2015. CEUR-WS, 2015.
9. Barthélémy D., Boujemaa N., Mathieu D., Molino J.F., Bonnet P., Encficiaud R., et al. *ThePl@ntNet project: a computational plant identification and collaborative information system* : Tech. Rep. XIII World forestry congress, 2009.
10. Pl@ntNet-identify webservice. URL: <http://identify.plantnet-project.org/en/> (дата звернення: 14.12.2017).
11. Goëau H., Bonnet P., Joly A., Bakić V., Barbe J., Yahiaoui I., et al. Pl@nt net mobile app. *Proceedings of the 21st acminternational conference on multimedia*. ACM, 2013. P. 423–424.
12. Zhang J., Tan T. Brief review of invariant texture analysis methods. *PatternRecogn.* 2002. № 35 (3). P. 735–747. DOI: 10.1016/S0031-3203(01)00074-7.
13. Mirmehdi M., Xie X., Suri J. Handbook of texture analysis. London : ImperialCollegePress, 2009.
14. ChenCh, Pau L.F., WangPsp. Handbook of pattern recognition and computervision. Singapore : WorldScientific, 2010.
15. Pietikäinen M. Texturerecognition. *Computer vision: a reference guide* / editor K. Ikeuchi. Springer, 2014. P. 789–793.

16. Hawkins J.K. Textural properties for pattern recognition. *Picture processing and psychopictorics* / editor B.S. Lipkin. Elsevier, 1970. P. 347–370.
17. Ojala T., Pietikainen M., Harwood D. Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions. *Proceedings of IAPR*. Vol. 1. 1994. P. 582–585.
18. Ojala T., Pietikainen M., Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions. *PatternRecogn.* 1996. № 29 (1). P. 51–59. DOI: 10.1016/0031-3203(95)00067-4.
19. Qi X., Xiao R., Guo J., Zhang L. Pair wiserotation in variant co-occurrence local binary pattern. *Computervision—ECCV 2012*. Springer, 2012. P. 158–171.
20. Ahonen T., Matas J., He C., Pietikainen M. Rotation in variant image description with local binary pattern histogram Fourier features. *Proceedings of SCIA '09*. Springer-Verlag, 2009. P. 61–70.
21. Zhao G., Ahonen T., Matas J., Pietikainen M. Rotation-invariant image and video description with local binary pattern features. *IEEE TransImageProcess.* 2012. № 21 (4). P. 1465–1477.
22. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computervision. 2015.

Grabar O.I., Lysogor Yu.I., Skachkov V.O. ANALYSIS OF ALGORITHMS OF VISUAL SYSTEM RECOGNITION SORTS OF PLANTS FOR DEVELOPMENT THE WEB-SERVICE

The main objective is to create a web service for plant recognition by image. High-quality artificial of plants perception is a difficult task for a computer through a various kind and difficult structure of plants. The state of modern machine studies and task of recognition is examined from authentication of concrete organs of plant to general recognition all the plants “in the wild nature”. From the point of view of machine studies, recognition of plants is a fine-grained classification task with high change ability between classes and often small interclass differences that is related to taxonomical hierarchical classification. For description of texture regardless of size a pattern and orientation dark-and-light, it is necessary to have invariant description for a rotation and scale. For practical application an effective calculation is also needed. A few methods are below given for recognition of textures. It is shown a local double image and histogram of Fourier that is described on the basis of local binary templates (LBP). The functions of Fourier and histograms of LBP can be generalized on any set of even patterns. Description of LBP is used in first case – HF – SM, where for the construction of descriptor the functions of Fourier settle accounts histograms of both signs and size-of LBP. Size of-LBP checks, or the size of difference of nearby pixel in relation to a central pixel exceeds the threshold value of $t p$: In deep educational tasks is widespread practice of studies of a few networks on the different subsets of educational data. Association of such networks, usually combine by means of simple mechanism and aims to surpass individual networks. Determination of types of plants from photos with the use of texture confession by means of modern methods gives to attain good results sufficiently, here keeping calculable requirements small, that does him suitable for treatment real-time.

Key words: machine studies, recognition, web-service, polar transformations of Fourier, meta data, neural network.

Доля К.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Доля О.Є.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ МІЖМІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі було розглянуто питання дослідження основи системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень. Встановлено, що системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень не ізольовані. Цим зумовлюється вплив середовища на кількісні показники параметрів функціонування таких систем, що відбувається завдяки можливості кількісних змін вхідних у систему параметрів. Визначено, що сучасний стан наукових підходів не повною мірою враховує взаємозв'язок елементів системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень під час розрахунку базових параметрів функціонування такої системи. Доведено, що питання подальшого розвитку наукових підходів щодо особливостей урахування взаємного впливу кількісних характеристик елементів системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень актуальне й підлягає дослідженню. Проведеним аналізом наукових підходів до обґрунтування теоретичних основ систем міжміських пасажирських маршрутних перевезень встановлено, що нині процес функціонування визначених перевезень не повною мірою враховує комплексність взаємозв'язків базових характеристик таких систем та їхнього взаємного впливу. Водночас підсистеми міжміських пасажирських маршрутних перевезень не ізольовані в загальному середовищі, й показники їхнього функціонування взаємозалежні, а теоретичні основи дослідження закономірностей функціонування системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень мають базуватися на наукових підходах, що враховують зміни вхідних у цю систему параметрів. Визначено, що сучасний стан розвитку наукових підходів до питання врахування взаємного впливу кількісних характеристик елементів системи міжміських пасажирських маршрутних перевезень актуальний і може позитивно вплинути на розвиток сучасної науки й практики.

Ключові слова: транспортна система, маршрут міжміського пасажирського транспорту, базові параметри перевезень, ефективність, модель.

Постановка проблеми. Питання прогнозування показників функціонування пасажирських міжміських транспортних систем розглянуто багатьма науковцями. У своїй праці [1] науковець розглядає останні тенденції в області пасажирських перевезень на далекі відстані в Європі. Мета полягає в тому, щоб дослідити, чи можливо визначити деякі перші ознаки піка поїздок на далекі відстані, і якщо так, то які можуть бути варіанти дій послідовної політики. Для простоти враховуються тільки автомобільні й повітряні способи пасажироперевезення. В роботах [2; 3] викладено сучасну наукову думку щодо планування транспортної мережі. Розглянуто, що планування транспортної мережі визначає форму транспортних мереж і характеристики мережевих елементів. Прикладами таких характеристик, на думку авторів [2; 3] є вирівнювання, швидкість, кількість смуг і тип керування на перехрестях. Планувальники транспорту розширюють наявну

мережу або змінюють характеристики чинного мережевого елемента або цілий розділ мережі.

На думку авторів робіт [2–6], доцільне врахування таких показників роботи пасажирських маршрутних систем, що спричиняють вплив на навколишнє середовище й відповідність чинної політики країн щодо їхнього вирішення. Робота зосереджена на автомобільних і повітряних перевезеннях, оскільки вони визначають основну частину впливів на навколишнє середовище розвинутих країн, принаймні з боку викидів парникових газів. Крім того, проїзд на автомобілі зберігає найбільшу частку загальної кількості поїздок, а авіаперевезення є динамічнішим в Європі режимом, що обґрунтовує увагу до обох режимів. Обговорюються перспективи досягнення максимального або «плато» для поїздок на великі відстані, виходячи з того, що в багатьох країнах Європи існують надійні докази, що свідчать про високі показники, хоча й неприємні

з боку сталого розвитку. Щодо авіаперевезень, основним викликом для забезпечення стабільності є стійке зростання попиту, зумовлене стратегією багатьох аеропортів і авіакомпаній, спрямованою на збільшення попиту на низькі тарифи. На думку авторів робіт [3; 4], обидві тенденції потребують дій урядів. Потреба в акціях більш виправдана двома соціально-економічними тенденціями: населення, яке зосереджене саме на тих країнах, які мають більші моделі довгострокової мобільності, й наявний дохід, тобто середні показники стагнації протягом багатьох років. Перша приведе до необхідності здійснення заходів з управління попитом, зосереджуючи увагу на країнах з вищим попитом. Остання кине виклик традиційному розумінню, який пов'язує потреби міжміського транспорту в збільшенні доходів і економічному процвітанні.

Спільною концепцією планування дорожньої мережі є структура доріг залежно від функції дороги [7–9]. Дороги з великою часткою дорожнього руху, що зв'язують далекі або важливі місця, мають іншу функцію, ніж міські основні дороги або міські під'їзні шляхи. Це приводить до питомої щільності мережі й конструктивних характеристик. Планування мережевих транспортних складників, таким чином, визначає форму мережі не тільки шляхом додавання нової мережі, але й головним чином призначаючи функцію дороги, яка впливає на дорожній проєкт [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [3; 5] авторами визначено, що модель повітряної транспортної мережі, а також дані про повітряний рух розглядаються як одне з найпростіших критеріїв оцінки стану розвитку світової міської мережі.

Представлені в роботі [4] гравітаційні моделі можуть бути використані для прогнозування обсягу пасажирів між містами. Моделі використовують в основному гео економічні змінні як незалежні фактори.

Авторами роботи [7] розглянуто модель (1) для визначення привабливості авіаційного транспорту на основі методу розрахунку найбільшого числа міст, які будуть з'єднані авіарейсами:

$$F^i = \sum \left[Q_{\text{бп}} / \exp(k_L \times T_{ij}) \right], \quad (1)$$

де F^i – фактор привабливості i -го регіону для вираження кількості потенційних пасажирів, які ймовірно приїхали в місто i із міста j ;

$Q_{\text{бп}}$ – кількість пасажирів, які бажають здійснити поїздку;

k_L – коефіцієнт опору кореспонденції від L ;

j – місце прибуття;

$T_{\text{сер}ij}$ – середній тариф поїздки між містами i та j .

$$Q_{\text{бп}} = \frac{d}{1 - be^{-cy}}, \quad (2)$$

де b, c, d – параметри, які оцінені на основі історичних даних.

$$k_L = \ln \left(\frac{H_{ij}}{H_{ej} H_{nj}} \right) / T_{\text{сер}ij}, \quad (3)$$

де H_{ij} – кількість кореспонденції з i в j ;

H_{ei} – кількість відправлень з i -го району чи ємність району j за відправленнями;

H_{nj} – кількість прибуттів у район i чи ємність району j по прибуттях.

$$T_{ij} = \sum_{n=N} S_{ji}^{n_{\text{авіо}}} \cdot (T_{\text{сер}ij} + C_{\text{тс}} \cdot V_{\text{поїзд}}), \quad (4)$$

де n – кількість авіаперевізників;

$S_{ji}^{n_{\text{авіо}}}$ – частка ринку, зайнятого $n_{\text{авіо}}$ під час виконання сполучень між містами i та j ;

$V_{\text{поїзд}}$ – час поїздки в точку знаходження на маршруті;

$C_{\text{тс}}$ – тимчасова вартість повітряного транспорту.

Авторами роботи [8] запропоновано новий метод прогнозування повітряних пасажирських потоків на глобальному рівні з використанням соціально-економічної картини. Метод складається з двох етапів: прогнозування топології вихідної та кінцевої точки мережі попиту; прогнозування кількості пасажирів на наявних і нових з'єднаннях. Теорія мереж застосовується для імітації з'єднання попиту між містами з використанням алгоритмів на основі зваженої подібності. Число пасажирів визначається за допомогою кількісних аналогій. Математична інтерпретація розрахунку найкоротшої відстані l_{mij} між парами міст у розрахунковому і базовому році представлена таким чином (5):

$$\min_{1 \leq y \leq m} l_{ij} = \sqrt{(i_1 - j_1)^2 + (i_1 - j_2)^2 + \dots + (i_n - j_n)^2}, \quad (5)$$

де l_{mij} – загальна довжина маршруту між початковою i та кінцевою j точками руху;

i_n – умова n міської пари x впродовж прогнозованого періоду;

j_n – вираження стану n міста пари x в прогнозованому періоді;

m – кількість зв'язків в базисному році;

u – стан міста n пари x в прогнозованому періоді.

Для прогнозів підключення гравітаційна модель Ньютона була прийнята для визначення привабливості між парами міст. Рівняння (6) представляє залежність між двома масами, зменшену на відстань між ними.

$$F_{ij} = \frac{m_i * m_j}{l_{ij}^2} * G, \quad (6)$$

де F_{ij} – сила тяжіння між тілами i та j ;

m_i, m_j – маси тіл i та j ;

G – гравітаційна стала.

У рамках попереднього розрахунку ця гравітаційна постійна дорівнює 1 для кожного міста. На основі цього рівняння привабливість між містами представлена через адаптовану модель гравітації (7):

$$F_i = \frac{VVP_i * H_{mi} * VVP_j * H_{mj}}{(l_{m ij} * T_{серij})^2}, \quad (7)$$

де F_i – фактор привабливості i -го району для вираження кількості потенційних пасажирів, що можливо приїхали в місто i із міста j ;

VVP_i, VVP_j – внутрішній валовий продукт міст i та j відповідно, в парі x ;

H_{mi}, H_{mj} – кількість жителів в місті i та j відповідно;

$T_{серij}$ – середня вартість поїздки між містом i та j .

Для розрахунку кількості пасажирів на дугах маршрутної мережі кількісний підхід (3) був адаптований у (8):

$$Q_{Дij} = \sqrt{(VVP_{ix} - VVP_{my})^2 + (VVP_{jx} - VVP_{ny})^2 + (H_{mix} - H_{my})^2 + (H_{mjx} - H_{mny})^2 + (T_{серix} - T_{серiy})^2 + (l_{m iix} - l_{m iyy})^2}, \quad (8)$$

де $Q_{Дij}$ – кількість пасажирів на дугах маршрутної мережі;

X_{ij} – міста в прогнозованому році пари x ;

$Y_{m,n}$ – міста в базисному році пари.

Авторами роботи [9] запропоновано прогнозування кількості пасажирів на авіаційному транспорті з використанням методів гравітаційного моделювання. На думку авторів, модель (9) підходить для прогнозування обсягу пасажирських перевезень між містами i та j .

$$H_{ij} = \kappa \cdot \frac{(f_i f_j)^{Pr}}{l_M^{\Phi_{mp}}}, \quad (9)$$

де H_{ij} – обсяг пасажирських перевезень між містами i та j ($i \neq j$);

f_i, f_j – фактори привабливості для міст i та j ;

l_M – загальна довжина маршруту між початковим і кінцевим пунктами маршруту;

κ – константа;

Φ_{mp} – коефіцієнт користування транспортом;

p_j – параметр привабливості для поїздки.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в проведенні розрахунків параметрів функціонування міжміських пасажирських маршрутних транспортних систем.

Об'єкт дослідження – пасажирські маршрути міжобласного сполучення.

Методи дослідження: системного аналізу під час аналізу сучасних наукових підходів у розв'язанні задач.

Викладення основного матеріалу. Запропоновані підходи до розрахунку базових показників ефективності функціонування міжміських пасажирських перевезень дозволяють сформулювати основні етапи проведення розрахунків для визначення параметрів:

I етап – розподіл обсягів перевезень пасажирів між автомобільною та залізничною маршрутними системами;

II етап – дослідження матриць найкоротших відстаней у мережах;

III етап – дослідження матриць пасажирських транспортних кореспонденцій між вузлами мереж;

IV – розгляд базових показників функціонування маршрутних мереж, а саме: кількість пересувань в мережі – P , (од); обсягу перевезень – Q , (пас.); коефіцієнту пересаджуваності – $k_{пер.}$; транспортної роботи – W , (пас./км.); середньої дальності маршрутної поїздки – $l_{сер.м.}$ (км.); середньої дальності мережної поїздки – $l_{сер.мер.}$ (км.); коефіцієнту середньо системного використання пасажиромісткості; потрібної кількості автобусів/вагонів – A , (од.).

Проведені розрахунки для визначення впливу середньо системного коефіцієнту використання пасажиромісткості вхідного ($k'_{сал.мер.вх.}$) в маршрутній мережі на автомобільному й залізничному видах транспорту на базові показники функціонування, а саме: кількості пересувань пасажирів; обсягу перевезень; коефіцієнту пересаджуваності; транспортної роботи; середньої дальності маршрутної поїздки, середньої дальності мережної поїздки; середньо системного коефіцієнту використання пасажиромісткості й потрібної кількості транспортних засобів. Згідно з отриманими результатами розрахунків у програмному продукті Statistica визначено значення t-критерію Стьюдента (t-value), що дозволяє стверджувати про наявність статистичного зв'язку між значеннями середньо системного коефіцієнту використання

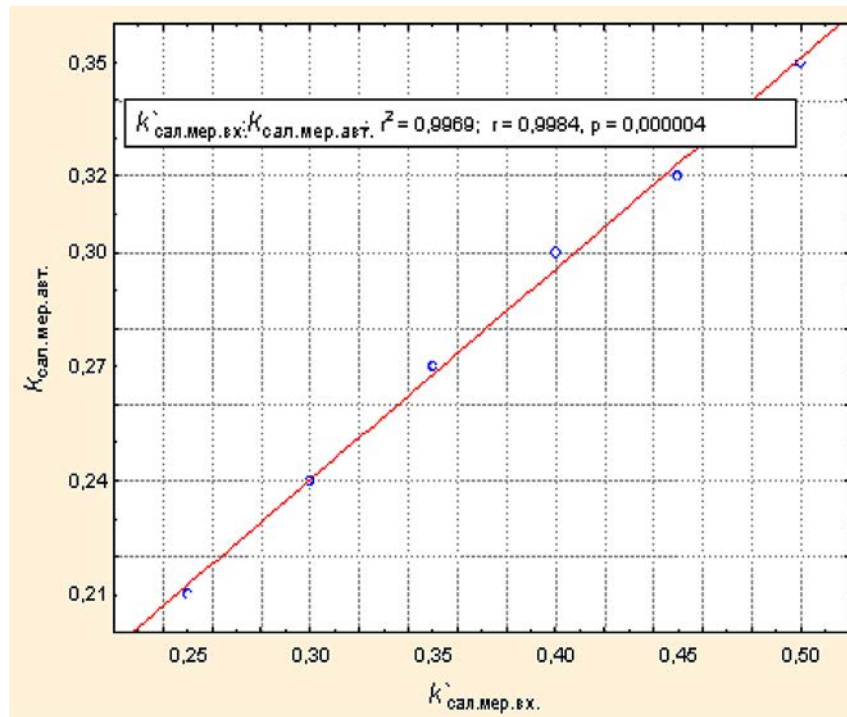


Рис. 1. Графік зміни середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості $k_{\text{сал.мер.авт.}}$ від $k_{\text{сал.мер.вх.}}$

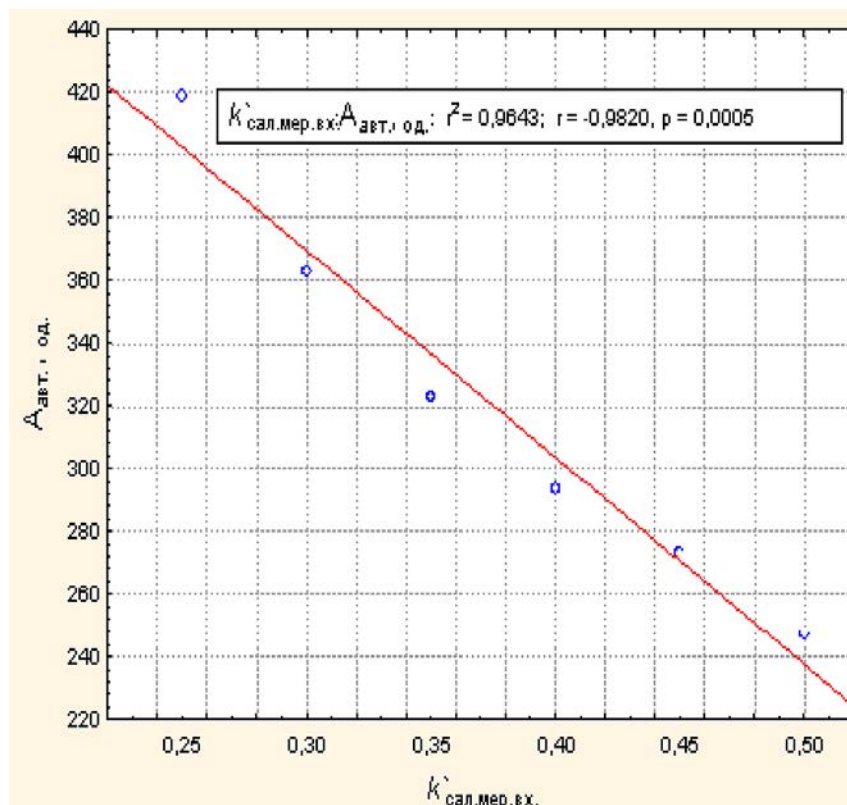


Рис. 2. Графік функції залежності кількості автобусів ($A_{\text{авт.}}$) від значень вхідного середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості ($k_{\text{сал.мер.вх.}}$)

пасажиромісткості вхідного ($k'_{\text{сал.мер.вх.}}$) та наведеними параметрами.

За отриманими результатами проведених розрахунків із використанням кількісних значень розрахованих базових показників функціонування мереж отримано можливість побудови графіків змін визначених параметрів і функцій для їхнього розрахунку.

У наведених таблицях висвітлено, що $P_{\text{авт.}}$; $Q_{\text{авт.}}$; $k_{\text{пер.}}$; $W_{\text{авт.}}$; $l_{\text{сер.м.авт.}}$ та $l_{\text{сер.мер.авт.}}$ є такими показниками функціонування автомобільної маршрутної мережі, які кількісно не залежать від $k'_{\text{сал.мер.вх.}}$.

На рис. 1 наведено графік зміни середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості – $k_{\text{сал.мер.авт.}}$ від значень вхідного середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості ($k'_{\text{сал.мер.вх.}}$) та залежність 10 для розрахунку $k_{\text{сал.мер.авт.}}$.

$$k_{\text{сал.мер.авт.}} = 0,0738 + 0,5543k'_{\text{сал.мер.авт.}}, \quad (10)$$

Визначимо функцію (11) залежності кількості автобусів ($A_{\text{авт.}}$) від значень вхідного середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості ($k'_{\text{сал.мер.вх.}}$) та побудуємо її графік (рис. 2).

$$A_{\text{авт.}} = 567,2867 - 659,2286k'_{\text{сал.мер.вх.}}, \quad (11)$$

Отримано результати розрахунків різниці між $A_{\text{авт.}}$ та $A'_{\text{авт.}}$ за запропонованою залежністю 11, визначено можливість розрахунку $A_{\text{авт.}}$ із відхиленням (3,06%), а також результати проведених розрахунків значень базових показників функціонування залізничної маршрутної мережі під час зміни середньо системного коефіцієнта використання пасажиромісткості вхідного ($k'_{\text{сал.мер.вх.}}$).

Висновки. Значення коефіцієнту використання пасажиромісткості, яким зумовлено рівень соціально-економічного розвитку суспільства, впливає на середньо системний коефіцієнт використання пасажиромісткості й кількість транспортних засобів.

Список літератури:

1. Dolya C.V. Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *SCIENCE & TECHNIQUE*. 2017. Т. 16. №. 5. P. 437–443.
2. Dolya C. et al. Influence of features of the transport network pattern on the haul cycle length between its nodes on the example of the transport network of Ukraine. *Technology audit and production reserves*. 2017. Т. 5. №. 2 (37). P. 54–58.
3. Gyulyev N., Dolia C. The Issue of Probability of Traffic Road Accident on the Elements of the Transport Network. *American Journal of Social Science Research*. 2017. Т. 3. №. 5. P. 17–24.
4. Dolia K. Influence of the Seasonal Factor on the Long-Distance Passenger Correspondence. *American Journal of Data Mining and Knowledge Discovery*. 2017. Т. 2. №. 4. P. 96–101.
5. Dolia K. et al. Modeling of polygons of maximum passenger route transport accessibility by the example of the transport system of Ukraine. *Technology audit and production reserves*. 2017. Т. 6. №. 2 (38). P. 28–33.
6. Dolia K. Variativity of the Transport System at Intercity Passenger Transport from the Demand. *International Journal of Data Science and Analysis*. 2017. Т. 3. №. 6. P. 77.
7. Dolia K. et al. Management of Freight Transport Projects in Cities in Assessing Their Effectiveness. *Software Engineering*. 2018. Т. 6. №. 2. P. 63.
8. Galkin A., Dolia C., Davidich N. THE ROLE OF CONSUMERS IN LOGISTICS SYSTEMS. *Transportation Research Procedia*. 2017. Т. 27. P. 1187–1194.
9. Galkin A., Dolya C. Influencing financial flows on logistics technology solutions (case study on transportation mode selection). *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*. 2017. Т. 117. P. 61–73.
10. Gyulyev N., Dolia K., Dolia O. Engineering Patterns of Changes in the Parameters of Functioning of Intercity Passenger Transportation System. *International Journal of Intelligent Information Systems*. 2019. Т. 7. №. 6. P. 48.

Dolia K., Dolia O.Ye. DETERMINATION OF THE GRAVITATIONAL MODEL AND ITS PARAMETERS FOR FORECASTING THE NUMBER OF VISITORS TO TRADE OBJECTS BY THE EXAMPLE OF KHARKOV

The paper examines the issues of studying the basis of intercity passenger route services. It is established that long-distance passenger transportation systems are not isolated. This determines the influence of the environment on the quantitative parameters of the parameters of the functioning of the data system, due to the possibility of quantitative changes to the parameters input. It is determined that the current state of the native approaches does not fully take into account the interconnection of the elements of the system of long-distance

passenger route transportation when calculating the basic parameters of the functioning of this system. It is proved that the issue of further development of scientific approaches regarding the peculiarities of taking into account the mutual influence of quantitative characteristics of elements of the system of intercity passenger route transportation is relevant and subject to research. The conducted analysis of scientific approaches to the substantiation of the theoretical foundations of systems of intercity passenger route services has established that the process of functioning of certain transportations does not fully take into account the complexity of interconnections of the basic characteristics of such systems and their mutual influence. In this case, subsystems of intercity passenger route transportation are not isolated in the general environment and the indicators of their operation are interdependent, and the theoretical basis for studying the basic laws of the functioning of the system of interurban passenger route transportation should be based on scientific approaches that take into account changes in the parameters input into this system. It is determined that the current state of the development of scientific approaches to the issue of taking into account the mutual influence of the quantitative characteristics of elements of the system of long-distance passenger route transportation is relevant and can positively affect the development of conventional science and practice.

Key words: *transport system, route intercity passenger transport, basic parameters of transportation, efficiency, model.*

УДК 621.039.56

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/14>**Єрмакова Д.Г.**

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В ТОПЦІ ПАРОВОГО КОТЛА

Стаття присвячена дослідженню процесів згоряння газоподібних палив зі змінним складом. Оптиміальні режими спалювання палива з боку обліку складу димових газів можуть бути в різних областях значень коефіцієнта надлишку повітря.

У статті підкреслюється, що всі автоматичні системи контролю економії процесу горіння враховують лише одну складову частину оптимізації процесу горіння та не можуть окремо забезпечити весь комплекс проблем, що виникає в процесі згоряння палива. У роботі розглядаються основні принципи підвищення якості й точності регулювання процесу спалювання газоподібних палив. Запропоновано розв'язання проблеми автоматичної оптимізації процесу спалювання палива в котельній установці.

У статті викладено наукові матеріали В. Котлера «Досвід компанії MitsuiBabcock щодо скорочення викидів оксидів азоту на електростанціях» і В. Бережного «Методи багатокритеріальної оптимізації». Зазначається, що під час спалювання органічного палива продукти згоряння в основному містять вуглець, водень, кисень, азот та їх оксиди.

Натепер метод для обчислення рівноважних концентрацій продуктів реакції, який може бути використаний для вивчення статистики процесу горіння, є найбільш повно розробленим для визначення сполуки продукту згоряння. На нашу думку, недоліком процесу горіння із застосуванням сигналу про концентрацію кисню в димових газах є поява значного перевищення концентрації кисню O₂ внаслідок значного ефекту відсмоктування повітря в котлі під час роботи з розведенням у печі.

Розв'язання поставлених завдань, крім економії палива, має й позитивні наслідки:

- підвищення ефективності котлоагрегату;
- зменшення платежів за викид шкідливих речовин в атмосферу;
- відсутність забруднення конвективних нагрівальних поверхонь;
- скорочення хімічних недопалків;
- зменшення втрат тепла від димових газів.

Підкреслюється, що створення сучасних систем управління базується на розробці й застосуванні адаптивних інтелектуальних систем, функціонування яких неможливе без використання розвинутої комп'ютерної мережі, включаючи персональні комп'ютери, мікроконтролери й широкий спектр Модулів вводу / виводу. Ускладнення технологічних процесів і галузей викликає проблему створення розподілених ієрархічних систем та їхнього наскрізного програмування, що пояснює появу нових комп'ютерних технологій для інтегрованих систем, які поєднують усі рівні виробництва.

Ключові слова: автоматизація, ефективність горіння, котел GM-50, паровий котел, система управління.

Постановка проблеми. Процес спалювання палива повинен здійснюватися з максимальною економічністю, а втрати теплоти під час її передачі поверхням нагрівання повинні бути мінімальними. Економічність процесу спалювання в топковій камері котельного агрегату досягається за підтримки відповідності між витратою палива й витратою повітря, надлишку повітря в топці за пароперегрівником (зміст O₂, %), а також підтримкою стійкості факела. При оптимальному значенні розрідження зменшуються присмоктування

холодного повітря в топку й вибивання димових газів із топки в простір котельного цеху. Впровадження систем автоматичної оптимізації процесу спалювання палива в котельних установках забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії котла, зменшення шкідливих викидів, скорочення витрати енергії на власні потреби й збільшення міжремонтних строків роботи устаткування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням процесів спалювання газоподібного палива зі змінним складом займалися

А. Клюєв, Е. Хватов, Г. Плетнев, М. Дуель, А. Горелік тощо. Варто відзначити дослідження В. Котлера «Досвід компанії MitsuiBabcock по зниженню викидів оксидів азоту на електростанціях» [1], яке внесло великий вклад у розвиток концепції економічності спалювання. Дослідження В. Бережного «Методи багатокритеріальної оптимізації» [2] дозволяє виділити основні принципи оптимізації спалювання паровим котлом.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Однак через відсутність ґрунтовних досліджень у рамках цієї проблеми вченими не досить уваги приділено автоматичній системі регулювання економічності спалювання палива, а наявні новачі в цій сфері не розмежовані на вже випробувані й перспективні.

Постановка завдання. Таким чином, метою статті є розробка моделі підвищення якості й точності регулювання процесу спалювання природного газу внаслідок рішення задачі автоматичної оптимізації процесу спалювання палива в котельній установці.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом регулювання є паровий водотрубний вертикальний однобарабанный котел Білгород-

ського виробництва з природною циркуляцією, виконаний за П-подібною схемою типу ГМ-50. Котел продуктивністю 75 т/год призначений для вироблення перегрітої пари з робочим тиском 40 кгс/см² (0,4 МПа) і температурою перегрітої пари 440° С. Висока надійність, широкий діапазон регулювання, а також стабільна циркуляція води при всіх навантаженнях дозволяють споживачеві використовувати котли цього типу для різних потреб (рис. 1).

Природні газу газових родовищ складаються в основному з метану (від 82% до 98%) і інших вуглеводнів – етану, пропану, бутану, пентану (від 1 до 8%), що входять у поняття «важкі вуглеводні». Також природні газу містять невелику кількість негорючих, або баластових, газів – азоту N₂ (від 1 до 8%) і вуглекислого газу CO₂ (менш ніж 1%), а також шкідливих домішок: сірководню, смоли, пилу, аміаку, від яких газу очищають до подачі їхнім споживачам [3].

При згорянні органічних палив продукти згоряння в основному містять вуглець, водень, кисень, азот і їхні окисли. Найбільше повно розробленим для визначення сполуки продуктів згоряння нате- пер є метод розрахунку рівноважних концентрацій продуктів реакцій, що може бути використаний для дослідження статистики процесу горіння.

Зміна навантаження котла викликає необхідність зміни подачі палива до паливних пристроїв. Залежно від зміни подачі палива в топку необхідно регулювати витрату необхідного для згоряння кількості повітря так, щоб зберігалася сталість співвідношення «паливо-повітря» із заданим коефіцієнтом надлишку повітря. Залежно від коефіцієнта надлишку повітря змінюється зміст продуктів згоряння, які характеризують економічність процесу горіння при певній температурі продуктів згоряння.

Математична модель об'єкта регулювання і регулятора:

Для розрахунку адиабатичної температури згоряння вводиться рівняння енергетичного балансу топку:

$$Q_H^C + H_{ТЛ} + Q_B - Q_3 = V_G \cdot c_{ПГ} \cdot t_{ад},$$

де Q_H^C – нижча теплота згоряння сухого палива; $H_{ТЛ}$ – фізичне тепло палива; Q_B – тепло, яке вносить в топку повітря; Q_3 – втрата тепла з хімічною неповнотою згоряння (при $\alpha > 1$ $Q_3 = 0$); $c_{ПГ}$ – об'ємна теплоємність продуктів згоряння; V_G – об'єм димових газів; $t_{ад}$ – адиабатична температура згоряння.

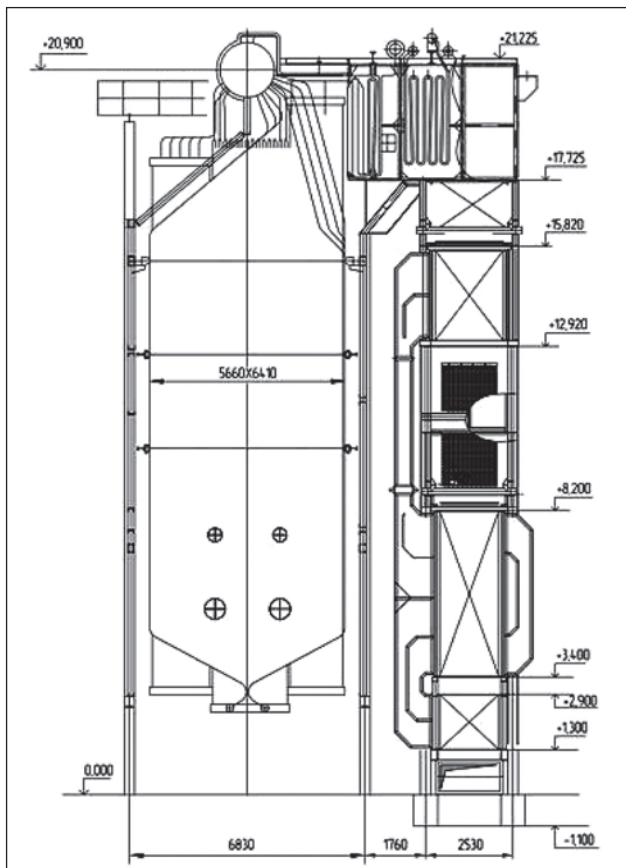


Рис. 1. Конструкція котлоагрегату ГМ-50

Тепло, внесене в топку повітрям, визначається з виразу:

$$Q_B = \alpha \cdot V_0 \cdot c_B \cdot t_B$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря; V_0 – теоретична кількість повітря, яке необхідне для повного згоряння палива; c_B – теплоємність повітря; t_B – температура повітря після повітропідігрівника.

$$V_0 = 0,0476 \cdot (0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} - O_2 + 1,5 \cdot H_2S), \quad \text{м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12} + CO_2 + 1,5 \cdot H_2S + CO_2), \text{м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + 6 \cdot C_5H_{12} + H_2 + 0,124 \cdot d_r + 1,61 \cdot V_0) + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_0, \quad \text{м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot V_0 + 0,01 \cdot N_2, \quad \text{м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{O_2} = \begin{cases} 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_0, & \text{при } \alpha > 1 \\ 0, & \text{при } \alpha \leq 1 \end{cases}$$

$$+5,9062 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 5,00197 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 + 1,7298 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 - 2,2118 \cdot 10^{-18} \cdot t^5, \quad \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{C}}$$

$$+8,0478437 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 - 2,2531 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 + 2,6677 \cdot 10^{-18} \cdot t^5,$$

$$C_{CO_2} = 0,3822 + 0,2529 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,6956 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 8,0478437 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 - 2,2531 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 +$$

$$C_{N_2} = 0,3093 - 5,3739 \cdot 10^{-6} \cdot t + 6,2620 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 4,7710 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 + 1,5436 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 - 1,8819 \cdot 10^{-18} \cdot t^5,$$

$$C_{O_2} = 0,3114 + 3,4105 \cdot 10^{-5} \cdot t + 4,2406 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 5,4515 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 + 2,3107 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 - 3,3790 \cdot 10^{-18} \cdot t^5,$$

Визначимо показники якості перехідного процесу регулювання по каналу «витрата палива – концентрація кисню» (рис. 2):

– динамічна помилка (перше відхилення):

$$y_1 = 0,026 \%$$

– перерегулювання:

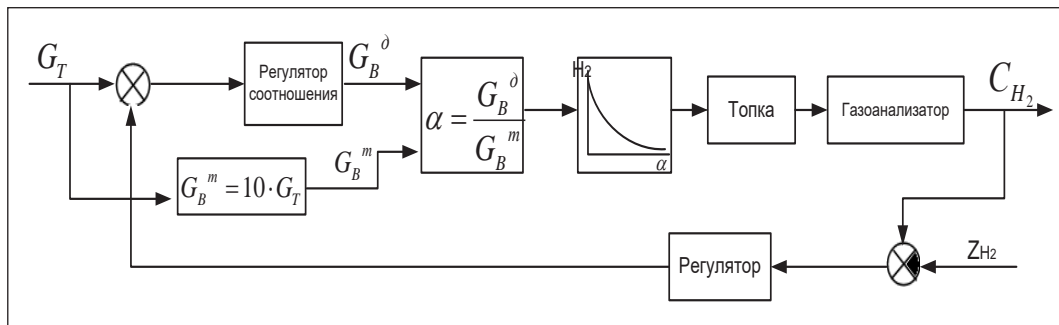


Рис. 2. Структурна схема моделювання нелінійної моделі процесу згоряння

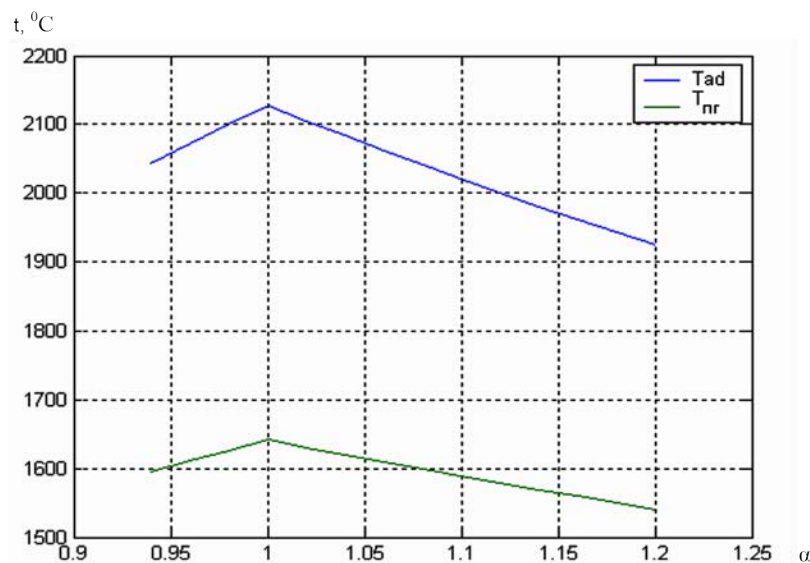


Рис. 3. Залежність температури згоряння та адиабатичної температури від коефіцієнта надлишку повітря

$$\Delta y = \left| \frac{y_2}{y_1} \cdot 100\% \right| = \left| \frac{-0,014}{0,026} \cdot 100\% \right| = 53\%$$

– час регулювання: $t = 80$ с

Визначимо показники якості перехідного процесу регулювання по каналу «витрата повітря – концентрація кисню»:

– динамічна помилка (перше відхилення):
 $y_1 = 0.014$ %

– перерегулювання:

$$\Delta y = \left| \frac{y_2}{y_1} \cdot 100\% \right| = \left| \frac{-0.0095}{0.014} \cdot 100\% \right| = 67\%$$

– час регулювання: $t = 90$ с

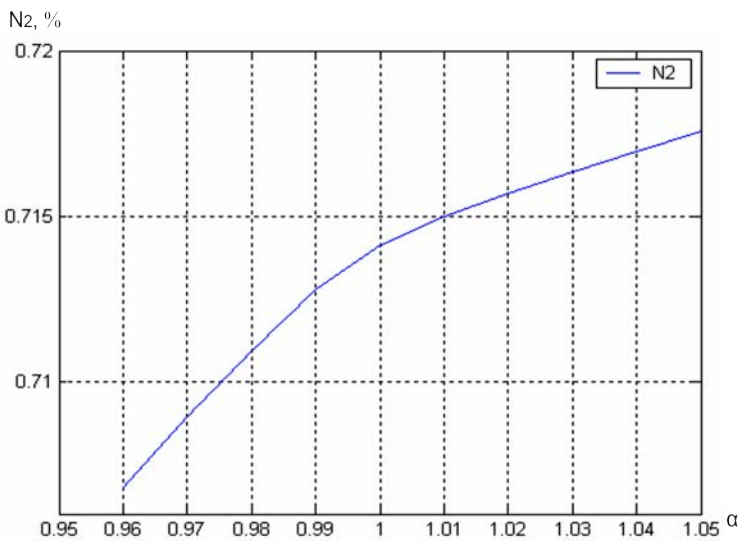


Рис. 4. Залежність вмісту водяних пар N_2 в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

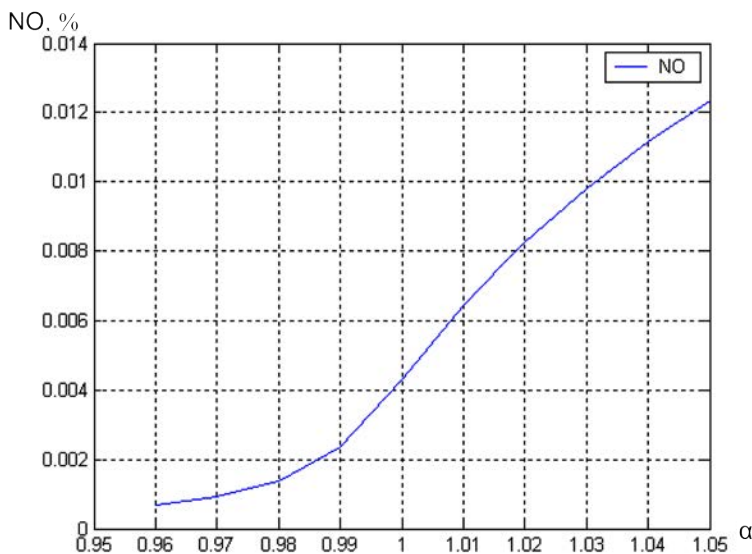


Рис. 5. Залежність вмісту NO в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

Моделювання нелінійної системи регулювання процесу згоряння показало, що форма перехідних процесів регулювання істотно залежить від знаку збурення по витраті палива. Визначимо основні показники якості такої системи.

Показники якості перехідного процесу регулювання в області нестачі повітря при збуренні витратою палива $\Delta G_B = - 0,12$ м³/с:

– динамічна помилка (перше відхилення):

$y_1 = 0.038$ % (у відносних величинах);

– перерегулювання: $\Delta y = \left| \frac{y_2}{y_1} \cdot 100\% \right| = 13\%$

– час регулювання: $t = 350$ с

Показники якості перехідного процесу регулювання в області надлишку повітря (рисунок 6.12) при збуренні витратою палива $\Delta G_B = + 0,12$ м³/с:

– динамічна помилка (перше відхилення): $y_1 = -0.005$ % (у відносних величинах);

– перерегулювання:

$$\Delta y = \left| \frac{y_2}{y_1} \cdot 100\% \right| = 15\%$$

– час регулювання: $t = 480$ с

Таким чином, одержуємо час регулювання в області недопалу меншим, ніж в області надлишку повітря. Максимальне відхилення концентрації водню в димових газах при збуренні витратою природного газу 10% від номінальної витрати не перевищує гранично-припустимих значень.

На рисунку 3 наведений графік залежності температури згоряння та адиабатичної температури від коефіцієнта надлишку повітря. З рисунка 2 видно, що при певних вище умовах температура при коефіцієнті надлишку повітря в межах 0,98–1,02 дорівнює приблизно 1 640°C.

Склад продуктів згоряння визначається температурою, загальним тиском, під яким перебуває газова суміш, а також ваговими частками хімічних елементів, що входять у сполуки, що становлять продукти згоряння. Ступінь дисоціації газу швидко зростає зі збільшенням температури й залежить від тиску. Зі зниженням загального тиску в продуктах згоряння вуглеводних палив збільшується відносний зміст продуктів неповного згоряння та взагалі всіх продуктів, утворення яких супроводжується витратою тепла й збільшенням хімічної енергії, тобто

ступінь дисоціації продуктів згоряння збільшується [4].

Розрахунок сполуки продуктів згоряння з урахуванням дисоціації починається зі складання наступних рівнянь [4]:

1) рівнянь констант рівноваги тих реакцій, які враховуються в розрахунку;

2) рівнянь балансу елементів, що входять у горючу суміш;

3) рівнянь повного тиску продуктів згоряння.

Ділянкою регулювання є топка з примикаючими до неї газоходами до місця відбору димових газів. Збурюючим впливом по першому каналу – лінії подачі палива – є витрата природного газу. Цей канал є першим входом нашої ділянки, топка котла й пов'язані з нею газоходи, на виході з якого регульована величина – концентрація кисню в димових газах. Вхідним регулюючим впливом є зміна витрати повітря, регульованою величиною є концентрація кисню в димових газах. Зміна продуктивності дуттьового вентилятора здійснюється шляхом зміни положення напрямного апарата. Канал подачі повітря та канал подачі палива зв'язані між собою прямою пропорційною залежністю. На вхід регулятора повітря як завдання надходить сигнал по витраті палива, що пройшов через передатну функцію зв'язку $W_{CB}(S)$. На вхід регулятора згоряння подається коригувальний сигнал по змісту кисню, що змінює завдання регулятора повітря. Також на вхід регулятора згоряння подається завдання за концентрацією кисню в димових газах [4].

Недоліком АСР процесу згоряння з використанням сигналу по концентрації кисню в димових газах, з нашої точки зору, є поява значних похибок виміру концентрації кисню O_2 внаслідок значного впливу присмокування повітря в котел, що працює з розрідженням у топці. При цьому навіть відносно невеликі присмокоти повітря, що містять 21% кисню, значно спотворює вимірюваний сигнал концентрації кисню, що на порядок менший концентрації присмоктів. Тому згодом поява неорганізованого присмокування повітря може значно погіршити якість регулювання процесу згоряння.

Як регульований параметр складу димових газів, на наш погляд, раціонально використовувати концентрації водню H_2 і окису вуглецю CO , що характеризують хімічний недопал палива q_3 . Ці параметри також слабо спотворюються присмокуванням повітря в котел, оскільки в них ці компоненти відсутні [4].

Як регулятор співвідношення «паливо–повітря» обираємо П–регулятор, тому що він забез-

печує мінімальний час перехідних процесів регулювання. Особливістю АСР процесу згоряння є наявність статичної помилки регулювання пропорційним регулятором співвідношення «паливо–повітря», внаслідок чого коефіцієнт надлишку повітря в топці може відрізнятись від оптимального, близького до стехіометричного. При коефіцієнті надлишку повітря, меншого ніж оптимальний, у димових газах з'являються продукти хімічного недопалу палива – водень і окис вуглецю. Токсичний окис вуглецю забруднює навколишнє середовище, тобто частина палива не використовується в процесі спалювання. При надлишку повітря в топці продукти хімічного недопалу в димових газах відсутні, проте паливо теж перевитрачається, але на даремний підігрів навколишнього середовища.

Розв'язання цього завдання, крім економії палива, тягне позитивні наслідки:

- збільшення ККД котлоагрегату;
- зменшення платежів за викидання шкідливих речовин в атмосферу;
- відсутність забруднення конвективних поверхонь нагріву;
- зменшення хімічного недопалу;
- зменшення втрат теплоти з димовими газами.

Модернізацією АСР передбачено використання нового обладнання (всі ціни вказані без урахування ПДВ):

1. Газоаналізатор ULTRAMAT/OXYMAT 6E виробництва ф. Siemens вартістю 50 000 грн.
2. Пробовідбірник газу для аналізу виробництва ф. Siemens вартістю 10 000 грн.
3. Менеджер горіння для газових/рідинопаливних пальників LMV52 виробництва ф. Siemens вартістю 20 000 грн.
4. Термоперетворювач опору платиновий Pt100, Метран 276 виробництва ВАТ «Теплоприбор» вартістю 2 050 грн.
5. Модуль аналогового вводу, 16-ти розрядний АЦП, ADAM 4013 виробництва ф. Advantech вартістю 1 500 грн.

Створення сучасних систем керування базується на розробці й застосуванні адаптивних інтелектуальних систем, функціонування яких неможливе без використання розвиненої обчислювальної мережі, що містить персональні комп'ютери (ПК), мікроконтролери й широкий набір одулів вводу/виводу. Ускладнення технологічних процесів і виробництв ставить задачу створення розподілених ієрархічних систем (АСУТП) і їхнього наскрізного програмування, що пояснює

появу нових комп'ютерних технологій для інтегрованих систем, що поєднують всі рівні виробництва.

Як приклад може бути названа SCADA-система (SupervisoryControlAndDataAcquisition), призначена для проектування й експлуатації розподілених автоматизованих систем керування. Судячи з назви, SCADA-система призначена для диспетчерського керування та збору даних. SCADA-система TRACE MODE 6 розроблена й продовжує вдосконалюватися російською фірмою-виробником AdAstraResearchGroup, LTD. Останній на даний момент продукт – це 5-й реліз шостої версії TRACE MODE, що містить повний набір програмних засобів для створення АСУТП і АСУП. SCADA-Система TRACE MODE містить засоби розробки операторського інтерфейсу (SCADA/HMI), програмування контролерів (Softlogic), керування основними фондами (EAM), персоналом (HRM) і виробничими процесами (MES) [5].

Всі програми, що входять в TRACE MODE, підрозділяються на дві групи: інструментальну систему розробки й виконавчих модулів. Інструментальною системою розробки є Інтегроване середовище (IC) розробки. IC – єдина програмна оболонка, що всі необхідні засоби для розробки проекту. Всі змінні проекту, до чого б вони не відносилися – до контролера, до операторської станції, до керування техобслуговуванням або виробництвом – зберігаються в єдиній базі даних

проекту. Єдина база проекту усуває зайву роботу проектувальника по створенню, підтримці й взаємному зв'язуванню багатьох в чому однакових баз змінних контролерів і ПК, характерну для систем попереднього покоління. Логічна структура проекту повністю відділена від апаратної частини. Завдяки єдиному простору розподілених змінних, змінні з різних вузлів можуть зв'язуватися між собою також легко, як і в межах одного вузла, будь-які зміни, внесені в об'єкт, автоматично застосовуються скрізь, де він був задіяний. Інструментальна система інсталюється на робочому місці розроблювача АСУ. У ній створюється набір файлів, що називається проектом TRACE MODE.

Існує ряд програмних модулів, призначення яких чітко не прив'язане до функцій одного з перерахованих рівнів систем керування. До таких модулів відносяться:

- глобальний реєстратор;
- сервер документування;
- Web-Активатор;
- GSM-Активатор [5].

Вони можуть використовуватися для створення як оперативного, так і адміністративного рівнів систем керування. TRACE MODE дозволяє створювати проект відразу для декількох виконавчих модулів – вузлів проекту. Кожному вузлу проекту відповідає одна інсталяція виконавчого модуля.

Система регулювання процесу горіння газу змодельована в SCADA-системі TRACE MODE 6

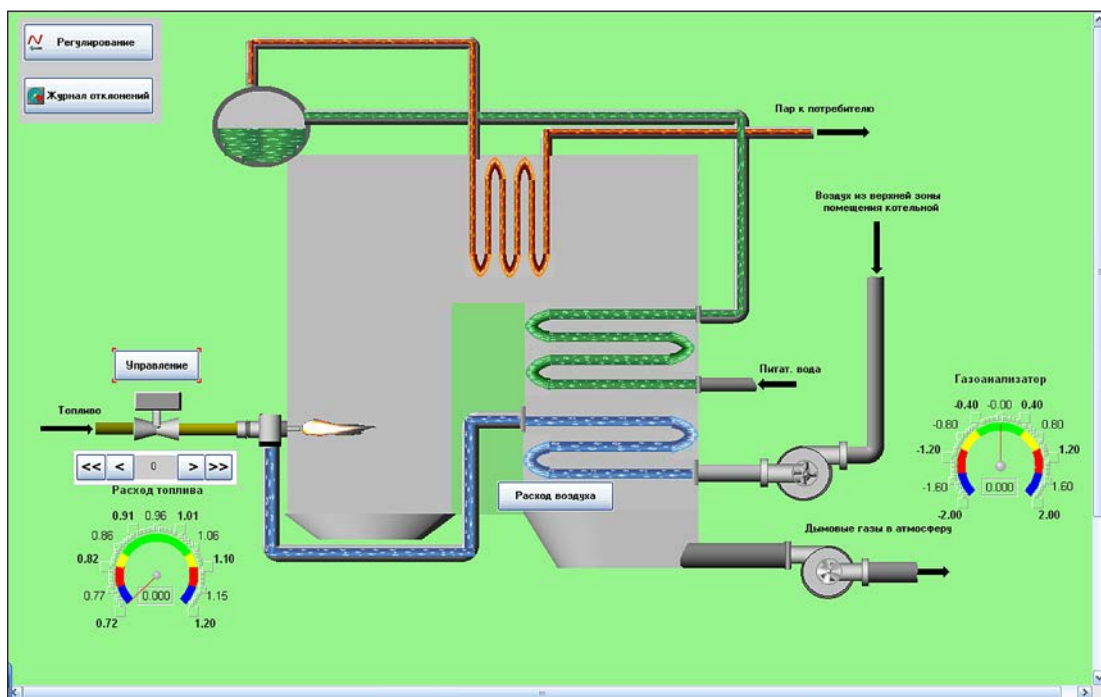


Рис. 6. Мнемосхема моделі системи управління

і складається із трьох частин (3 екранних форм). На першій екранній формі представлена мнемосхема з усіма технологічними елементами. Основні елементи на першій частині:

- об'єкт керування зі своєю технологією;
- прилади візуалізації необхідних параметрів;
- кнопки переходів на інші частини системи.

Потрібно відзначити, що TRACE MODE 6 містить рекордну кількість бібліотек ресурсів, готових до використання в прикладних проєктах. Вона має вбудовані безкоштовні драйвери до більш ніж 1 600 контролерів і плат вводу/виводу, понад 600 анімаційних об'єктів, більше 150 алгоритмів обробки даних і керування, комплексні технологічні об'єкти. Режим автобудування, який застосовується в TRACE MODE 6, миттєво формує базу тегів для операторських станцій, контролерів і OPC-серверів, настроює мережні зв'язки, будує систему документування й графічний інтерфейс.

Отже, у статті змодельована система регулювання процесу згоряння в SCADA-системі TRACE MODE 6, що складається із трьох частин (3 екран-

них форм). Створення цієї моделі дозволяє візуально бачити технологічний процес, наносити збурення та спостерігати перехідні процеси регулювання процесу спалювання природного газу.

Висновки. Розв'язання цих задач приведе до підвищення якості й точності регулювання процесу спалювання газоподібного палива внаслідок розв'язання задачі автоматичної оптимізації процесу спалювання палива в котельній установці. вирішена задача статичної оптимізації процесу згоряння, визначений критерій оптимальності, що враховує економічність процесу згоряння. Впровадження модернізованої АСР процесу горіння з використанням коригуючих сигналів за складом продуктів згоряння сприяє рішенню основного завдання – ефективного використання палива при виробництві теплової енергії котельними установками.

Перспективи дослідження в цьому напрямі. Рекомендуємо проаналізувати практичне застосування автоматичної системи регулювання економічності спалювання палива в топці парового котла, розглянути основні проблеми тощо.

Список літератури:

1. Теплотехнічний довідник : в 2 т. / за ред. В.Н. Юр'єва, П.Д. Лебедева. Київ : Енергія 1976. Т. 2.
2. Демченко В.А. Автоматичні системи регулювання технологічними процесами АЕС. Одеса : ОНПУ, 1994.
3. Методичні вказівки з курсового проєктування по дисципліні Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС. Одеса, 1988.
4. Методичні вказівки з курсового проєктування по дисципліні Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС, Регулювання енергоблоків. Одеса : ОНПУ, 1994.
5. Тиск насиченої пари води : довідкові таблиці. URL: <http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html> (дата звернення: 1.05.2019).
6. Методи регулювання температури перегрітої пари. *Мастерская своего дела* : веб-сайт. URL: <http://msd.com.ua/parovye-kotly-tes/metody-regulirovaniya-temperatury-peregretogo-para/> (дата звернення: 1.05.2019).
7. Системи турбінного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.
8. Основне обладнання реакторного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.

Yermakova D.G., Lysyuk H.P. AUTOMATIC SYSTEM FOR CONTROLLING THE EFFICIENCY OF COMBUSTION OF FUEL IN THE FURNACE OF A STEAM BOILER

The article is devoted to the study of combustion processes of gaseous fuels with variable composition. The optimum modes of combustion of fuel in terms of accounting for the composition of flue gases, may be in different areas of the values of the coefficient of excess air. The article emphasizes that all automatic systems for controlling the economy of the combustion process take into account only one component of the optimization of the combustion process and cannot separately provide the whole complex of problems that arise during the process of combustion of fuel. The paper considers the main principles of improving the quality and accuracy of the regulation of the burning process of gaseous fuels. The solution of the problem of automatic optimization of fuel burning process in the boiler installation is proposed.

The article outlines V. Kotler's scientific materials "Experience of the MitsuiBabcock company on reducing emissions of nitrogen oxides at power stations" and V. Bereznyj "Methods of multicriteria optimization".

It is noted that when combustion of organic fuels combustion products mainly contain carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen and their oxides. At present, the method for calculating equilibrium concentrations of reaction products that can be used to study the static of the combustion process is the most fully developed to determine the combustion product compound at that time.

According to the author, the disadvantage of the combustion process with the use of a signal on the concentration of oxygen in the flue gases is the appearance of a significant overshoot of the concentration of oxygen O₂ due to the significant effect of air suction in the boiler, working with the dilution in the furnace.

Solving the tasks posed by the author, in addition to saving fuel, has positive consequences:

- increase of efficiency of boiler unit;*
- reduction of payments for the release of harmful substances into the atmosphere;*
- absence of contamination of convective heating surfaces;*
- reduction of chemical cigarette butts;*
- reduction of heat losses from flue gases.*

It is emphasized that the creation of modern control systems is based on the development and application of adaptive intelligent systems, the functioning of which is impossible without the use of a developed computer network, including personal computers (PCs), microcontrollers and a wide range of I / O modules. The complication of technological processes and industries raises the problem of creating distributed hierarchical systems and their through-the-board programming, which explains the emergence of new computer technologies for integrated systems that combine all levels of production.

Key words: *automation, efficiency of combustion, boiler GM-50, steam boiler, control system.*

УДК 004.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/15>**Іванчук О.В.**

Херсонський національний технічний університет

Завгородній В.В.

Херсонський національний технічний університет

Козел В.М.

Херсонський національний технічний університет

Дроздова Є.А.

Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ ПРОТОКОЛІВ ОБМІНУ ДАНИМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У статті проведено аналіз наявних протоколів для обміну даними під час керування системами Інтернету речей. Розглянуто технологію M2M, що використовується для формування обміну даними за шаблоном «видавець» – «підписник». У такій системі «видавець» відправляє на сервер обробки пакети з даними, а «підписник» має повідомити, які дані бажає отримувати, й під час їхнього надходження обробляти їх. Під час розробки системи Інтернету речей необхідно обрати протокол обміну даними між пристроями й сервером керування. Основними протоколами керування є HTTP, SOAP, XMPP, STOMP, CoAP, MQTT, MQTT-SN. Для кожного протоколу розглянуто структуру пакету даних й основні типи пакетів. Для порівняльного аналізу протоколів як критерій було прийнято розмір пакету даних із повідомленням. Обрано однакові дані для кожного протоколу. На основі даних, які необхідно передати, сформовано пакети даних, що мають мінімальний набір необхідних даних у структурі пакету для обміну повідомленнями в системі. Для отриманих пакетів було пороховано кількість символів, що передаються. Результати свідчать, що протоколи XMPP та SOAP з XML-структурою пакету мають надмірність інформації через подвійний запис ідентифікатору параметру. Протоколи MQTT та MQTT-SN мають найменший розмір пакету через використання двійкового кодування параметрів, що дозволяє зменшити розмір пакету шляхом меншого розміру заголовків пакету й двійкового кодування числових значень. Оптимальним протоколом для систем Інтернету речей є протокол CoAP через посилання сервером даних до «підписників» відразу після отримання від «видавця». Протоколи MQTT і MQTT-SN через особливості реалізації не дозволяють миттєво оновлювати дані. Протоколи вимагають виконання запитів від «підписників» до сервера для перевірки наявності нових даних. Оскільки проміжки часу для виконання запитів можуть складати від декількох хвилин до декількох годин, то цей протокол не підходить для швидкого реагування на події. Протокол CoAP займає наступне місце після MQTT і MQTT-SN за розміром пакету.

Ключові слова: віддалене керування, Інтернет речей, сервер керування, пакет, протокол.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток Інтернету речей призвів до появи безлічі прикладних протоколів, необхідних для його реалізації. Архітектура Інтернету речей передбачає наявність таких функціональних рівнів: мережа датчиків, шлюз, управління, додаток [1]. Оскільки нижній рівень складається з датчиків і сенсорів, то відразу ж виникає необхідність в «особливих» протоколах для забезпечення взаємодії цих пристроїв із сервером. Стандартні прикладні протоколи не підходять через їхню непристосованість до умов мережі Інтернету речей. Датчик – зазвичай мініатюрний, з невеликою пам'яттю – вимірює фізичні параметри в режимі реального часу,

найчастіше в умовах низького енергозабезпечення. Результати вимірювань обробляються вузлом і передаються на сервер. Обсяг інформації, що формується одним вузлом, порівняно невеликий, проте більшість сервісів Інтернету речей побудовано на принципі обробки інформації від безлічі вузлів, що принципово відрізняється від архітектур, прийнятих у класичних мережах типу абонент – вузол зв'язку для телефонії, клієнт-сервер для передачі даних.

Таким чином, з'являється нова архітектура: багато джерел – один одержувач. Крім того, обсяг трафіку від вузла може бути як дуже маленьким, так і дуже великим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У XXI столітті ідея виконувати смарткерування будинком й інтернет речами набирає все більшої популярності. Збільшується попит на технології, які дозволяють керувати все більшою кількістю пристроїв [2]. Актуальним стає бажання користувача зробити свій будинок місцем відпочинку без необхідності виконувати прибирання, керувати безпекою, перевіряти наявність їжі і так далі.

Науковці Т.А. Москаленко, Р.В. Кірічек й А.Є Кучерявий розглядають протоколи, що використовуються під час розробки систем Інтернету речей [3]. Дослідники В.Ю. Гойхман й А.А. Савельєва проводять аналітичне порівняння протоколів Інтернету речей і визначають рекомендації по використанню кожного з них у різних частинах системи [1].

Інтернет речей (далі – IoT) розвивається швидкими темпами й незабаром увійде в усі сфери життєдіяльності людини, тому проблема вибору оптимального протоколу актуальна.

Постановка завдання. У зв'язку з тим, що нині існує безліч протоколів обміну даними між пристроями й сервером, поставлене завдання визначити протокол у системі Інтернету речей, який матиме мінімальний розмір пакету для забезпечення максимальної енергоефективності й мінімального часу обробки пакету IoT-пристроєм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для реалізації «Розумного будинку» використовують Інтернет речей (Internet of Things – IoT) – це пристрої, які увійшли в мережу й взаємодіють між собою без участі людини.

В основі усіх протоколів Інтернету речей лежить технологія M2M (Machine-to-Machine). Згідно із цією технологією, обмін даними виконується між машинами у двох- або односторонньому порядку.

У мережах Інтернету речей використовується шаблон обміну даними «видавець-підписник». У цьому шаблоні сервер обробки даних зберігає інформацію про наявних видавців і підписників. Коли видавець передає інформацію про подію, сервер визначає підписників, які мають отримати інформацію про подію, після чого виконує передачу даних.

Такий спосіб обміну даними дозволяє виконувати просте масштабування системи. Це виконується шляхом відсутності необхідності в зберіганні «видавцем» інформації про всіх «підписників», що дозволяє додавати або вилучати вузли із системи в реальному часі.

Для обміну даними в системах Інтернету речей використовуються такі протоколи: HTTP, SOAP, XMPP, STOMP, CoAP, MQTT, MQTT-SN [4; 5].

У пакеті протоколу HTTP тип запиту визначає, що клієнт бажає виконати з даними. Основними діями є:

- GET – отримати дані;
- POST – відправити дані на сервер;
- PUT – замінити дані на сервері;
- DELETE – видалити дані із сервера [5].

Ресурс у пакеті визначає ідентифікатор об'єкту, з яким виконуватиметься взаємодія.

Версія протоколу допомагає серверу визначити, чи зможе він обробити пакет. У нових версіях протоколу були додані нові обов'язкові поля в параметри обміну, які старі версії серверу не зможуть правильно обробити. Вказана версія дозволить одразу відхилити пакет.

У параметрах обміну вказується інформація про розмір даних; адреса, з якої відбувається підключення до сервера; необхідність підтримки відкритого каналу й інші.

Тіло повідомлення містить у собі дані, що необхідно обробити. Оскільки протокол передбачає передачу текстових даних, то будь-які дані формуються в текст.

У протоколі SOAP заголовок містить у собі параметри обміну даними. Тіло повідомлення містить дані для обробки сервером [6]. Оскільки в протоколі відсутнє обов'язкове зазначення ресурсу для взаємодії в заголовку, то його розміщують у тілі повідомлення.

Усі дані формуються в текст для передачі за протоколом SOAP.

Протокол XMPP вимагає вказувати в заголовку відправника й отримувача через відсутність постійного з'єднання між клієнтом і сервером [7]. У протоколі можуть використовуватися шлюзи для об'єднання мереж із різними протоколами, що не дозволяє постійно підтримувати відкритий канал зв'язку. Шлюз дозволяє виконати переадресацію згідно з даними, вказаними в заголовку пакету.

Тіло повідомлення в протоколі використовує текстове форматування, так само як HTTP і SOAP.

Основними типами повідомлень у протоколі STOMP є:

- SUBSCRIBE – клієнт повідомляє, з якого ресурсу бажає отримувати дані при їхньому оновленні;
- SEND – клієнт передає нові дані;
- MESSAGE – сервер відправляє клієнту оновлені дані з ресурсу, який було вказано через повідомлення типу SUBSCRIBE;

– ERROR – це повідомлення відправляє сервер при неможливості обробити дані [8].

У параметри додаються обов'язкові поля, що необхідно відправити в залежності від типу повідомлення. Також можна додати власні поля.

Тіло повідомлення містить дані для обробки сервером.

У пакеті CoAP версія протоколу необхідна для швидкої відмови в обробці даних через неможливість обробки нових типів повідомлення під час отримання пакету сервером, в якого версія протоколу старіша за версію клієнта [9].

Тип повідомлення визначає дію, що необхідно виконати над даними. Основними діями є:

- GET – отримання даних із вказаного ресурсу;
- PUT – оновлення даних у вказаному ресурсі;
- POST – перевірка наявності ресурсу на сервері й створення ресурсу в разі його відсутності;
- DELETE – видалення ресурсу з сервера [9].

Для кожного пакету задається унікальний номер, що зазначається в ідентифікаторі пакету. Це необхідно, оскільки протокол використовується над протоколом UDP, який не має алгоритмів підтвердження передачі даних. Наявність унікального ідентифікатора дозволяє відправити повідомлення у відповідь із підтвердженням вдалої передачі, вказуючи ідентифікатор пакету, який було отримано. Якщо сервер отримає пакет із тим же ідентифікатором, то це означає, що відповідь сервера не досягла клієнта.

Довжина ідентифікатора пакету визначає кількість байт, що займатиме ідентифікатор пакету.

Ідентифікатор повідомлення зберігає унікальний номер, що відповідає даним у тілі повідомлення. Це необхідно для перевірки наявності даних у системі. Якщо вони вже присутні або застарілі, то вони ігноруються.

Згідно з протоколом, ресурс, до якого йде звернення, задається в URL адресі сервера.

Основними типами повідомлення в пакетах протоколів MQTT і MQTT-SN є:

- CONNECT – запит клієнта на підключення до сервера;
- SUBSCRIBE – передача клієнтом до сервера інформації про ресурс, з якого клієнт бажає отримувати дані;
- PUBLISH – оновлення інформації в ресурсі [11].

Старші 4 біти першого байту заголовку є наступними флагами: для визначення повідомлень, що відправляються повторно; для визначення необхідності підтвердження передачі пакету; для визначення необхідності збереження даних після успішної їх передачі клієнтам.

Параметри повідомлення зберігають інформацію про розмір тіла повідомлення, ідентифікатор повідомлення, назву протоколу, його версію та параметри, що необхідні під час ініціалізації підключення.

Ідентифікатор ресурсу вказується в тілі повідомлення.

У MQTT-SN для обміну даними використовується протокол UDP замість TCP для зменшення розміру пакету. Також це дозволяє передати дані, не очікуючи підтвердження. Для пристроїв, дані яких не мають бути обов'язково передані, він дає можливість зменшити енерговитрати шляхом зменшення передач, що підтверджують успішну передачу пакету.

Для порівняння розміру пакетів були обрані такі дані для передачі:

- Число 15 з ідентифікатором int1;
- Число 11 з ідентифікатором int2;
- Число 2 004 з ідентифікатором int3;
- Число 1 959 з ідентифікатором int4;
- Текст Khersonal National Technical University з ідентифікатором text;
- Ідентифікатор ресурсу /send/info;
- Ідентифікатор серверу iot.server;



Рис. 1. Гістограма розміру тіла повідомлення

– Ідентифікатор клієнту `iot.client`.

Кожен рядок закінчується послідовністю ASCII символів `'\r\n'`. Послідовність займає 2 байти. Для кодування даних у двійковій формі використовується система кодування ASCII, що визначає розмір 1 байт для кожного символу.

Через використання мови розмітки XML у тілі пакету XMPP і SOAP, для зазначення будь-якого параметру необхідно двічі зазначити ідентифікатор параметру. Це викликає надмірність інформації для передачі. У заданому прикладі кожен параметр потребує додаткову передачу 7 байтів.

На рисунку 1 зображено гістограму розмірів тіла пакету для протоколів із текстовим форматом і XML форматом.

Для кожного з протоколів було складено мінімальний пакет. Кожен пакет використовується для оновлення інформації на серверах.

Протоколи CoAP, MQTT і MQTT-SN використовують бінарне кодування для заголовків. Прото-

коли MQTT і MQTT-SN використовують бінарне кодування для даних. Бінарні дані представлені за допомогою шістнадцятиричних чисел.

На рисунку 2 зображено гістограму розмірів пакетів у байтах за протоколами.

Згідно з отриманими результатами мінімальний розмір пакету виявився в протоколі MQTT. Але цей протокол потребує додатково відправляти пакет з'єднання до передачі пакету з новими даними, що збільшує об'єми даних.

На рисунку 3 зображена гістограма розміру пакетів даних у протоколах з урахуванням пакету з'єднання для протоколу MQTT.

Після додавання пакету з'єднання кількість даних, що передаються за протоколом MQTT, залишається найменшою. Це досягається шляхом двійкового кодування даних, що дозволило зменшити розміри заголовку пакету до 2 байтів.

Використання двійкового кодування даних дозволяє зменшити розміри пакету під час передачі числових значень. Можна використовувати числові ідентифікатори параметрів, що зменшить їхній розмір. Можна отримати 256 ідентифікаторів, використовуючи лише один байт даних. Також можливо закодувати числа від 0 до 255 одним байтом. Під час передачі тризначних чисел це дозволить зменшити розміри пакету на 2 байти з кожного числа.

Під час передачі 256 тризначних чисел двійкове кодування дозволить зменшити розміри пакету на $256 \times 2 = 512$ байтів.

Оскільки більшість даних із пристроїв мають числові значення, то двійкове кодування оптимальне в протоколах систем Інтернету речей.

Заголовок пакету в протоколі CoAP також кодується у двійковій формі, але він має більше параметрів. Також протокол вимагає розміщення ідентифікатора ресурсу в окремий параметр одразу після заголовку. Опис параметру вимагає вказувати ідентифікатор параметру, що не кодується двійковим кодом, а використовує текстовий опис. Опис параметру потребує 9 байтів даних. У протоколі MQTT використовується додатково 2 байти перед описом ідентифікатора ресурсу для зазначення довжини ідентифікатора.

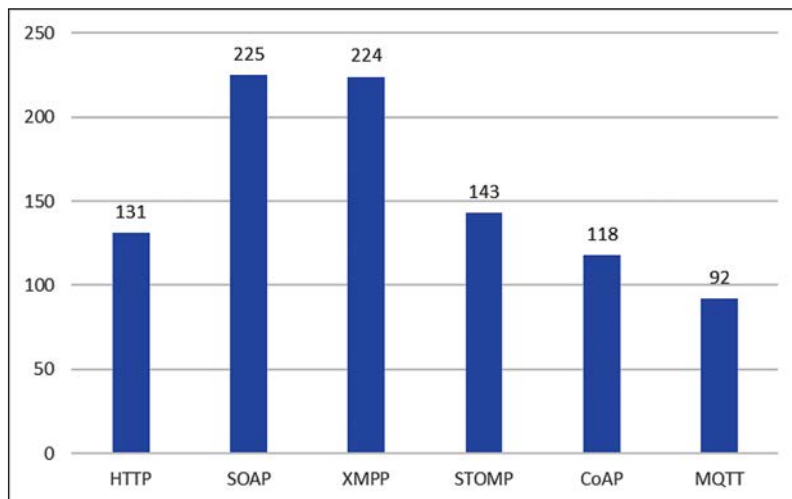


Рис. 2. Розмір пакету даних у протоколах

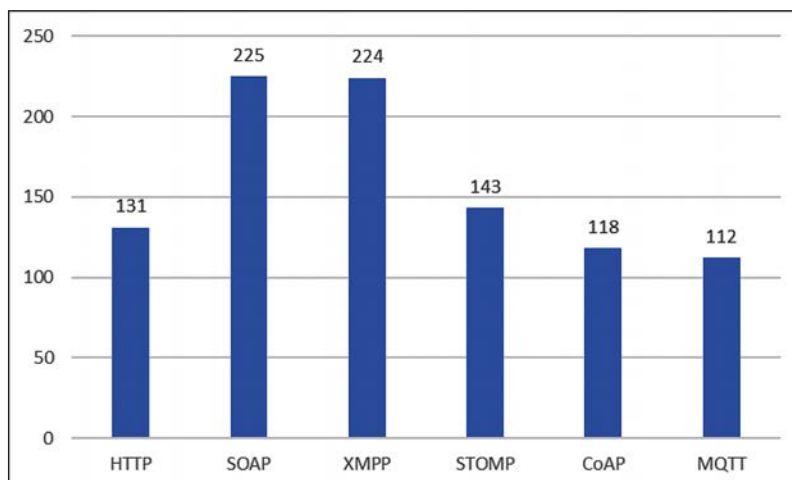


Рис. 3. Розмір пакетів у протоколах із урахуванням пакету з'єднання MQTT

Перевагою протоколу CoAP є схожість із протоколом HTTP, що дозволяє використовувати архітектуру REST при побудові серверів.

Також перевагою цього протоколу відносно протоколу MQTT є миттєве оновлення даних. У протоколі MQTT для оновлення даних на пристрої, для якого ці дані потребуються, пристрій має виконати підключення до сервера й отримати нові дані. Проміжки часу, через які виконується оновлення даних, залежать від конфігурації пристрою, через що час отримання команди для виконання може коливатися від декількох секунд до декількох годин, що не дозволить використовувати протокол MQTT у системах швидкого реагування. Протокол CoAP вимагає постійного очікування пристроєм підключення до сервера для оновлення даних.

Висновки. Було розглянуто пакети даних наявних протоколів для обміну даними в системах Інтернету речей. Отримані такі результати:

– протоколи, що використовують мову розмітки XML, для опису тіла повідомлення мають надмірність інформації в повідомленні;

– протоколи з двійковим кодуванням даних дозволяють зменшити розміри повідомлення під час передачі чисельних значень;

– протоколи MQTT і MQTT-SN мають мінімальний розмір пакету шляхом двійкового кодування даних і мінімального розміру заголовку. Мінімальний розмір пакету зменшує час передачі даних. Це зменшує енерговитрати в автономних системах;

– протокол CoAP шляхом двійкового кодування заголовку й схожості з HTTP протоколом дозволяє розробляти системи з REST архітектурою;

– оптимальним протоколом для керування системами Інтернету речей є CoAP через найменший розмір пакету даних серед протоколів, що одразу виконують оновлення даних на пристроях.

Список літератури:

1. Гойхман В.Ю., Савельєва А.А. Аналитический обзор протоколов Интернета вещей. *Технологии и средства связи*. 2016. № 4. С. 32–37. URL: <http://lib.tssonline.ru/articles2/reviews/analiticheskiy-obzor-protokolov-interneta-veschey> (дата звернення: 26.02.2020).
2. Knud Lasse Lueth. IoT 2019 in Review: The 10 Most Relevant IoT Developments of the Year. *Iot-analytics* : web-site. URL: <https://iot-analytics.com/iot-2019-in-review/> (дата звернення: 26.02.2020).
3. Москаленко Т.А., Киричек Р.В., Кучерявий А.Е. Обзор протоколов Интернета вещей. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2017. № 2. С. 1–12. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/20172/1-12.pdf> (дата звернення: 28.02.2020).
4. Протоколы передачи данных. *Википедия: свободная энциклопедия*. URL: <https://iot.ru/wiki/protokoly-peredachi-dannykh-iot> (дата звернення: 26.02.2020).
5. Fielding R., Reschke J. Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Message Syntax and Routing. URL: <https://httpwg.org/specs/rfc7230.html#http.message> (дата звернення: 26.02.2020).
6. XML Soap. *W3schools* : web-site. URL: https://www.w3schools.com/xml/xml_soap.asp (дата звернення: 26.02.2020).
7. XML Stanzas. Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core. URL: <https://xmpp.org/rfcs/rfc6120.html#stanzas> (дата звернення: 26.02.2020).
8. STOMP Protocol Specification, Version 1.2. URL: <https://stomp.github.io/stomp-specification-1.2.html> (дата звернення: 26.02.2020).
9. RFC 7252. The Constrained Application Protocol: Method Definitions. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252#section-5.8> (дата звернення: 26.02.2020).
10. Azzola F. CoAP Protocol: Step-by-Step Guide. URL: <https://dzone.com/articles/coap-protocol-step-by-step-guide> (дата звернення: 26.02.2020).
11. MQTT Packet Structure. URL: <http://www.bytesofgigabytes.com/mqtt/mqtt-protocol-packet-structure/> (дата звернення: 26.02.2020).

Ivanchuk O.V., Zavorodnii V.V., Kozel V. M., Drozdova Ye.A. ANALYSIS OF DATA SHEET PROTOCOLS FOR CONTROL OF THE INTERNET OF THINGS

The article analyzes existing protocols for data exchange while managing Internet of Things systems. The M2M technology used to form data exchange on the system of “publisher” – “subscriber” is considered. In such a system, the “publisher” sends packets of data to the processing server, and the “subscriber” has to inform what data he wants to receive and when they receive them to process them. When designing the Internet of Things system, you need to choose the communication protocol between the devices and the management server. The main management protocols are HTTP, SOAP, XMPP, STOMP, CoAP, MQTT, MQTT-SN.

For each protocol, the structure of the data packet and the basic types of packets are considered. The size of the message packet was selected for comparative analysis of the protocols. For comparison, the same data for each protocol was selected. Based on the data to be transmitted, the generated packets have the minimum set of required data in the packet structure for messaging on the system. The number of transmitted characters was calculated for the received packets. The results show that XMPP and SOAP protocols that have XML packet structure have redundant information through dual parameter identifier entry. The MQTT and MQTT-SN protocols have the smallest packet size due to the use of binary parameter encoding, which reduces the packet size due to the smaller packet headers and binary encoding of numeric values. The best protocol for Internet of Things systems is the CoAP protocol, by sending data to “subscribers” by the server as soon as it is received from the “publisher”. The MQTT and MQTT-SN protocols do not allow the data to be updated instantly due to implementation features. Protocols require requests from “subscribers” to the server to check for new data. Since queries can take between minutes and hours, this protocol is not suitable for quick response to events. CoAP ranks second after MQTT and MQTT-SN in packet size.

Key words: *remote control, Internet of Things, management server, packet, protocol.*

Киричек Г.Г.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тимошенко В.С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСІВ

У роботі проведено дослідження методів аналізу використання інтернет-ресурсів; обрано програмне забезпечення для реалізації системи; спроектовано систему аналізу використання інтернет-ресурсів на основі нейронних мереж за допомогою сервісу *creately.com*, який дозволяє створювати діаграми різних варіантів; реалізовано програмні компоненти системи: модуль первинної обробки даних, модуль прогнозування та модуль керування; проведено експериментальне дослідження працездатності модулів системи.

Метою роботи є дослідження інтенсивності надходження пакетів і залежності навантаження від часу та прогнозування подальшого навантаження в системі аналізу використання інтернет-ресурсів. Об'єкт дослідження – процес реалізації системи аналізу використання інтернет-ресурсів. Предмет – моделі, методи, програмні та інструментальні засоби аналізу мережових даних. Методи, які використовувалися: *NumPy* (для роботи з нелінійною алгеброю); *Pandas* (для аналізу даних і маніпулювання ними); *Mathplot* (для відображення даних у графічному вигляді) та *TensorFlow* – фреймворк, написаний на *Python* для створення нейронних мереж.

У роботі виконано моделювання загальних модулів системи. Описано послідовність дій первинної обробки даних перед потраплянням їх до модуля прогнозування та виконано моделювання роботи штучної нейронної мережі при керуванні пропускнуою здатністю мережі. Для перевірки *Dos* атак автори статті використовували алгоритм з етапами: виявлення перевантаження каналу зв'язку; створення шаблонів трафіку залежно від часу отримання першого піку; виявлення послідовності отриманих піків трафіку; прийняття рішень за наявності або відсутності атаки.

Ключові слова: балансувальник навантаження, обчислення, штучна нейронна мережа, атака, дані, фреймворк.

Постановка проблеми. Постачальникам послуг відомо, що користувачів цікавить швидкість отримання даних. Між користувачем і провайдером відносини будуються на компромісній основі, виходячи з їх можливостей. При цьому хмарні технології і технології віртуалізації дозволяють додаткам і мережам абстрагуватися від фізичної інфраструктури і програмно надавати мережу як послугу. Натепер для аналізу інтернет-трафіку та навантаження мережі існує багато сервісів. Але всі вони мають низку недоліків: неможливість прогнозування навантаження системи; отримання даних із системи для подальшого аналізу сторонніми сервісами; виконання спліт-тестування і моделювання потенційної кількості користувачів; використання для конфігурування ресурсів залежно від навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі розглянуті аналоги систем використання інтернет-ресурсів. *Google Analytics* – умовно безкоштовний сервіс для створення статистики відвідувань веб-сторінок; *Яндекс метрика* – сер-

віс, призначений для оцінки відвідувань веб-сайтів і аналізу поведінки користувачів; *Urchin on Demand* – програма аналізу веб-статистики та глибока перевірка пакетів (*Deep Packet Inspection, DPI*). Існуючі аналоги мають низку недоліків: умовна безкоштовність, відсутність можливості експорту даних, зниження продуктивності мережі та вплив на статистику [1–3].

Оскільки обсяг використання інтернет-ресурсів є стохастичним процесом, для його аналізу доцільно використовувати нейронні мережі. Авторами розглянуті нейронні мережі прямого поширення (*feed forward neural networks, FF* або *FFNN*) і перцептрони, які передають інформацію від входу до виходу та використовуються в комбінації з іншими; нейронна мережа Хопфілда (*Hopfield network, HN*) – повнозв'язна нейронна мережа із симетричною матрицею зв'язків; багат шарові перцептрони (*MLP*) – мережі прямого поширення та згорткові нейронні мережі (*convolutional neural networks, CNN*) і глибинні згорткові нейронні мережі (*deep convolutional neural networks,*

DCNN), які відрізняються від інших видів мереж [4–6]. Багатошарові перцептрони вивчаються за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки (back-propagation algorithm) і успішно застосовуються для вирішення багатьох складних завдань класифікації, розпізнавання [4].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження інтенсивності надходження пакетів і залежності навантаження від часу та прогнозування подальшого навантаження в системі аналізу використання інтернет-ресурсів. Об'єкт дослідження – процес реалізації системи аналізу використання інтернет-ресурсів. Предмет – моделі, методи, програмні та інструментальні засоби аналізу мережевих даних.

Для вирішення мети роботи необхідно виконати такі завдання: проаналізувати програмні методи реалізації подібних систем і методи аналізу трафіку; провести моделювання системи аналізу використання інтернет-ресурсів, реалізувати її програмні модулі; провести експериментальне дослідження функціонування модулів системи.

До системи висувається низка жорстких вимог, однією з яких є функціонування в режимі реального часу. В результаті необхідно мінімізувати тимчасові витрати, пов'язані з вивченням нейронної мережі, тому автори вибирають архітектуру, яка характеризується мінімальним часом навчання та розміром навчальної вибірки. Для коректного навчання нейронної мережі досить, щоб розмір навчальної вибірки L відповідав співвідношенню:

$$L = O\left(\frac{W}{\varepsilon}\right), \quad (1)$$

де W – загальна кількість параметрів, які налаштовують (вагових коефіцієнтів і порогових значень); ε – точність помилки класифікації; O – порядок величини. Для помилки в 5% кількість прикладів навчання має в 5 разів перевершувати кількість вільних параметрів мережі W . Розглянувши архітектури та властивості мереж, для модуля первинної обробки даних автори використовують багатошаровий перцептрон, а для модуля прогнозування – мережу Хопфілда.

Балансування завантаження сервера – технологія, яка розподіляє сайти з високим трафіком між декількома серверами. Сервери можуть знаходитись у приміщенні власних центрів обробки даних компанії або в хмарі. В роботі обрано метод балансування Sticky Sessions. Він зберігає список IP-адрес за серверами, що підвищує швидкодію балансувальника.

Потік як випадковий процес характеризується статистичними властивостями. Класичним для трафіку в мережах є пуассонівський потік:

$$P(k) = \frac{(\alpha t)^k}{k!} * e^{-\alpha t}, \quad (2)$$

де k – кількість повідомлень; t – проміжок часу; α – інтенсивність потоку. Основною властивістю пуассонівського потоку є його адитивність [7]. Динамічні процеси, які відбуваються в сучасних мережах, належать до стохастичних. Тому потрібна модель, яка є випадковим процесом, керованим іншим випадковим процесом. Система є балансувальником навантаження та виконує функцію розподілу запитів між пулом серверів додатків. При створенні балансувальника навантаження піддається його публічна IP-адреса, яка і є адресою сервера додатків, а балансувальник навантаження розподіляє вхідні запити по пулу реальних серверів (Рис. 1).



Рис. 1. Балансувальник навантаження

Обробка даних в системі відбувається в кілька етапів: виявлення фактів – виділення з мережевого трафіку пакетів, які володіють значущими ознаками; підрахунок фактів – обчислення обсягу пакетів для кожної ознаки; агрегація фактів – визначення кількості пакетів для кожної ознаки за період часу; фільтрація даних – застосування статистичних методів для ослаблення впливу випадкових варіацій у тимчасових рядах; перевірка критеріїв – побудова списку критеріїв мережевих аномалій; отримання результату – визначення типів аномалій, виходячи з отриманої комбінації атак [8].

Виклад основного матеріалу дослідження. Для управління мережею автори застосовували

методи маршрутизації, управління трафіком і контролю завантаженості мережі, основані на даних, які надаються засобами прогнозування трафіку на основі попередніх значень. Для прогнозування було використано штучні нейронні мережі та паралельні динамічні системи з топологією спрямованого графа.

Автори знайшли найкоротший маршрут для групи вузлів мережі. Їх позначили як вузли А, В, С, а відстані між ними d_{AB}, d_{AC}, d_{BC} . Рішенням є впорядкована множина з n вузлів. Послідовність, в якій перебираються вузли, представлено матрицею розміру $n * n$, рядки якої відповідають вузлам, а стовпці – номерам вузлів у послідовності. Для вузлів А, В, С, D, Е послідовність їх обходу задана матрицею, наведеною в Таблиці 1, вузол С підключається першим, вузол А – другим. Довжина маршруту дорівнює $d_{CA} + d_{AE} + \dots + d_{BC}$. В кожному стовпці і в рядку цієї матриці є тільки одна одиниця, оскільки в кожен момент часу підключається тільки один вузол і тільки один раз.

Матрицю автори розглядають як стан нейронної мережі з $N = n^2$ нейронів. З $n/2n$ маршрутів було обрано один із найменшою довжиною. Стан кожного нейрона описується двома індексами, які відповідають вузлу і порядковому номеру підключення. $Y_{ij} = 1$ – вузол $x \in j$ -м по порядку вузлом маршруту.

Таблиця 1

Матриця для групи вузлів

Назва / №	1	2	3	4	5
А	0	1	0	0	0
В	0	0	0	1	0
С	1	0	0	0	0
Д	0	0	0	0	1
Е	0	0	1	0	0

Автори наводять функцію обчислення для мережі, призначеної для вирішення завдання маршрутизації, в якій стан із найменшою енергією відповідає найкоротшим маршрутам. Ця функція виглядає так [7]:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} Y_i I_j - \sum_j I_j Y_j + \sum_j T_j Y_j, \quad (3)$$

де E – обчислювальна енергія мережі; w_{ij} – вага від виходу нейрона i до входу нейрона j ; Y_j – вихід нейрона j ; I_j – вхід нейрона j ; T_j – поріг спрацювання нейрона j . Зміна енергії викликана зміною стану j -го нейрона:

$$\dot{E} = \left(\sum_{i \neq j} (w_{ij} Y_i) + I_j - T_j \right) \dot{Y}_j, \quad (4)$$

де \dot{Y}_j – зміна вхідного j -го нейрона; Y_j – вихід нейрона j ; I_j – зовнішній вхід нейрона j ; T_j – поріг спрацювання нейрона j .

Кожному стану системи відповідає конкретна величина обчислювальної енергії. При цьому функція енергії повинна підтримувати стійкість стану в формі матриці та ті рішення, які відповідають коротким маршрутам. Цим вимогам відповідає функція енергії виду [9]:

$$E = -\frac{A}{2} \sum_x \sum_i \sum_{j \neq i} Y_{xi} Y_{xj} + \frac{B}{2} \sum_i \sum_x \sum_{k \neq x} Y_{xi} Y_{kj} + \frac{C}{2} \left(\sum_x \sum_i Y_{xi} - n \right)^2 + \frac{D}{2} \sum_x \sum_{k \neq x} \sum_i d_{ik} Y_{xi} (Y_{k,j+1} + Y_{k,j-1}), \quad (5)$$

При цьому $Y_{xi} = 0,1$. А, В, С, D – додатні множники. Перший член дорівнює 0, якщо кожен рядок x містить не більше однієї одиниці. Другий член дорівнює нулю, якщо кожен стовпець містить не більше однієї одиниці. Третій член дорівнює нулю, якщо в матриці n одиниць. Без урахування четвертого члена функція енергії має мінімуми ($E = 0$) у станах, представлених матрицею з однією одиницею в кожному стовпці і кожному рядку. Всі інші мають більш високу енергію. Короткі маршрути підтримує четвертий член. В ньому індекси i беруться по $\text{mod } n$, щоб показати, що i -й вузол в маршруті з $(n-1)$ є першим, тобто $Y_{k,j+n} = Y_{k,j}$. Четвертий член дорівнює довжині маршруту. Вибір маршрутів максимізує ступінь вузла в мережі, дозволяє спланувати роботу так, щоб час її виконання був мінімальним.

Система розподіляє запити, які надходять не від всіх серверів, а серед необхідних за інформацією прогнозування. Для розподілу запитів автори використовували метод Sticky Sessions. Перед їх надходженням до модуля прогнозування виконується обробка даних і перевірка на підозрілість.

Сигнатурний аналіз як процес виявлення мережевих атак включає широкий клас правил, спрямованих на порівняння значень певних полів пакетів із рядом сигнатур, заданих користувачем або закладених статично в систему. Для пошуку шаблонних підстрок було використано алгоритм Бойера-Мура. Вхідні дані: підстроки keywords, вихідні дані: таблиці good_stuffs і bad_char. Порівняння вхідного рядка string з keywords здійснюється справа наліво. Величина зсуву задається таблицями good_stuffs і bad_char. Для підвищення швидкості було використано багатопотокове

розпаралелювання операцій пошуку на рівні безлічі шаблонів підстрок.

Дані, які успішно пройшли перевірку на виявлення атак [10], зберігаються до бази даних системи, звідки надсилаються до модулю прогнозування. Було реалізовано і частину системи, відповідальної за прогнозування навантаження на сервіс. Набір даних автори розділили на дві частини: для тестування та для навчання.

```
start_training = 0
end_training = int(np.floor(0.5*n))
start_checking = end_training
end_checking = n
training_data = data[np.arange(start_training,
                                end_training)]
check_data = data [np.arange(start_checking,
                               end_checking)]
```

Архітектури нейронних мереж використовують масштабування вхідних даних. Найчастіше використовуються активації випрямленою лінійною одиницею, тому було вирішено масштабувати вхідні дані і цілі, використовуючи для цієї мети метод MinMaxScaler в Python [11].

```
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
sc = MinMaxScaler()
sc.fit(training_data)
training_data = sc.transform(training_data)
check_data = sc.transform(check_data)
training_X = training_data [1:]
training_Y = training_data [: 0]
check_X = check_data[:, 1:]
check_Y = check_data[:, 0]
```

Підрахунок статистики проводився на тренувальних даних, а потім отриманий результат застосовували до тестових даних.

Для реалізації нейронної мережі було використано TensorFlow. Після імпорту бібліотеки TensorFlow за допомогою `tf.placeholder()` визначалися плейсхолдери. Модель складається з чотирьох прихованих рівнів. Перший містить 1024 нейрони, що вдвічі перевищує обсяг вхідних даних. Наступні приховані рівні завжди вдвічі менші – вони об'єднують 512, 256 і 128 нейронів. Зниження кількості нейронів на кожному рівні стискає інформацію, яку мережа опрацювала на попередніх рівнях:

```
n_count = 500
neurons_count = [1024, 512, 256, 128]
target_count = 1
№ 1 hidden layer
layer_weight_1 = tensor_flow.Variable (weight_initializer ([n_stocks, n_neurons_1])
layer_shift_1 = tensor_flow.Variable (bias_initializer ([neurons_count [0]]).
```

№ 4 hidden layer

```
layer_weight_4 = tensor_flow.Variable (weight_initializer ([neurons_count [2], neurons_count[3])
layer_shift_4 = tensor_flow.Variable (bias_initializer ([neurons_count[3])
```

№ out layer

```
out_weight = tensor_flow.Variable (weight_initializer ([neurons_count [3], target_count])
out_shift = tf.Variable(bias_initializer([n_target])
```

Приховані рівні мережі трансформуються функціями активації. Ці функції – важливі елементи мережевої інфраструктури [12; 13].

Створено нейронну мережу 1024-512-256-128-1 за допомогою бібліотеки TensorFlow та перевірено її функціонування на дата-сеті, взятому у відкритому доступі при прогнозуванні кількості підключень (Рис. 2).

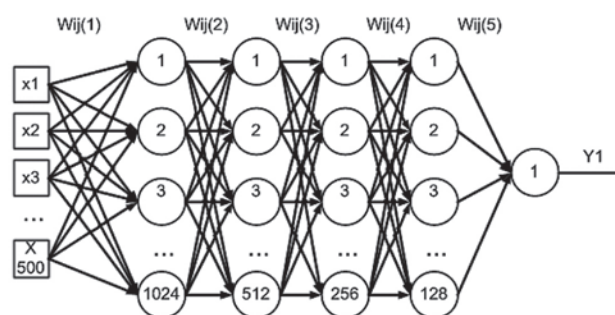


Рис. 2. Архітектура мережі

Інформація прогнозування надходить до керуючого модулю. Він поділяє отримані ряди на рівномірні проміжки часу та залежно від прогнозованої кількості запитів виконує форматування списку серверів. Автори наводять список при всіх активних серверах:

```
upstream somesite
{server general.someserv.com;
server reserve1.someserv.com;
server reserve2.someserv.com;
server reserve3.someserv.com;}
server {location / {proxy_pass http://somesite;}}
```

Далі наведено конфігурацію при не активності деяких серверів:

```
upstream somesite
{server general.someserv.com;
server reserve1.someserv.com;
server reserve2.someserv.com fail_timeout = 1800s;
server reserve3.someserv.com backup;}
```

В разі не використання серверу більше ніж 12 годин, його помічали як бекап-сервер. Сервери, які скоро знадобляться, помічали як `fail_timeout` зі значенням у секундах (скільки часу він вважається вимкнутим) (Рис. 3).



Рис. 3. Загальний алгоритм роботи системи

Потім було виконано перевірку на наявність атаки, а із загальної кількості запитів вираховувалися підозрілі. Після обробки інформація надходила до керуючого модулю. Налаштування на

сервері включає низку етапів. В роботі виконано конфігурування серверів на створення резервних записів та одержання доступу до головного сервера. Автори наводять процес генерації запитів:

```

import requests
def getSite (url):
    response = requests.get(url)
    for i in range(100):
        getSite('http://ec2-18-217-201-16.us-east-2.
        compute.amazonaws.com/')
  
```

При надходженні понад 10 запитів з однієї адреси за 1 секунду виконувалося блокування доступу з цієї адреси на 5 хвилин.

Висновки. В результаті роботи реалізовано систему аналізу використання інтернет-ресурсів на основі нейронних мереж. Система має переваги: статистка та дані належать власнику ресурсу, бо розташовані фізично на головному сервері додатку; дані можна отримати без зайвих зусиль для аналізу в будь-якому сторонньому аналізаторі; система за логікою відділена від основного додатку і зберігає статистику до файлу, тому відсутня ймовірність впливу на статистику під час її перегляду; є можливість проведення спліт-тестів; на відміну від звичайного балансиру навантаження розподіляє користувачів серед необхідної кількості серверів; система зменшує витрати та гарантує максимальну якість обслуговування.

Список літератури:

1. Можливості навчання й підтримки для служби Analytics. URL: <https://support.google.com/analytics/answer/4553001?hl=uk> (дата звернення: 10.03.20).
2. Еволюція структур даних в Яндекс.Метрике. URL: <https://habr.com/ru/company/yandex/blog/273305/> (дата звернення: 10.03.20).
3. Киричек Г.Г., Киричек О.О. Модель оцінки плагіату програмного коду на основі системи контролю версій // Восточно-європейський журнал передових технологій, 2012. № 2(2). С. 25–28.
4. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. URL: <https://www.ling.upenn.edu/courses/cogs501/Rosenblatt1958.pdf> (дата звернення: 10.03.20).
5. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. URL: <https://bi.snu.ac.kr/Courses/g-ai09-2/hopfield82.pdf> (дата звернення: 10.03.20).
6. Zeiler M., Krishnan D., Taylor G., Fergus R. Deconvolutional Networks. URL: <https://www.matthewzeiler.com/mattzeiler/deconvolutionalnetworks.pdf> (дата звернення: 10.03.20).
7. Barbu V. Semi-Markov Chains and Hidden Semi-Markov Models toward Applications. URL: Режим доступу: https://books.google.com.ua/books?hl=en&lr=&id=U9pQ_LyLeLcC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Markov+hidden+chains&ots=LYVh_aJRNi&sig=_Rpw2tKTnSHML6iv9L7KDvukP_Y&redir_esc=y#v=onepage&q=Markov%20hidden%20chains&f=false (дата звернення: 10.03.20).
8. Kirichek G., Harkusha V., Timenko A., Kulykovska N. System for detecting network anomalies using a hybrid of an uncontrolled and controlled neural network. In: CEUR Workshop Proceedings 2546, 2019. P. 138–148.
9. LeCun Y. et al. Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 1998. № 86(11). P. 2278–2324.
10. Tao Y., Yu S. DDoS attack detection at local area networks using information theoretical metrics. 12th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. IEEE, 2013. С. 233–240.
11. Kirichek G., Tymoshenko V., Rudkovskiy O., Hrushko S. Decentralized System for Run Services. In: CEUR Workshop Proceedings 2353, 2019. P. 860–872.

12. Vincent P. et al. Extracting and composing robust features with denoising autoencoders. In: 25th international conference on Machine learning, 2008. P. 1096–1103.
13. Kingma D.P., Welling M. Auto-encoding variational bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114, 2013.

Kirichek G.G., Timoshenko V.C. SYSTEM OF ANALYSIS OF INTERNET RESOURCES USE

In the work carried methods research of analysis of Internet resources use; selected software for system implementation; designed a system of analysis of Internet resources use based on neural networks using the service creately.com, which allows you to create diagrams of different options; the software components of the system are implemented: primary data processing module, forecasting module and control module; experimental study of system modules performance was performed.

In this work propose to research the intensity of packet arrivals and the dependence of load on time and predict further load in the system of analysis of Internet resources use. Object of research – the process of implementing a system of analysis of Internet resources use. Subject – models, methods, software and tools for analyzing network data. Methods used: NumPy (for working with nonlinear algebra); Pandas (for analyzing and manipulating data); Mathplot (for graphical display of data) and TensorFlow are Python-based frameworks for creating neural networks.

In work was perform the modeling of system common modules. The sequence of actions of the primary data processing before entering them in the prediction module is described and simulation of the work of artificial neural network is performed while managing the network bandwid. To test Dos attacks, we use an algorithm with the steps of: detecting the congestion of the communication channel; creating traffic patterns based on the time of the first peak; detecting the sequence of traffic peaks received; making decisions about the presence or absence of an attack.

Key words: *load balancer, computation, artificial neural network, attack, data, framework.*

Лабжинський В.А.

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

НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

Розробка методів автоматизованої діагностики режиму роботи об'єктів промислової електроенергетики та прогнозування споживання електроенергії є важливим завданням у сфері енергетичного обслуговування. Наявність достовірної інформації щодо графіку споживання електроенергії дозволяє оптимальним чином спланувати бюджет як на рівні окремої компанії, так і на державному рівні.

Досліджено сучасні підходи, які використовуються в системах діагностування та прогнозування стану об'єктів промислової електроенергетики. Представлено нейромережеві моделі прогнозування та інтегровані моделі авторегресії ковзного середнього. Визначено особливості застосування нейромережевого підходу при одновимірному прогнозуванні часових рядів. Для оптимізації алгоритмів навчання нейромережевої моделі прогнозування стану об'єктів енергетичної системи було проведено аналіз відповідних статистичних даних експериментальних досліджень. Показано пріоритет нейромережевої моделі над інтегрованою моделлю авторегресії ковзного середнього відповідно до показника точності прогнозування.

Нейромережева структура MLP складається з декількох шарів (вхідного, одного або декількох прихованих та вихідного шару), причому кожен нейрон кожного прихованого шару безпосередньо пов'язаний з усіма нейронами наступного прихованого або вихідного шару через вагові коефіцієнти. Зазвичай для навчання MLP використовуються методи зворотного поширення помилки. Вузли вхідного шару характеризуються функціями лінійної активації, а вузли прихованих і вихідного шару – пороговими значеннями.

В результаті проведеної роботи досліджено сучасні підходи діагностування та прогнозування стану об'єктів промислової електроенергетики, які базуються на нейромережевих моделях прогнозування та інтегрованих моделях авторегресії ковзного середнього. Проведено узагальнення зазначених моделей, адаптовано математичний апарат для методів, в яких використовують інформаційний критерій Акаїке, корегований інформаційний критерій Акаїке та байєсівський інформаційний критерій. Показано пріоритет нейромережевої моделі над інтегрованою моделлю авторегресії ковзного середнього відповідно до показника відносної похибки прогнозування.

Ключові слова: промислова електроенергетика, алгоритм прогнозування, нейромережева модель, інтегрована модель авторегресії ковзного середнього, багатошаровий перцептрон.

Постановка проблеми. Розробка методів автоматизованої діагностики режиму роботи об'єктів промислової електроенергетики та прогнозування споживання електроенергії є важливим завданням у сфері енергетичного обслуговування. Наявність достовірної інформації щодо графіку споживання електроенергії дозволяє оптимальним чином спланувати бюджет як на рівні окремої компанії, так і на державному рівні. При цьому складність вирішення цього завдання полягає не лише у великій кількості параметрів споживання електроенергії, які підлягають аналізу (навантаження, зовнішні умови, ринкова стратегія торгів), але й в тому, що вони не можуть бути описані аналітично через математичні функції [1, 2]. В такому разі очевидним рішенням є впровадження нейромережевих моделей прогнозування та інтегрованих моделей

авторегресії ковзного середнього (autoregressive integrated moving average, ARIMA).

Загалом дослідження характеризується як практичною **актуальністю** для енергетичної промисловості, так і фундаментальною важливістю в галузі інформаційних технологій (далі – ІТ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері діагностики та прогнозування параметрів об'єктів енергетики показав пріоритет нейромережевих алгоритмів (artificial neural networks, ANN) [3, 4]. Важливим аспектом ефективного застосування ANN є врахування нейромережевої структури. В цьому випадку важливо оптимізувати схему з точки зору мінімального використання обчислювальних ресурсів апаратно-програмної платформи.

Так, у роботах [5, 6] було розглянуто роботу з тришаровою нейромережею (вхідний шар,

проміжний шар і вихідний шар), що можна вважати мінімалістичним рішенням, яке надає досить точний результат прогнозування. Крім того, за показниками ефективності та ресурсомісткості ANN були порівняні з іншими традиційними методами класифікації – моделями, які базуються на класичному лінійному дискримінантному аналізі та методиках логістичної регресії [7, 8].

Серед нейромержевих алгоритмів найбільшу увагу було приділено моделі багатошарового перцептрона (multilayer perceptron, MLP), на основі якої було здійснено прогнозування для декількох залежних змінних через врахування значень змінних предиктора [9]. Було розглянуто сучасні алгоритми навчання.

Так, в межах стандартного методу зворотного поширення помилки (back propagation, BP) було проведено аналіз алгоритмів швидкого зворотного поширення помилки (quick back propagation, QBP), еластичного зворотного поширення помилки (resilient back propagation, RBP) та алгоритмів зворотного поширення помилки Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS). Зазначені методики показали для задачі цього дослідження найкращий результат [10, 11]. Для визначення ефективності кожної з моделей було використано статистичні дані по споживанню електроенергії енергетичними об'єктами, які були представлені корпорацією «Хеврат ха-Хашмаль» [12].

При цьому *невирішеною частиною загального завдання* є необхідність узагальнення широкого класу підходів по діагностиці та прогнозуванню параметрів об'єктів енергетики. Тому *метою дослідження* стала розробка методологічної бази побудови високоефективних нейромержевих алгоритмів прогнозування.

1. Узагальнення математичної моделі навчання нейромержевих алгоритмів на базі багатошарового перцептрона. Нейромержева структура MLP складається з декількох шарів (вхідного, одного або декількох прихованих та вихідного шару), причому кожен нейрон кожного прихованого шару безпосередньо пов'язаний з усіма нейронами наступного прихованого або вихідного шару через вагові коефіцієнти.

Зазвичай для навчання MLP використовуються методи зворотного поширення помилки. Вузли вхідного шару характеризуються функціями лінійної активації, а вузли прихованих і вихідного шару – ще й пороговими значеннями. При цьому у вузлів прихованих шарів нелінійна функція активації, а у вузлів вихідного шару – лінійна [13].

Автор статті розглядає математичну модель навчання нейромержевих алгоритмів на базі багатошарового перцептрона. Нехай ми маємо певний зразок роботи енергетичної системи ("P", pattern), сигнали якого в оцифрованому вигляді можуть бути передані через вектор

$$X_p : \{x_p(i)\},$$

де $i \in [1; I]$ – кількість нейронів вхідного шару.

Для представлення на рівні математичного апарату процесу передачі даного сигналу до першого прихованого шару необхідно ввести вектор

$$Y_p^1 : \{y_p^1(j_1)\},$$

де $j_1 \in [1; J_1]$ (кількість прихованих нейронів), що розраховується через функцію активації прихованих нейронів:

$$\hat{y}_p^1(j_1) = F_{I \rightarrow H} \left(\sum_{i=1}^I x_p(i) \cdot w(i, j_1) + \theta(j_1) \right), \quad (1)$$

де $F_{I \rightarrow H}()$ – функція активації прихованих нейронів, $w(i, j_1)$ – вагові коефіцієнти, що поєднують вхідні нейрони та нейрони першого прихованого шару, а $\theta(j_1)$ – порогове значення для нейрону першого прихованого шару.

Аналогічним чином здійснюється перехід від першого до останнього прихованого шару:

$$y_p^1(j_1) \rightarrow y_p^2(j_2) \rightarrow \dots \rightarrow y_p^h(j_h) \rightarrow y_p^{h+1}(j_{h+1}) \rightarrow \dots \rightarrow y_p^{H-1}(j_{H-1}) \rightarrow y_p^H(j_H), \quad (2)$$

де $h \in [1; H]$ – кількість прихованих шарів.

Наступний етап для отримання вектору вихідних значень

$$Z_p : \{z_p(k)\},$$

де $k \in [1; K]$ – кількість нейронів вхідного шару є застосування функції активації вихідних нейронів:

$$\hat{z}_p(k) = F_{H \rightarrow O} \left(\sum_{j_H=1}^{J_H} y_p^H(j_H) \cdot w(j_H, k) + \theta(k) \right), \quad (3)$$

де $F_{H \rightarrow O}()$ – функція активації вихідних нейронів; $\theta(k)$ – порогове значення для нейрону вихідного шару; $w(j_H, k)$ – вагові коефіцієнти, що

поєднують проміжні нейрони останнього прихованого шару та нейрони вихідного шару.

Під час тренування аргументом цільової функції буде середнє квадратичне відхилення від відповідного значення тренувального набору для всіх зразків, що має надалі бути використано у алгоритмах ВР.

2. Узагальнення математичної моделі інтегрованих моделей авторегресії ковзного середнього. Модель авторегресії ковзного середнього (ARMA), яка комбінує модель авторегресії і модель змінного середнього, є стандартною математичною моделлю, яка використовується для прогнозування часових рядів у статистиці. Її розширенням для нестационарних часових рядів є інтегрована модель авторегресії ковзного середнього (ARIMA). В рамках методів на базі ARIMA, крім набору змінних p і q , застосовується процедура визначення різниці певного порядку d від вихідного часового ряду, тобто в ARIMA використовуються інтегровані тимчасові ряди. Таким чином методологія ARIMA може бути використана для моделювання та прогнозування стану енергетичних об'єктів за допомогою нестационарних часових рядів.

Розглянемо нестационарний часовий ряд, який може бути описаний на базі ARIMA через набір показників. Для визначення середнього квадратичного відхилення для такого ряду його можна представити через набір ітерацій, причому для кожного існує як дійсне значення, так і прогнозоване. Середнє квадратичне відхилення розраховується через стандартне рівняння. Для моделювання поведінки об'єктів на базі нестационарних часових рядів за умов обмеження на ресурси обчислювальної системи здебільшого використовують такі підходи [14–19]:

- інформаційний критерій Акаїке (Akaike's information criterion, AIC) [14, 15];
- корегований інформаційний критерій Акаїке (corrected Akaike's information criterion, C-AIC) [18, 19];
- байєсівський інформаційний критерій (Bayesian information criterion, BIC) [16, 17].

За основу розрахунку для кожного з підходів має бути взято повну кількість оцінюваних параметрів моделі. Для інформаційного критерію Акаїке також має бути визначено максимальне значення функції правдоподібності, аргументом якої є вектор коефіцієнтів і розмір вибірки m .

Практика застосування авторегресивних моделей, які використовують інформаційний критерій

Акаїке, вказує на те, що наявна тенденція до перенавчання, що може бути скореговано (скорегований інформаційний критерій Акаїке, адаптований для задачі цього дослідження). Для вирішення проблеми перенавчання може бути використано байєсівський інформаційний критерій, який для моделювання з нульовим середнім описується так: визначивши, для якого критерію мінімальне значення відповідає оптимальній авторегресивній моделі.

3. Співвіднесення точності прогнозування за допомогою ARIMA з моделями на базі багатозарового перцептрона. Першим етапом аналізу стало визначення оптимальних параметрів організації авторегресивної моделі, що включало в себе моделювання інформаційного критерію Акаїке, корегованого інформаційного критерію Акаїке та байєсівського інформаційного критерію для фіксованого набору (Рис. 1–3).

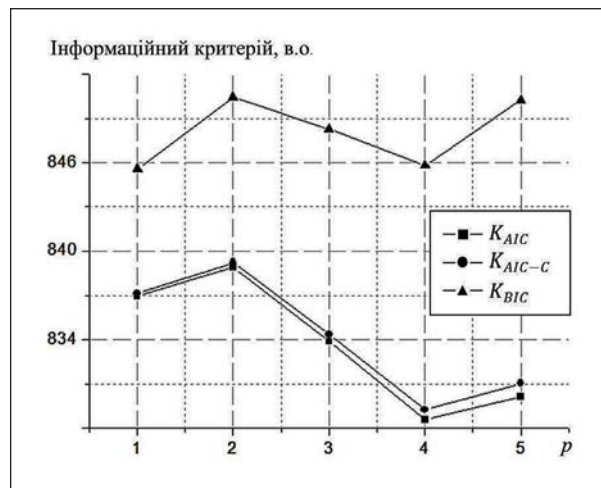


Рис. 1. Графік функції для $q = 0$ і $d = 1$

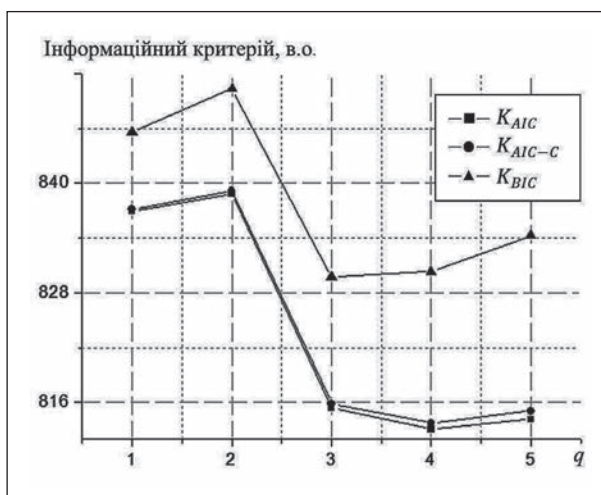


Рис. 2. Графік функції для $p = 0$ і $d = 1$

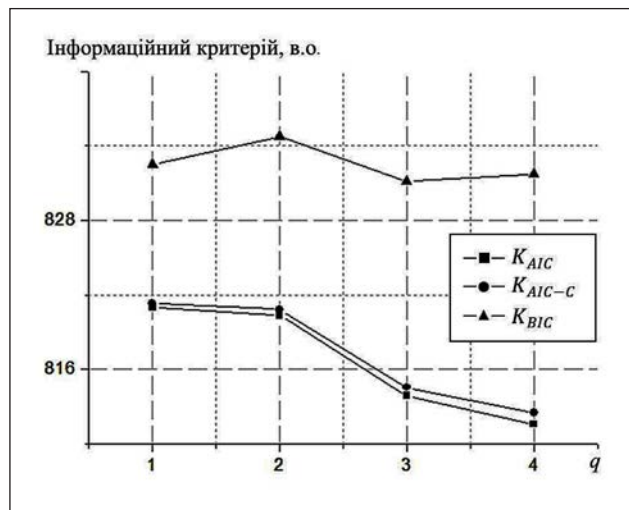


Рис. 3. Графік функції для $p = 1$ і $d = 1$

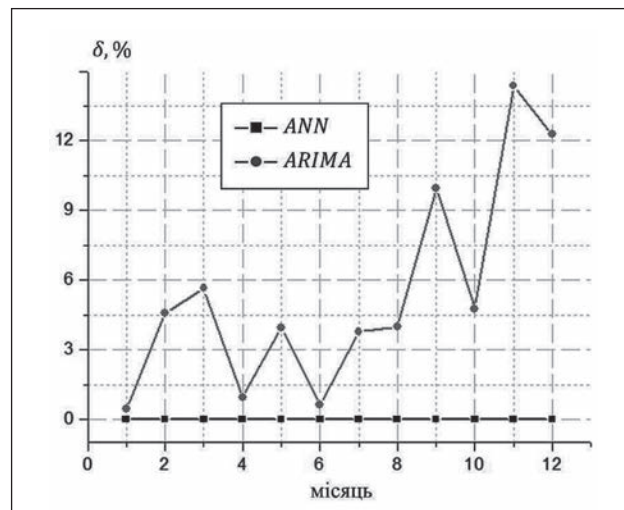


Рис. 4. Визначення відносної похибки прогнозування поведінки об'єкта електроспоживання для нейронмережової та авторегресивної моделі

Як можна побачити з графіків, мінімальне значення критерію було отримано для інформаційного критерію Акаїке (K_{AIC}) для конфігурації. Саме ця модель була порівняна за точністю прогнозування з моделлю на базі багатоваріантного перцептрона шляхом співставлення статистичних даних по споживанню електроенергії енергетичними об'єктами [12]. Як можна побачити на Рис. 4, нейронмережева модель характеризується більшою точністю.

Висновки. В результаті проведеної роботи досліджено сучасні підходи діагностування та прогнозування стану об'єктів промислової елек-

троенергетики, які базуються на нейронмережових моделях прогнозування та інтегрованих моделях авторегресії ковзного середнього.

Проведено узагальнення зазначених моделей, адаптовано математичний апарат для методів, які використовують інформаційний критерій Акаїке, корегований інформаційний критерій Акаїке та байєсівський інформаційний критерій. Показано пріоритет нейронмережової моделі над інтегрованою моделлю авторегресії ковзного середнього відповідно до показника відносної похибки прогнозування.

Список літератури:

1. Pousinho H.M.I., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Short-term electricity prices forecasting in a competitive market by a hybrid PSO-ANFIS approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012. Vol. 39. № 1. P. 29–35.
2. Electricity demand and spot price forecasting using evolutionary computation combined with chaotic nonlinear dynamic model / C. Unsuhay-Vila et al. *International journal of electrical power & energy systems*. 2010. Vol. 32. № 2. P. 108–116.
3. Barbounis T.G., Theocharis J.B. A locally recurrent fuzzy neural network with application to the wind speed prediction using spatial correlation. *Neurocomputing*. 2007. Vol. 70. № 7–9. P. 1525–1542.
4. Mabel M.C., Fernandez E. Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study. *Renewable energy*. 2008. Vol. 33. № 5. P. 986–992.
5. Soriano C.L. & Rivera-Vargas P. Blockchain en Educación. Cadenas rompiendo moldes. *Revista Complutense De Educación*. 2019. Vol. 30(4). P. 1173–1174. doi: 10.5209/rced.63394.
6. Mabel M.C., Fernandez E. Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study. *Renewable energy*. 2008. Vol. 33. № 5. P. 986–992.
7. Cadenas E., Rivera W. Wind speed forecasting in three different regions of Mexico, using a hybrid ARIMA-ANN model. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. № 12. P. 2732–2738. doi: 10.1016/j.renene.2010.04.022.
8. Lee T.S., Chen I.F. A two-stage hybrid credit scoring model using artificial neural networks and multivariate adaptive regression splines. *Expert Systems with Applications*. 2005. Vol. 28. № 4. P. 743–752.
9. Lee T.S., Chiu C.C., Lu C.J. and Chen I.F. Credit scoring using the hybrid neural discriminant technique. *Expert Systems with applications*. 2002. Vol. 23. № 3. P. 245–254.

10. Blanco A. et al. Credit scoring models for the microfinance industry using neural networks: Evidence from Peru. *Expert Systems with applications*. 2013. Vol. 40. № 1. P. 356–364.
11. Liu H., Chen C., Tian H., Li Y. A hybrid model for wind speed prediction using empirical mode decomposition and artificial neural networks. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 48. P. 545–556.
12. Chang G.W., Lu H.J., Hsu L.Y., Chen Y.Y. A hybrid model for forecasting wind speed and wind power generation. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/pesgm.2016.7742039.
13. Safi S.K. Artificial neural networks approach to time series forecasting for electricity consumption in gaza strip. *Artificial Neural Networks Approach to Time Series Forecasting for Electricity Consumption in Gaza Strip*. 2013. Vol. 21. № 2. P. 1–22.
14. Nazzal J.M., El-Emary I.M., Najim S.A. Multilayer perceptron neural network (MLPs) for analyzing the properties of Jordan Oil Shale 1. *World Applied Sciences Journal*, 2008, Vol. 5(5). P. 546–552.
15. Song E., Won S., Lee W. Using the corrected Akaike's information criterion for model selection. *Korean Journal of Applied Statistics*. 2017. Vol. 30. № 1. P. 119–133. doi: 10.5351/kjas.2017.30.1.119.
16. Jordanger L.A., Tjøstheim D. Model selection of copulas: AIC versus a cross validation copula information criterion. *Statistics & Probability Letters*. 2014. Vol. 92. P. 249–255. doi: 10.1016/j.spl.2014.06.006.
17. Cavanaugh J.E. Model Selection: Bayesian Information Criterion. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. 2016. P. 1–3. doi: 10.1002/9781118445112.stat00247.pub2.
18. Yang W., Yan W., Tu S.-T. & Liao M.-S. An Unsupervised Classification Method of POLINSAR Image Based on Bayesian Information Criterion. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2013. Vol. 34(11). P. 2628–2634. doi: 10.3724/sp.j.1146.2012.00448.
19. Akpa O.M. & Unuabonah E.I. Small-Sample Corrected Akaike Information Criterion: An appropriate statistical tool for ranking of adsorption isotherm models. 2011. *Desalination*. Vol. 272 (1-3). P. 20–26. doi: 10.1016/j.desal.2010.12.057.
20. Kletting P. & Glatting G. Model selection for time-activity curves: The corrected Akaike information criterion and the F-test. 2009. *Zeitschrift Für Medizinische Physik*. Vol. 19(3). P. 200–206. doi: 10.1016/j.zemedi.2009.05.003.

Labzhynskiy V.A. NEURAL NETWORK METHODS FOR DIAGNOSING THE STATE OF POWER ASSETS

Development of methods of automated diagnostics of the mode of operation of industrial power assets and forecasting electricity consumption is an important task in the field of energy services. The availability of reliable information on the electricity consumption schedule allows optimal planning of the budget at the levels of both the individual company and the state level. The modern approaches used in the systems of diagnosing and forecasting the state of industrial power assets are investigated. Neural network forecasting models and integrated autoregressive moving average models are presented.

The peculiarities of application of neural network approach in one-dimensional time series forecasting are determined. The relevant statistical data of experimental studies were analysed in order to optimize the learning algorithms of the neural network model for predicting the state of power assets. The priority of the neural network model over the integrated autoregressive moving average model according to the prediction accuracy indicator is shown. The MLP neural network structure consists of several layers (input, one or more hidden and output layers), and each neuron of each hidden layer is directly connected to all neurons of the next hidden or output layer through weighting factors.

Typically, MLP back-propagation methods are used to teach MLP. The input layer nodes are characterized by linear activation functions, and the hidden and output layer nodes are also characterized by thresholds. As a result of this work, modern approaches to diagnosing and predicting the status of industrial power assets based on neural network forecasting models and integrated autoregressive moving average models are investigated.

These models are generalized, mathematical tools for the methods using Akaike information criterion, adjusted Akaike information criterion and Bayesian information criterion are adapted. The priority of the neural network model over the integrated autoregressive moving average model according to the index of relative forecasting error is shown.

Key words: industrial power engineering, forecasting algorithm, neural network model, integrated autoregressive moving average model, multilayer perceptron.

Лобачев М.В.

Одесский национальный политехнический университет

Мещеряков Д.В.

АО PETROSOFT

ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Розглянуті особливості побудови управляючих біотехнічних систем з біологічним зворотнім зв'язком пов'язані з впливом запізнення на сталість системи регулювання. Проаналізовано вплив запізнення автоматичних технічних систем регулювання на сталість їх функціонування. Виявлено, що розглянуті системи передбачають незмінність часу запізнення, компенсація якого вводиться в алгоритм непараметричного регулятора. Зазначено, що основною проблемою створення управляючих систем із біологічним зворотнім зв'язком є неоднозначність і зміна затримання реакції фізіологічної системи на однаковий вхідний вплив.

Показано, що в медичних застосуваннях при проведенні фізіотерапевтичних процедур можливе використання тільки неінвазивних методів зчитування ознакової інформації. В якості автоматичної системи регулювання з біологічним зворотнім зв'язком вибрано інфрачервону камеру пелюїдотерапії, а управляючої ознаки – опір шкіряного покриву. Випромінювачі інфрачервоного випромінювання різних спектральних діапазонів мають сталі часу, які суттєво відрізняються.

Зв'язок між опором шкіряного покриву та інтенсивністю інфрачервоного випромінювання є якісним і не описується аналітичними залежностями. Змінні запізнення відгуку біологічного об'єкту, суттєвий розкид сталих часу випромінювачів, простота реалізації передбачає врахування цих обставин при розробці біотехнічних систем регулювання. Запропоновано використання розімкнутих цифрових систем автоматичного регулювання для підвищення сталості систем із біологічних зворотнім зв'язком.

Представлено варіант схеми регулювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання по зміні опору шкіряного покриву людини, що знаходиться в полі дії випромінювання. В якості алгоритму регулювання вибрано принцип послідовного наближення, при якому час знаходження системи у замкнутому стані суттєво менше часу її знаходження в замкнутому стані.

Ключові слова: біологічний зворотній зв'язок, запізнення, сталість, системи регулювання, інтенсивність випромінювання.

Постановка проблеми. Биотехнические системы, в которых человек находится в цепи обратной связи, относятся к достаточно новому типу систем регулирования, область применения которых непрерывно расширяется. Это связано с тем, что разнотипные задачи человеком и техническими средствами решаются с различной степенью эффективности. Человек значительно лучше решает задачи принятия решений, распознавания образов, особенно в условиях недостаточной определенности, нехватки исходной информации или ее противоречивости.

Компьютерная система существенно быстрее обрабатывает данные, для нее отсутствует проблема усталости, потери внимания, характерна логичность действий и результатов. Совместное функционирование биологических и технических объектов в биотехнических системах потенциально позволяет использовать достоинства как

физиологической, так и кибернетической составляющей системы, что расширяет ее интеллектуальные возможности.

Отличающиеся описания физиологической и кибернетической систем составляют значимую проблему построения биотехнических систем. Такие фундаментальные понятия теории автоматического управления как «переходная», «весовая», «передаточная» функции предполагают повторяемость выходной реакции технического элемента на стандартное входное воздействие. Сложность и взаимосвязанность биологической системы не обеспечивает однозначность реакции на входное воздействие. Возможность описания физиологической системы понятийным аппаратом кибернетических управляющих систем в настоящее время приемлема только для сравнительно простых задач. Постоянно возрастающая потребность в таких системах, используемых

при прийнятті рішень оператором енергетических станцій, при управленні динаміческими об'єктами, управленні рухом авіаційними диспетчерами роблять цю задачу актуальною.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Можливості біотехніческих систем з біологіческої зворотної зв'язью особливо ядро проявляються в медических приложеннях. В психології [1], де кібернетическа система активізує внутрішні резерви організму для протидії захворюванню, при підготовці професіональних спортсменів [2] для об'єктивізації можливостей організму к перенесенню нагрузок професіональними спортсменами, при реабілітаційних посттравматических [3] і постінсультних заходах [4] для відновлення рухових функцій.

Аналізу основної проблеми побудови систем з біологіческої зворотної зв'язью, що здійснюється в узгодженні фізіологіческої і кібернетическої моделей, присвячена робота [5]. Фізіологіческа система суттєво складніша кібернетическої, вона нелінійна, однакові входні впливи дають різні відповідні реакції, що ускладнює побудову керуючих систем на відпрацьованих кібернетических принципах [6].

Наслідком цього є складність, а зазвичай і неможливість використання кібернетических принципів описання функцій людського організму, оскільки реакція виділенних підсистем на стандартне входнє вплив не є однозначною. Математических методів, заснованих на ймовірнісних або нечітких зв'язностях, вважається недостатньо для адекватного описання фізіологіческої системи, що входить в структуру керуючої системи.

Відомо [7], що системи автоматического регулювання будуються по двом основним структурним схемам: розімкнутим і замкнутим. Замкнуті структури мають більш високими можливостями по реалізації складних алгоритмів управління і досяжності точності регулювання. Однак замкнутому способу регулювання притаманні і певні недоліки, найбільш важливими з яких для розглядаємої задачі є більш низькі динаміческі характеристики і стійкість, що залежить від фазових характеристик складових ланок і запізнення [8].

Вопросам впливу запізнення на стійкість техніческих систем автоматического регулювання присвячена робота [9]. Однак біоло-

гіческа зворотна зв'язь вносить свої корективи, оскільки час затримки реакції біологіческого об'єкта на входнє вплив неоднорідно. Воно залежить як від шляху проходження сигналу, так і пріоритетності цього сигналу по відношенню к сигналам інших призначень, забезпечуючих гомеостаз організму [10]. Враховуючи крайню складність загального рішення проблеми, автори обмежились розглядом інфрачервоної камери пеллоїдотерапії з біологіческої зворотної зв'язью, призначеної для лікування опорно-рухового апарату людини [11].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є зменшення впливу запізнення на стійкість біотехніческої системи регулювання інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по вихідним ознакам біологіческого об'єкта як реакції на цє вплив. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1) проаналізувати існуючі методи підвищення стійкості систем регулювання з запізненням відносно їх застосовності для систем з біологіческої зворотної зв'язью;

2) розробити стійку автоматическу систему управління інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по фізіологіческій реакції організму, що знаходиться в ланці біологіческої зворотної зв'язі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори розглядають інфрачервону систему пеллоїдотерапії, як типову біотехніческу систему з біологіческої зворотної зв'язью [11]. Камера представляє собою конструкцію інфрачервоних випромінювачів довгохвильового, середньохвильового і короткохвильового спектрального діапазону, розташованих всередині аналога фотометрического куля, що забезпечує рівномірне поле випромінювання пацієнта.

Оскільки найбільша ефективність процедури лікування опорно-рухового апарату при лікуванні досягається в початковій стадії потовиділення, інтенсивність випромінювання повинна підбиратися медическим персоналом індивідуально для кожного пацієнта. Представлений підхід з біологіческої зворотної зв'язью, що використовує дані про фізіологіческую реакцію організму на інфрачервонє вплив [12], сприяє вирішенню цієї проблеми.

Важливим властивістю біологіческої системи є підтримання гомеостазу, то єсть якісних показувачів основних

параметров в заданном диапазоне для обеспечения функционирования организма путем адаптации в допустимых пределах к внешним условиям существования [13]. Сохранение устойчивости физиологической системы к внешним воздействиям является важнейшим свойством при включении биологического объекта в цепь обратной связи биотехнической системы регулирования. Физиологическая и кибернетическая системы для их взаимодействия в биотехнической системе регулирования должны иметь зону перекрытия (Рис. 1), в которой их характеристики сопрягаются. Зона сопряжения основывается на принципах адекватности и единства информационной среды, которая существует между техническими и биологическими элементами.

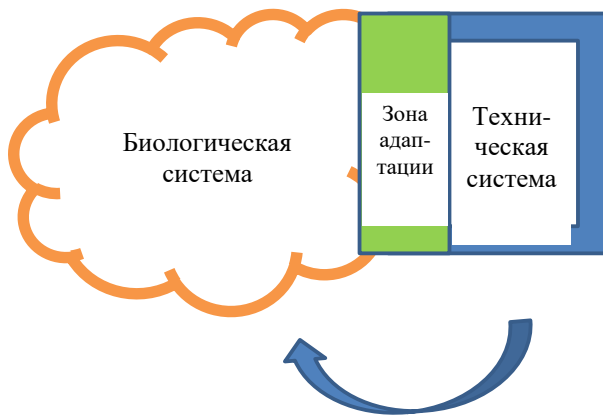


Рис. 1. Обобщенная схема биотехнической системы регулирования

Взаимодействие биологической и технической составляющих системы регулирования решается путем информационно-энергетического обмена между подсистемами. Информационная составляющая, характеризующая реакцию организма на интенсивность инфракрасного излучения (повышение температуры за счет поглощения кожным покровом человека), выражается через изменения сопротивления кожного покрова, частоты сердечных сокращений и дыхания, поверхностной температуры кожного покрова. Энергетическая составляющая ограничивается сверху допустимой интенсивностью, не допускающей ожога, или болевыми ощущениями, а снизу – температурным дискомфортом.

В цифровых системах управления признаковое пространство субъекта передается в систему переработки данных и принятия решений относительно требуемой интенсивности инфракрасного излучения через кодер, канал связи и деко-

дер, которые вносят запаздывание. Признаковое пространство, включающее данные о сопротивлении кожного покрова, потоотделении, частоте сердечных сокращений и дыхания, температуре эпидермиса, имеет различную информативную значимость для управления. Часть информации теряется вследствие конечности числа уровней квантования и дискретности считывания. Строгий анализ погрешностей квантования представлен в [14], поэтому авторы остановились на некоторых особенностях, важных для систем с биологической обратной связью. Для управляющих систем значимым фактором является влияние запаздывания, вносимое каждым элементом системы, которое сказывается на устойчивости системы.

Внешние воздействия на биологический объект могут привести к потере устойчивости системы регулирования, то есть возможности возвращения ее в состояние равновесия после прекращения возмущения. Анализ устойчивости автоматических систем управления осуществляют с помощью алгебраических и частотных критериев. Однако наиболее просто формируется критерий устойчивости Найквиста: замкнутая система устойчива, если годограф передаточной функции разомкнутой системы не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, j0)$ [7]. Критерий устойчивости Найквиста позволяет по устойчивости разомкнутой системы судить о качестве замкнутой, что важно для дальнейших рассуждений.

Запаздывание сигнала в элементах, передача информации по цифровым каналам связи оказывают непосредственное влияние на устойчивость системы управления. Связь между входной величиной $x(t)$ и выходной $y(t)$ имеет вид $y(t) = x(t - \tau)$, где τ – постоянная времени запаздывания, а передаточная функция звена запаздывания:

$$W_{\text{зан}}(s) = \exp(-s \tau), \quad (1)$$

Известно, что большинство объектов регулирования достаточно хорошо аппроксимируются инерционной системой второго порядка с запаздыванием. Повышение порядка обычно неоправданно, поскольку становятся значимыми внешние шумы и иные влияния. Система, состоящая из регулятора и объекта, описывается дифференциальным уравнением

$$T_2^2 x''(t) + T_1 x'(t) + x(t) = k \cdot u(t - \tau), \quad (2)$$

Или в операторной форме

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-\tau p)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи объекта регулирования.

В упрощенном варианте керамические и трубчатые инфракрасные излучатели можно аппроксимировать динамической системой первого порядка:

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-\tau p)}{T_1 p + 1}, \quad (4)$$

Для технических систем анализ передаточных функций позволяет строить оптимальные системы регулирования при известных параметрах и точном знании времени запаздывания. Однако неполнота исходной информации и неопределенность запаздывания, присущие биологическим объектам, не позволяют в настоящее время даже ставить вопрос оптимизации.

В последнее время получают распространение схемы двухконтурного управления, первый контур которых занимает обычный регулятор, а второй – непараметрический регулятор, замкнутый на первичный регулятор [15]. Чаще всего первый регулятор является аналоговым, непараметрический – всегда цифровой, поскольку на него возлагаются интеллектуальные функции, которые включают построение обратной весовой характеристики системы.

Из критерия устойчивости Найквиста следует, что амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы имеет такой вид [16]:

$$W(j\omega) \cdot \exp(-j\omega\tau) = A(\omega) \cdot \exp[j\phi(\omega)] \cdot \exp(-j\omega\tau) = A(\omega) \cdot \exp[j(\phi(\omega) - \omega\tau)] \quad (5)$$

Из этого выражения следует, что звено запаздывания не меняет модуль $A(\omega)$ амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы, а вносит лишь дополнительный фазовый сдвиг $\omega\tau$, пропорциональный частоте ω с коэффициентом пропорциональности, равным времени запаздывания τ . С ростом частоты модуль $A(\omega)$ уменьшается и $W(j\omega)$ принимает вид спирали относительно начала координат. При этом устойчивость системы ухудшается, поскольку вся $W(j\omega)$ приближается к критической точке $(-1, j0)$. Что касается замкнутой системы, то для ее устойчивости необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика разомкну-

той системы не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$. Для обеспечения устойчивости разомкнутой системы необходимо обеспечить время запаздывания

$$\tau < \tau_{кр} = \frac{\phi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}}, \quad (6)$$

Применительно к рассматриваемой задаче управления в биотехнических системах важным свойством критерия Найквиста является то, что он может быть использован для случая, когда неизвестны аналитические зависимости некоторых звеньев системы. Более того, он применим и для анализа устойчивости разомкнутой системы с запаздыванием, амплитудно-фазовая характеристика которой может быть получена экспериментально [16].

Для системы с коммутационными ограничениями связь между процессом управления и передачи признаков данных оказывает влияние на устойчивость и качество стабилизации. Аналитическое описание запаздывания реакции человека на входное воздействие крайне затруднительно, сигналы обрабатываются периферийными подсистемами, а сенсорная система человека замыкается на центральную нервную систему. Путь сигналов отклика может иметь различные каналы прохождения в зависимости от локальных целей организма и многократно трансформироваться с подключением обратных связей на предшествующие узлы преобразования.

Время скрытых рефлексных реакций человека на раздражитель лежит в пределах [10]: 0,36-0,40 сек. – на тепловое болевое раздражение, 0,50-0,80 сек. – на тепловое контактное раздражение, 0,28-1,60 сек. – результирующая реакция на тепловое раздражение. Изменение частоты пульса как ответ на дозированную физическую нагрузку составляет $1,2 \pm 0,1$ сек. Реакция потоотделения на дозированную физическую нагрузку составляет $4,3 \pm 0,2$ сек. Реакция расширения просвета сосудов составляет $7,8 \pm 1,0$ сек., а реакция сужения просвета сосудов – $8,9 \pm 0,9$ сек. Отсюда следует, что процесс реакции организма на тепловое воздействие по сопротивлению кожного покрова и частоте сердечных сокращений можно считать с периодом не менее 2 сек, потоотделения – примерно 10 сек. Очевидно, что стандартная аппаратура осуществляет усреднение показаний по нескольким измерениям для повышения повторяемости, поэтому запаздывание считывания показаний еще более возрастает.

Основным элементом запаздывания камеры пелоидотерапии являются инфракрасные

излучатели различных спектральных диапазонов, построенные на принципе излучения нагретых поверхностей. Ламповые излучатели коротковолнового спектрального диапазона имеют постоянную времени примерно 2 сек., трубчатые средневолнового спектрального диапазона – примерно 2 мин., керамические длинноволнового спектрального диапазона – примерно 6 минут.

Значительный разброс постоянных времени излучателей приводит к необходимости их подключения таким образом, чтобы влияние запаздывания было минимальным. Частным случаем такого решения может служить равное распределение интенсивности излучения источников различных спектральных диапазонов. Рабочий терапевтический диапазон интенсивностей инфракрасного излучения не превышает 30-40% от максимальной интенсивности камеры, поэтому управление излучением в этом диапазоне возможно вести практически от источника с минимальной постоянной времени. Параллельно включенные излучатели с большой постоянной времени исполняют роль стабилизирующего фактора.

На Рис. 2 представлено устройство регулирования интенсивности инфракрасного излучения, использующее в качестве первичного признака сопротивление кожного покрова человека в качестве основной первичной информации относительно воздействия на него облучения. Устройство регулирования включает биологический объект 1, систему считывания сопротивления кожного покрова 2, устройство принятия решений с датчиком 3, драйвер 4, инфракрасные излучатели 5.

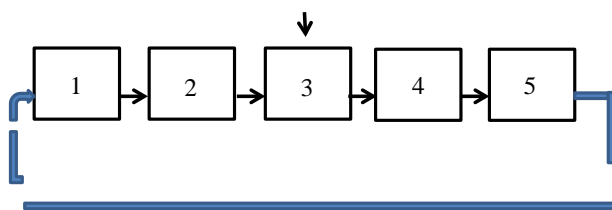


Рис. 2. Схема регулирования камеры пелоидотерапии с БОС

Основными элементами системы являются человек 1 и облучаемые его инфракрасные излучатели 5, которые являются устойчивыми звеньями в диапазоне терапевтического воздействия. Физиологическая система 1 самостоятельно поддерживает устойчивое состояние (гомеостаз) в диапазоне воздействий теплового поля. Инфракрасные излучатели выполнены в виде нагревательных элементов с различной температурой

поверхности и в соответствии с законом Вина генерируют излучение в отличающихся спектральных диапазонах. Блоки 2, 3 и 4 образуют регулятор, выполненный на принципе последовательного приближения. Выборка о сопротивлении кожного покрова, считываемая блоком 2, поступает на блок принятия решений 3, который изменяет содержимое реверсивного счетчика уровня интенсивности излучения драйвера 4 на единицу. Таким образом, в момент существования выборки система регулирования является замкнутой, а после его окончания содержимое счетчика не меняется и система регулирования становится разомкнутой.

Устойчивость разомкнутой системы при малых изменениях входного воздействия (например, 1/256) при периоде выборки, превышающем запаздывание реакции биологического объекта, высока, а заложенный принцип дельта модуляции относится к наиболее устойчивым при низком отношении сигнал / шум. Основным недостатком предложенной системы регулирования интенсивности излучения по сопротивлению кожного покрова является низкая динамика, поэтому схема рекомендуется для условий, когда физиотерапевтическая камера пелоидотерапии предварительно выведена в зону режима автоматического регулирования. Реализация схемы на основе технологии ARDUINO с широтно-импульсным управлением параллельно включенных керамических, трубчатых и ламповых инфракрасных излучателей показало, что система соответствует терапевтическим требованиям. Время выхода на активный режим при предварительно прогретой камере пелоидотерапии не превышало 3 минут при длительности процедуры 20 минут.

Для повышения динамических характеристик системы с большим запаздыванием авторы воспользовались принципом отношений, используемым в регуляторах с предиктором Смита [17]. Основным достоинством таких систем является возможность поддержания не абсолютных значений параметров, а соотношения между ними. Был выделен дополнительный информативный признак, который имеет более высокие динамические характеристики, чем изменение сопротивления кожного покрова. Таким признаком может служить температура поверхности кожного покрова, которую можно считывать бесконтактно инфракрасными термометрами. Так, время измерения температуры бесконтактным термометром Oromed ORO-T 30 BABY составляет 0,1 сек., температурный диапазон 0-60°C.

Модифицированная схема регулирования камеры пелоидотерапии с биологической обратной связью и разделением каналов с малым и большим временем запаздывания представлена на Рис. 3.

Первый канал 2-5 управления инерционными излучателями работает по структуре, аналогичной Рис. 2. В малоинерционном канале пирометр 6 считывает поверхностную температуру кожи пациента, передает данные на схему принятия решений 7 и через драйвер 8 управляет динамичными ламповыми инфракрасными излучателями 9. Распределение приоритетов по использованию каналов с различной инерционностью обеспечивает блок 11, который по сопротивлению кожного покрова определяет зону регулирования.

В начальной стадии при высоком сопротивлении кожного покрова (недостаточное количество тепла для начала потовыделения) основную нагрузку берут на себя малоинерционные излучатели. При выходе на терапевтический режим основная нагрузка ложится на инерционные керамические излучатели как наиболее стабильные и надежные. Блоки 4 и 8 синхронизированы между собой, поэтому система практически все время работает как разомкнутая, что обеспечивает ее устойчивость.

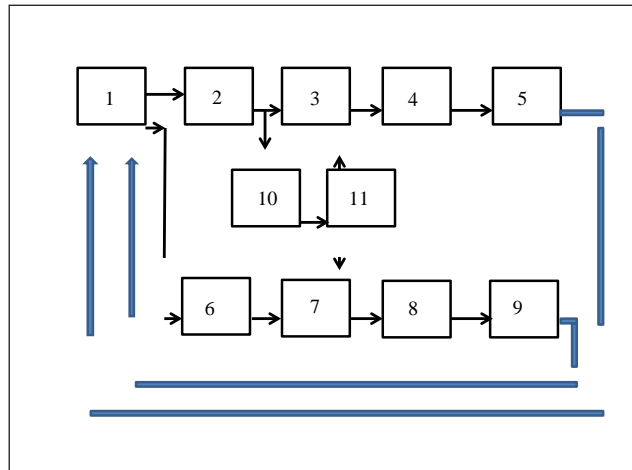


Рис. 3. Схема регулирования с управлением потоками

Выводы. Проанализированы подходы повышения устойчивости автоматических систем регулирования с биологической обратной связью применительно к инфракрасным физиотерапевтическим системам пелоидотерапии.

Разработана схема управления интенсивностью инфракрасного излучения по сопротивлению кожного покрова пациента, расположенного в цепи обратной связи, предложена ее модификация.

Список литературы:

1. 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). *Обзорение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева*. 2010. № 1. С. 15–20.
2. Сороко С.И., Трубочев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. СПб : ИЭФБ РАН. 2010. 607 с.
3. 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.
4. 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.
5. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. М. : 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. Медведев Ю.И. Курс лекций по теории автоматического управления. Часть 2 : Учебное пособие. Томск : Том. ун-т. 2006. 87 с.
8. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. Системы автоматического управления с запаздыванием : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.
9. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кравченко В.В. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. Минск : Вышэйшая школа. 2017. 240 с.
10. Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Патологическая физиология. Том 2. СПб : ЭЛБИ-СПб, 2007. 768 с.
11. Декларацийний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелюїдотерапії та камера для його здійснення. Косоверов С.О., Тишук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.
12. Гнатовская А.А., Мещеряков Д.В., Черепанова Е.В. Концепция преобразования данных инфракрасной системой с биологической обратной связью. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). № 2. С. 116–120.

13. Бондарева Л.А., Дунаев А.В. Биотехнические медицинские системы терапевтического назначения. Учебное пособие. Орел : ОрелГТУ, 2005. 64 с.

14. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления. М. : Ленард, 2019. 504 с.

15. Пупков А.Н., Телешева Н.Ф., Царев Р.Ю., Чубаров А.В., Шестернева О.В. О непараметрическом двухконтурном управлении линейными динамическими системами и настройке параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели ЛДС. Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=1032>.

16. Бесекаерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М. : Профессия, 2007. 752 с.

17. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза. Учеб. пособие для вузов. СПб : БХВ-Петербург, 2004. 604 с.

Lobachov M.V., Mescheryakov D.V. INFLUENCE OF DELAY ON THE STABILITY OF A REGULATORY SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

Consideration of the features of building control biotechnological systems with biological feedback related to the influence of delay on the stability of the regulatory system. The influence of the delay of automatic technical control systems on the stability of their functioning is analyzed. It was revealed that the systems considered assume that the delay time is constant, the compensation of which is laid down in the algorithm of the nonparametric controller. It is noted that the main problem of creating control systems with biological feedback is the ambiguity and change in the delay time of the response of the physiological system to the same input effect.

It is shown that in medical applications during physiotherapeutic procedures it is possible to use only non-invasive methods for reading indicative information. An infrared camera for peloid therapy was chosen as an automatic control system with biological feedback, and skin resistance was the control output feature. Infrared emitters of different spectral ranges have significantly different time constants. The relationship between the resistance of the skin and the intensity of infrared radiation is qualitative and is not described by analytical dependencies.

Variable delay in the response of a biological object, a significant scatter of the emitter time constants, the required ease of implementation, requires taking these circumstances into account when developing biotechnological control systems. The use of open digital automatic control systems to increase the stability of systems with biological feedback is proposed.

A variant of a scheme for controlling the intensity of infrared radiation by changing the resistance of the skin of a person in the field of radiation exposure is presented. As a control algorithm, the principle of successive approximation is chosen, in which the time spent by the system in the closed state is significantly less than the time spent in the open state.

Key words: biological feedback, delay, stability, control systems, radiation intensity.

УДК 004.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/19>**Марчук Г.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Лисогор Ю.І.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Мисливий М.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗПІЗНАВАННЯ РОЗМІННИХ МОНЕТ УКРАЇНИ РІЗНОГО НОМІНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

У статті розглядається метод розпізнавання дрібних монет різного розміру, кольору та номіналу, які вилучаються з готівкового обігу України. Основне завдання полягає в створенні програмного додатку для визначення номіналу, кількості монет і підрахунку їх суми з використанням комп'ютерного зору. В роботі використовуються технології визначення об'єктів за допомогою бібліотеки OpenCV.

Одним із найефективніших методів пошуку аналітично заданих примітивів натепер є група методів, заснованих на ідеї перетворення Хафа (Hough transform). Перетворення Хафа – це метод виявлення прямих і кривих ліній на напівтонових або кольорових зображеннях. Метод дозволяє вказати параметри сімейства кривих і забезпечує пошук на зображенні множини кривих заданого сімейства. В роботі розглядається застосування алгоритму для пошуку кіл на зображенні. Загальний алгоритм роботи програмного додатку полягає у першочерговому визначенні типу монет, що знаходяться на зображенні.

Всі розмінні монети України випускаються в двох кольорах. Перша група – одна, дві, п'ять копійок – це нержавіюча сталь або алюмінієвий сплав, який має сріблястий колір. Друга група – десять, двадцять п'ять, п'ятдесят копійок і одна гривня. Це латунь, яка має жовтий (золотий) колір. Відштовхуючись від матеріалу, визначається їхній радіус за допомогою розробленого алгоритму.

Інформація про діаметр розмінних та обігових монет України взята на сайті Національного Банку України. Правильна ідентифікація монет досягнута у 82,21% випадків. Розглянуті в статті механізми розпізнавання і підрахунку монет можуть бути використані в різних фінансових установах. Створений програмний додаток дозволяє підрахувати суму монет дрібних номіналів, використовуючи фотографію; може розпізнавати монети різного номіналу та кольору старого та нового зразка.

Ключові слова: монета, комп'ютерний зір, алгоритм, коло, аналіз.

Постановка проблеми. В Україні з першого жовтня 2019 року вилучаються з обігу монети номіналом одна, дві та п'ять копійок. За даними НБУ на перше липня 2019 року в обігу знаходиться монет на 2,4 млрд грн (13,2 млрд шт.). Відповідно до Постанови правління НБУ № 82 «Про вилучення з готівкового обігу монет дрібних номіналів» монети можуть бути обміняні на діючі гроші протягом трьох років: до 30 вересня 2020 року в усіх відділеннях українських банків, а до 30 вересня 2022 року – тільки в Національному банку та в уповноважених фінансових установах. Щоб не витратити час на такі неприбуткові операції, фінансові установи відмовляють користувачам в обміні монет. Для усунення цієї проблеми було прийнято рішення про створення програмного додатку, який би зміг розпізнавати монети, їх кількість і номінал, видавати загальну суму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Актуальність розробки програм із використанням комп'ютерного зору стає все більш незаперечною. Одним із найефективніших методів, які застосовуються під час аналізу та ідентифікації геометричних елементів в растрових зображеннях, є перетворення Хафа. Однак розширення звичайного перетворення Хафа для ідентифікації кіл та еліпсів було обмежене повільною швидкістю та надмірною пам'яттю.

В роботі [1] представлені методи, спрямовані на підвищення ефективності та зменшення розміру пам'яті масиву акумуляторів. На основі цих методів потрібен лише двовимірний масив для виявлення кіл і еліпсів. В роботі “Automatic Coin Classification and Identification” [2] проведена класифікація об'єктів в умовах із великою кількістю класів, а також розпізнавання та ідентифікації

окремих об'єктів з високою схожістю. Ідентифікація досліджується для ручних виготовлених старовинних монет. У статті [3] на підставі радіусу класифікуються монети різного номіналу. Результат експерименту показує, що перетворення Хафа є ефективним інструментом для виявлення монет навіть при наявності шуму.

Постановка завдання – створити програмний додаток для визначення номіналу та кількості монет з використанням бібліотеки OpenCV та її вбудованої функції, яка реалізує алгоритм знаходження кіл на зображенні за допомогою перетворення Хафа. Інформація про діаметр розмінних та обігових монет України була отримана на сайті Національного Банку України.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із найефективніших методів пошуку заданих примітивів натепер є група методів, заснованих на ідеї перетворення Хафа [4]. Автори застосовують принцип виявлення кола відомого радіуса. Математично коло можна представити такою формулою:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2,$$

де (x_0, y_0) – координати центру кола, а R – радіус.

Для однозначного завдання кола необхідно знати координати центру і радіус (Рис. 1). Це призводить до збільшення простору Хафа на вимір. Завдання спрощується, якщо радіус кіл, які потрібно знайти, заздалегідь відомий. В такому випадку необхідно знаходити тільки координати центрів кіл.

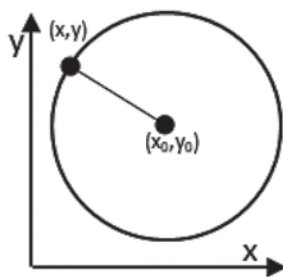


Рис. 1. Коло з центром в точці (x_0, y_0)

Оскільки набір центрів всіх можливих кіл радіуса R , які проходять через задану точку, утворює коло радіуса R навколо цієї точки, функція відгуку в перетворенні Хафа для пошуку кіл відомого розміру є колом такого ж розміру з центром в голосуючій точці.

Найкраще рішення щодо положення центру в конкретній множині точок кола відповідає точці

перетину максимальної кількості голосуючих кіл. Алгоритм пошуку кіл заданого радіуса на зображенні зводиться до «малювання» у фазовому просторі кіл з центрами в усіх непустих точках зображення і подальшого пошуку локальних максимумів простору Хафа (Рис. 2). При цьому можуть використовуватися різні методи аналізу простору параметрів, наприклад пошук фіксованої кількості локальних максимумів, порогова сегментація акумуляторної функції, що виключає пошук глобального максимуму акумуляторної функції [4].

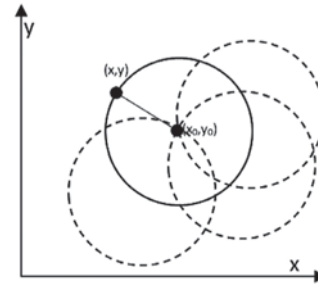


Рис. 2. Розпізнавання округлості методом Хафа

Загальний алгоритм роботи програми полягає в першочерговому визначенні типу монет, які знаходяться на зображенні. Після цього, відштовхуючись від матеріалу, визначається їхній радіус за допомогою алгоритму, схема якого зображена на Рисунку 3.

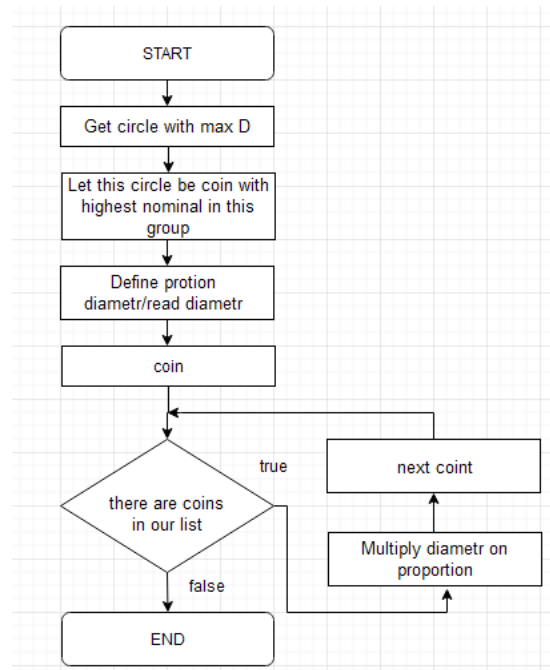


Рис. 3. Блок-схема визначення номіналу монети

Після зчитування всіх кіл на зображенні програма припускає, що це є монети та виявляє найбільшу з них, порівнюючи їх радіуси, визначає її

як монету з найбільшим номіналом відповідного класу, задає їй вже відоме значення діаметру, що відповідає номіналу. Після цього всі інші монети (кола) отримують діаметр, пропорційний їй. При пошуку кіл потрібно відштовхуватися від того, що монети будь радіусом від 25 до 100 пікселів. Діаметр монет розраховується за такою формулою:

$$d = d_p \frac{d_{\max}}{d_{m \max}}$$

де d – діаметр монети,

d_p – діаметр монети у пікселях,

d_{\max} – найбільший діаметр монети з визначеного матеріалу,

$d_{m \max}$ – діаметр найбільшої монети з визначеного матеріалу.

Знаючи справжні діаметри монет, програма співвідносить їх радіус до номіналу згідно офіційних даних, наведених на сайті Національного Банку України на інформаційній сторінці щодо розмірних та обігових монет України. Реалізація методу пошуку кіл на зображенні:

- зображення стискається до потрібних розмірів;

- створюється копія зображення для відображення на ній результату роботи програми;

- виконується попередня обробка зображення, застосовується чорно-білий фільтр і розмиття по Гаусу.

Сніпет методу пошуку кіл на зображенні:

```
def main(image, material=''):
    d = 1024 / image.shape[1]
    dim = (1024, int(image.shape[0] * d))
    image = cv2.resize(image, dim, interpolation = cv2.INTER_AREA)
    output = image.copy()
    gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    gray = cv2.medianBlur(gray, 15)
    if material == '':
        clf, score = get_classifier()
        rows = gray.shape[0]
        circles = cv2.HoughCircles(
            gray, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1, rows / 10,
            param1=50, param2=23,
            minRadius=25, maxRadius=100)
```

Метод визначення діаметру кіл представлено на наступному сніпеті. Спочатку знаходиться найбільший радіус, який буде відповідати найбільшому номіналу (його істинний діаметр вже відомий), а потім інші.

Сніпет методу визначення діаметру кола:

```
def scale(coin_list : list):
    biggest_coin = max(coin_list,
        key = lambda item: item.d)
    scale_coef = 1
    scaled_to = «Unable to scale»
    if biggest_coin.material == «gold»:
        scale_coef = 26 / biggest_coin.d
    scaled_to = «Scaled to 1 UAH (old)»
    elif biggest_coin.material == «silver»:
        scale_coef = 20.2 / biggest_coin.d
    scaled_to = «Scaled to 2 UAH»
    for coin in coin_list:
        coin.d *= scale_coef
    return scaled_to
```

Метод обробки POST-запиту можна переглянути на наступному сніпеті. Метод дістає передане вхідне зображення зі змінної request. З зображення формується масив NumPy та передається далі для формування масиву зображення фреймворку OpenCV, не змінюючи вхідних параметрів зображення. Далі використовується метод отримання зображення-результату, яке кодується у base64 для динамічного відображення на головній сторінці додатку.

Сніпет обробки POST-запиту:

```
@app.route('/detect', methods=['GET', 'POST'])
def detect():
    if request.method == 'POST':
        f = request.files.get('coin')
        mode = request.form.get('mode')
        img_array = np.array(bytearray(f.read),
            Dtype = np.uint8)
        img = cv2.imdecode(img_array,
            cv2.IMREAD_UNCHANGED)
        detected_coins = dc.main(img, material = mode)
        cv2.imwrite('temp.jpg', detected_coins)
        with open('temp.jpg', «rb»)
        as img_file: image_data = base64.b64encode(img_file.read()).decode('utf-8')
        data_url = 'data: image/jpg; base64,' + image_data
        return data_url
    return 'not a post request'
```

Після аналізу буде відображена вся необхідна інформація: всі знайдені монети будуть підсвічені, в їх центрі буде надпис із номіналом, у лівому нижньому куті буде прописана загальна кількість монет і їх сума.

Результати застосування перетворення Хафа до зображення представлено на Рисунках 4 (монети жовтого кольору) та Рисунок 5 (монети різного кольору). Ідентифікацію можна проводити для кожного кольору монет як окремо, так і разом.

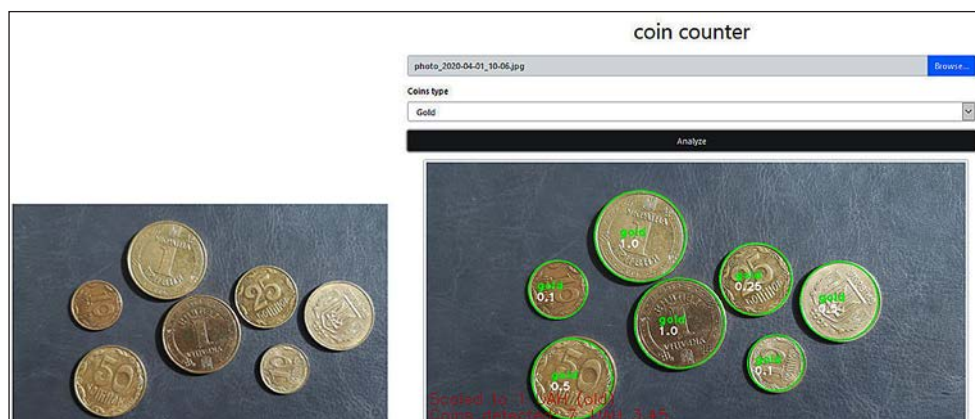


Рис. 4. Зображення монет жовтого кольору до і після ідентифікації

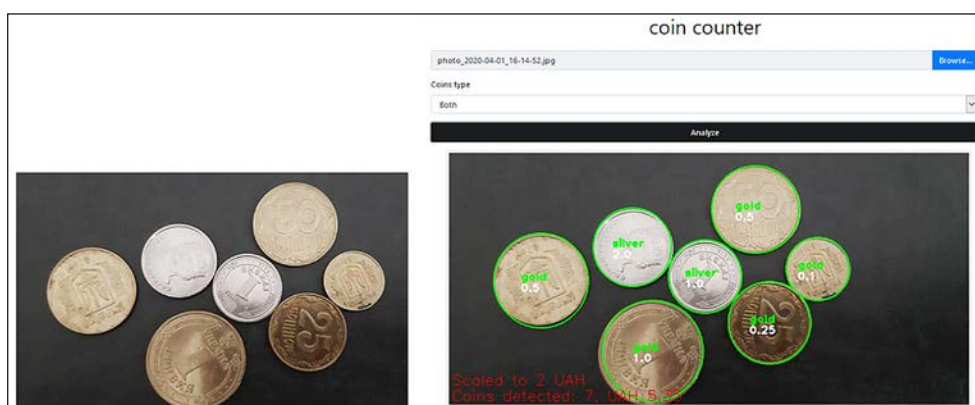


Рис. 5. Зображення монет різного кольору до і після ідентифікації

Висновки. Програмний додаток дозволяє порахувати суму змішаних між собою монет, використовуючи фотографію; розпізнає монети номіналом одна, дві, п'ять, десять, двадцять п'ять і п'ятдесят копійок, одна гривня старого зразка та одна і дві гривні нового зразка.

Отримані результати показують, що запропонований метод може бути використаний для того, щоб визначати кольори (золотий, срібний), номінал монет (одна, дві, п'ять, десять, двадцять п'ять копійок, одна і дві гривні) та проводити розрахунок суми всіх представлених монет. Правильна ідентифікація монет досягнута у 82,21% випадків.

Список літератури:

1. Yip R. Modification of hough transform for circles and ellipses detection using a 2-dimensional array / R. Yip, P. Tam, D. Leung. // Pattern Recognition. 1992. № 9. С. 1007–1022.
2. Huber-Mörk R. Automatic Coin Classification and Identification [Електронний ресурс] / R. Huber-Mörk, M. Rubik, M. Nölle. 2012. Режим доступу до ресурсу: https://cdn.intechopen.com/pdfs/36682/InTech-Automatic_coin_classification_and_identification.pdf. DOI: 10.5772/35795.
3. Jain N. Coin Recognition Using Circular Hough Transform / N. Jain, N. Jain. // International Journal of Electronics Communication and Computer Technology. 2012. С. 101–104.
4. Преобразование Хафа, его обобщения и модификации. [Електронний ресурс]. 2008. Режим доступу до ресурсу: http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Преобразование_Хафа_для_поиска_окружностей.
5. Bradski G. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library / G. Bradski, A. Kaehler. Sebastopol, California, USA : O'Reilly Media, Inc., 2008. 571 с.

Marchuk G.V., Lysogor Iu.I., Myslyvyi M.V. COMPUTER VISION IN RECOGNITION OF UKRAINIAN COINS OF DIFFERENT DENOMINATION

The article deals with the recognition method of small coins of different size, color and denomination that have been removed from cash circulation of Ukraine. The aim of the research is to create a software application to determine coins denomination, number and total sum using computer vision. It requires object

detection technologies using OpenCV library. One of the most effective methods of finding analytically given primitives is Hough transform based methods. Huff transformation is a method of straight and curved lines detection in halftone or color images.

The method enables a curves family parameters specification and provides a search on the image of the set of curves of a given family. The paper considers the algorithm of finding circles in the image. The general algorithm of the software application is to determine the type of coins in the image. All Ukrainian coins are available in silver and gold. Silver coins include one, two, five denomination coins made of stainless steel or aluminum alloy. Gold coins are ten, twenty-five, fifty, one hryvnia denomination coins made of brass. Coins radius is determined by the algorithm with respect to raw material.

Information on circulation coins diameter is taken from the website of the National Bank of Ukraine. Correct coins identification is 82,21%. The coin recognition and counting mechanisms proposed could be used in various financial institutions. The software application allows you to estimate the amount of coins of small denominations using a photo. It can also recognize coins of different denominations and colors of old and new designs.

Key words: coin, computer vision, algorithm, circle, analysis.

Нікулін Д.С.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ЖИВЛЕННЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000

Електроенергія – невід’ємна частина сучасності. Використання електроенергії з часом неухильно зростає як у промисловості, так і в побуті громадян. Нині в Україні споживається більш як 150 мільярдів кіловатт-годин електроенергії на рік. Електроенергія повинна потрапляти до споживачів безперервно, незалежно від погодних умов та інших обставин. Незважаючи на активний пошук альтернативних джерел енергії, основна частина електроенергії в Україні та світі виробляється електростанціями на органічному паливі, серед яких вигідно виділяються атомні електростанції, які мають високу потужність і не забруднюють навколишнє середовище [1, с. 99–102].

В Україні на тепер функціонує чотири атомні електростанції. Електроенергія, яку вони виробляють, використовується споживачами по всій країні та навіть експортується за кордон. Принцип роботи атомних електростанцій полягає в перетворенні енергії ділення атомних ядер в електричну енергію шляхом підігрівання живильної води, яка, випаровуючись, передає свою енергію, задаючи оберти генератору електроенергії.

Ділянка живлення парогенератора, який є об’єктом розгляду цієї статті, має важливе значення для АЕС, оскільки вона впливає на витрату пари головного циркуляційного насоса (далі – ГЦН) і на потужність енергоблоку. Ділянка живлення парогенератора поділяється на дві частини: автоматичну систему регулювання живлення парогенератора, завданням якої є підтримка матеріального балансу між відводом пари, продувкою і подачею живильної води, і автоматичну систему регулювання продуктивності турбоживильних насосів (далі – ТЖН), які змінюють витрату живильної води шляхом зміни його оборотів. Управління цими системами здійснюється за допомогою цифрових ПП-регуляторів, які є невід’ємною частиною програмно-технічного комплексу турбінного відділення.

Ключові слова: АЕС, АСР, турбоживильний насос, парогенератор, вода, тиск.

Постановка проблеми. Ділянки живлення енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 є найрозповсюдженішими в Україні, впливають на витрату пари на вході до головного циркуляційного насоса. Дослідження роботи цієї ділянки дозволить створити її математичну модель, на основі якої може бути створена сучасна автоматизована система регулювання подачі живильної води, що позитивно відобразиться на ефективності роботи цієї системи і на ККД всього енергоблоку.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження ділянки живлення енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 і розробка її математичної моделі, яку можна використовувати для реалізації автоматизованої системи регулювання турбоживильних насосів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. ОПИС ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ. Реактори типу ВВЕР використовують для будівництва двоконтурних АЕС. Як випливає з назви, така АЕС (Рисунок 1) складається з двох контурів. Перший контур розташований у реакторному

відділенні. Він включає реактор типу ВВЕР, через який за допомогою ГЦН прокачується вода під тиском 15,7 МПа (160 ат). На вході в реактор вода має температуру 289°C, на виході – 322°C. При тиску в 160 ат вода може закипіти тільки за температури 346°C. Тому в першому контурі двоконтурної АЕС завжди циркулює тільки вода без появи пари.

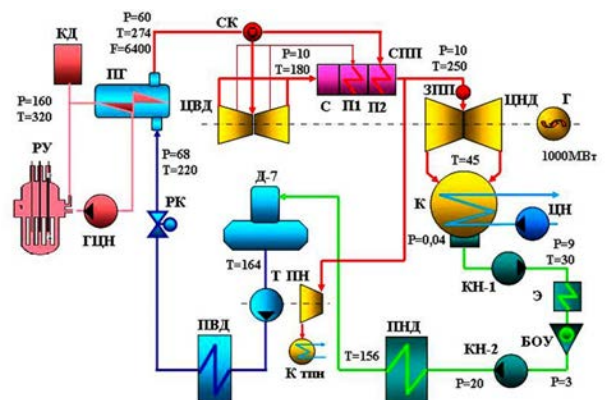


Рис. 1. Схема двоконтурної АЕС з реактором типу ВВЕР-1000

З ядерного реактора вода з температурою 322°C надходить у парогенератор. Парогенератор – це горизонтальна циліндрична посудина (барaban), частково заповнена живильною водою другого контуру; над водою є паровий простір. У воду занурені численні труби парогенератора (далі – ПГ), в які надходить вода з ядерного реактора. За допомогою живильного насоса (далі – ЖН) і відповідного вибору турбіни в парогенераторі створюється тиск істотно менше, ніж у першому контурі (для реактора ВВЕР-1000 і турбіни потужністю 1000 МВт це тиск свіжої пари $p_0 = 60$ ат).

Тому вже при нагріванні до 275°C вода в парогенераторі закипає внаслідок нагрівання її теплоносієм, який має температуру 322°C. Таким чином у парогенераторі, який є сполучною ланкою першого і другого контурів (але розташованим у реакторному відділенні), генерується сухий насичений пар із тиском $p_0 = 60$ ат і температурою $t_0 = 275^\circ\text{C}$ (свіжий пар). Цей пар – волога, проте його вологість мала (0,5%). Перша особливість АЕС – низькі початкові параметри і вологий пар на вході в турбіну. Цей пар спрямовується в ЦВТ парової турбіни. Тут він розширюється до тиску приблизно 1 МПа (10 ат). Вибір цього тиску зумовлений тим, що вже при такому тиску вологість пари досягає 10-12%, а краплі вологи, які рухаються з великою швидкістю, призводять до інтенсивної ерозії і розмивів деталей проточної частини парової турбіни.

З ЦВТ пар спрямовується в сепаратор-пароперегрівач (далі – СПП). У сепараторі від пару відділяється волога, і він надходить у пароперегрівач, де його параметри доводяться до значень 10 ат (250°C). Таким чином пар на виході з СПП є перегрітим, а ці параметри обрані такими, щоб отримати допустиму вологість в кінці турбіни, де загроза ерозії ще більша, ніж за ЦВТ. Пар із зазначеними параметрами надходить у ЦНТ (в енергоблоці 1000 МВт три однакових ЦНТ. На Рисунку 1 показаний тільки один). Розширившись у ЦНТ, пар надходить у конденсатор, а з нього – в конденсатно-живильний тракт звичайної ТЕС.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ. Принципова схема АСР живлення ПГ і продуктивності ТЖН зображена на Рисунку 2.

Регулятор продуктивності $\Delta P_{пр}$ пропорційно-інтегральної дії одержує сигнал, пропорційний кореневі квадратному з ΔP . В якості задаючого сигналу на його вхід передається сигнал Q теплової потужності петлі. Регулятор впливає на меха-

нізм керування турбіною (далі – МКТ) регулятора швидкості обертання P_n кожного з ТЖН, що приводить до зміни витрати пари на приводну турбіну, швидкості її обертання та продуктивності насоса.

Як сигнал завдання Q використовується максимальний сигнал із сигналів чотирьох циркуляційних петель першого контуру енергоблоку. В АСР живлення ПГ сигнали за витратою пари та живильної води вводяться в регулятор із протилежними знаками й компенсують один одного. Сигнал за рівнем води в ПГ компенсується сигналом завдання. В цій схемі реалізується пропорційний (П) закон регулювання з інваріантністю по збурюванню витратою пари. Для розглянутих АСР відповідно до принципової схеми автоматичного регулювання (Рисунок 2) розроблена структурна схема ділянки живлення барабанних парогенераторів, зображена на Рисунку 3.

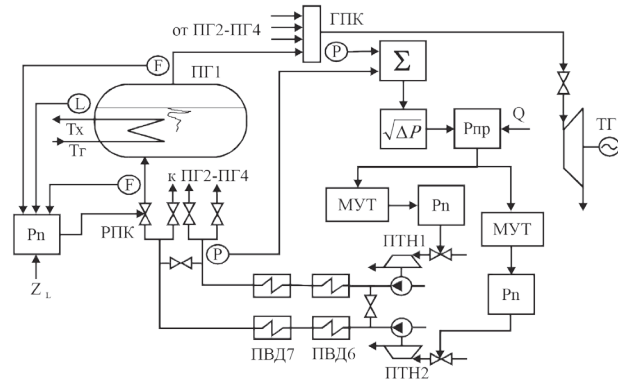


Рис. 2. Принципова схема автоматичного регулювання продуктивності ТЖН і живлення ПГ

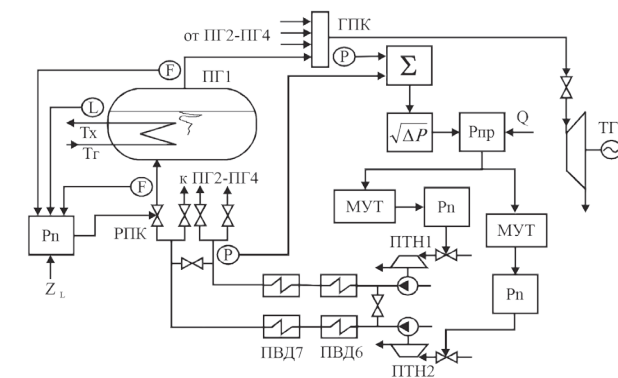


Рис. 3. Структурна схема ділянки живлення парогенераторів АЕС із реактором ВВЕР

В ній виділені такі структурні елементи, які відображають властивості реальних конструктивних елементів схеми ділянки живлення барабанних парогенераторів: парогенератори ПГ 1, 2, 3, 4, що враховують динаміку зміни рівня

пароводяної суміші в парогенераторі ДН при зміні витрати живильної води $\Delta W_{пг}$ та пари ΔD , живильний трубопровід, який є сполучним елементом ділянки живлення та враховує динаміку зміни витрати живильної води в результаті зміни положення РЖК ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) та динаміку зміни тиску живильної води перед регулюючими живильними клапанами в результаті зміни продуктивності ТЖН, живильний турбонасос, який визначає динаміку зміни подачі живильної води $\mathcal{O}W_{ПНН}$ в парогенератори через живильний трубопровід і зміну тиску живильної води $\mathcal{O}P_{ПНН}$ на виході ТЖН, в результаті зміни положення регулювальних клапанів α_3 , приводної турбіни ТЖН, головний паропровід від парогенераторів до головного парового колектора та трубопровід першого контуру.

Внутрішнім збурюванням для ділянки живлення є зміна теплової потужності енергоблоку $\mathcal{O}N$, що приводить до зміни кількості пари, яка генерується в парогенераторах, і зміни витрати тиску $\mathcal{O}P$ пари в головному паропроводі. Зміна теплової потужності характеризується зміною різниці температур $\mathcal{O}T$ гарячої й холодної петель першого контуру.

Як зовнішнє збурювання прийнята зміна положення регулювальних клапанів турбіни $\mathcal{O}S_{РКТ}$, що супроводжується різкою зміною витрати пари через паропровід і зміною тиску пари в ГПК. Зміна витрати пари через паропровід призводить до порушення матеріального балансу між живильною водою, яка надходить у ПГ, і паром, що відбирається з нього. Регулятор рівня, прагнучи відновити матеріальний баланс, змінює витрату живильної води, що приводить до зміни умов теплообміну між пароводяною сумішшю в парогенераторі і теплообмінним пучком першого контуру. В результаті цього відбувається зміна різниці температур теплоносія першого контуру. Оскільки процес зміни різниці температур має більшу інерційність, ніж швидкість зміни живильної води, то при розробці математичної моделі ділянки живлення для спрощення розрахунку і зменшення розмірності математичної моделі вплив витрати живильної води на різницю температур теплоносія першого контуру і процес генерації пари буде враховуватися побічно через канали внутрішнього і зовнішнього збурювання.

В розробленій моделі враховується тільки один ТЖН, оскільки їхня робота в автоматичному режимі синхронізована МКТ. Також передбачається, що динамічні властивості трубопроводів від РЖК до ПГ однакові для всіх чотирьох парогенераторів.

Структурна схема математичної моделі матиме такий вигляд:

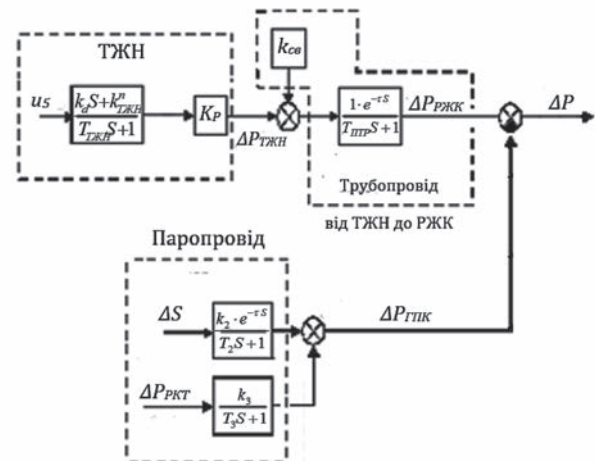


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі ділянки живлення

Більш детально передатні функції, які лежать в основі цієї математичної моделі, виглядають так:

– по каналу «електрична потужність – тиск пари»

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_2 \cdot e^{-\tau \cdot S}}{T_2 S + 1}, \text{ де } k_2 = 0.00633 \frac{\text{МПа}}{\text{МВт}}, T_2 = 9 \text{ с}, \tau = 4 \text{ с};$$

– по каналу «положення РЖК – тиск пари»

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_3}{T_3 S + 1}, \text{ де } k_3 = -0.025 \frac{\text{МПа}}{\%}, T_3 = 19 \text{ с};$$

– по каналу «тиск живильної води – тиск перед РЖК»: $W_{ПТР}(S) = \frac{1 \cdot e^{-\tau \cdot S}}{T_{ПТР} S + 1}$, де $T_{ПТР} = 2 \text{ с}$, $\tau = 2 \text{ с}$;

– по каналу «зміна положення регулюючого клапана приводної турбіни – частота обертання ТЖН»:

$$W_{ПНН}(S) = \frac{k_d S + k_{ПНН}^n}{T_{ПНН} S + 1}$$

$$k_d = 13.6 \frac{\text{об/хв}}{\text{с} \cdot \%}, k_{ПНН} = 13.3 \frac{\text{об/хв}}{\%}, T = 10 \text{ с}.$$

Численні значення коефіцієнтів передатних функцій засновуються на технічних специфікаціях енергоблоку та експериментальних даних.

Висновки. В роботі було розглянуто систему живлення парогенератора енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000. Була розроблена математична модель цієї ділянки, а також спроектована структурна схема математичної моделі. На основі отриманих даних може бути розроблена автоматизована система регулювання на основі ПІ-регулятора.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control / Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. 2012. № 1(38). P. 99–106.
2. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit / Nuclear Engineering and Design. 2011. № 241(8). P. 2956–2963.
3. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimization / Праці Одеського політехнічного університету. 2015. № 1(45). P. 134–140.
4. Давидов В.О., Крилов В.Н., Максимов М.В. Автоматизированная система распознавания / Искусств. интеллект. 2002. № 4. С. 462–469.
5. Ларіонова О.С., Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи. 2009. № 2. С. 8–11.
6. Брунеткін О.І., Максимов М.В., Бондаренко А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива / Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія : «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2014. № 12. С. 131–141.
7. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС / Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. № 4. С. 18–24.
8. Уліцька О.О., Бундюк А.Н. Разработка алгоритма для расчёта статистики когенерационной энергетической установки / Холодильная техника и технология. 2013. № 3. С. 34–40.

Nikulin D.S. STUDY OF THE POWER SUPPLY SECTION OF THE STEAM GENERATOR OF A NUCLEAR POWER UNIT WITH A VVER-1000 REACTOR

Electricity is an integral part of our time. Electricity use has steadily increased over time, both in industry and in everyday life. Today, Ukraine consumes more than 150 billion kilowatt-hours of electricity a year. Electricity must be supplied to consumers continuously, regardless of weather and other circumstances. Despite the active search for alternative energy sources, the bulk of electricity in Ukraine and the world is produced by organic fuel power plants, among which nuclear power plants that have high power and do not pollute the environment are favorably allocated [1, p. 99–102].

There are four nuclear power plants operating in Ukraine today: Zaporizhzhia, Khmelnytsky, Rivne and South Ukrainian. Their total capacity is about 14,000 MW. The electricity they produce is used by consumers across the country and even exported abroad. VVER-1000 and VVER-440 reactors are installed in power units of Ukraine. The principle of operation of nuclear power plants is to convert the energy of fission of atomic nuclei into electrical energy by heating the feedwater, which, when evaporated, transmits its energy, by rotating the generator of electricity.

The power supply of the steam generator that is the subject of this article is important for the NPP because it affects the steam flow of the main circulation pump and, as a consequence, the power of the unit. It is divided into two parts: an automatic steam generator power control system whose task is to maintain a material balance between steam withdrawal, purge and feed water supply, and an automatic turbocharger pump performance system that will change the feed water flow by changing its speed. These systems are managed using digital PI regulators, which are an integral part of the turbine engine software.

Key words: NPP, automatic regulating system, turbine feed pump, steam generator, water, pressure.

Новіков П.В.

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

Бунке О.С.

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

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ НА БАЗІ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА

У статті розглянуто синтез адаптивної системи автоматичного керування контуром температурного режиму прямооточного котлоагрегату. Мета статті полягає в аналізі динамічних властивостей пилувугільного прямооточного котлоагрегату при різних значеннях навантаження, розробці моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу, а також синтезі адаптивної системи автоматичного керування.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму водо-парового тракту Трипільської ТЕС у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку. Проведено аналіз динамічних характеристик пилувугільного прямооточного котлоагрегату при різних значеннях навантаження. Спостерігається суттєва відмінність моделей для різних режимів роботи, що не дозволяє використовувати єдині налаштування системи керування для всього діапазону режимів роботи енергоблоку. Описано статичні характеристики блоків нечіткої логіки двоканального нечіткого контролера. Визначені аналітичні залежності параметрів моделі від поточного навантаження котлоагрегату. Розроблена модель об'єкту керування, яка враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу.

Для моделювання роботи систем зі змінними параметрами моделі об'єкту керування запропоновано замінити програмні блоки з фіксованими коефіцієнтами послідовністю ввімкнень елементарних ланок з можливістю зміни параметрів моделі безпосередньо під час моделювання. Наведені моделі розроблених функціональних блоків. Проведено імітаційне моделювання САР температурного режиму в усьому діапазоні зміни режимів роботи об'єкта керування з урахуванням залежності параметрів моделі від навантаження. Отримані результати свідчать про ефективність використання сигналу за навантаженням енергоблоку в нечіткому регуляторі, що дало змогу реалізувати систему керування, яка охоплює всі режими роботи котлоагрегату без додаткового ускладнення структури системи керування. Розроблений двоканальний нечіткий контролер демонструє необхідну якість роботи і стійкість системи автоматичного регулювання в усьому робочому діапазоні навантажень котлоагрегату.

Ключові слова: динамічні характеристики, температурний режим, нечітка логіка, simulink, моделювання, система керування.

Постановка проблеми. За даними Міністерства енергетики та захисту довкілля України доля вироблення електроенергії на ТЕС за останні 5 років впала на 10% (з 40% до 30%). Незважаючи на це, їх роль у відпрацюванні графіків електричних навантажень залишається провідною. Доля альтернативних джерел енергії при зростанні на 110% за 2019 рік складає лише 3,6%. Енергоблоки ТЕС потужністю 100-150 МВт, які можуть ефективно використовуватися як маневрові напівпікові потужності, становлять лише 18% проти необхідних 30-35%.

Найбільшу кількість (81%) складають енергоблоки потужністю 200-300 МВт. Поширеною практикою є використання в маневрових напівпікових режимах саме цих блоків, які для цього не пристосовані і проектувалися для роботи в базових режимах [1].

Енергетичний блок теплової електростанції є дуже складним комплексом агрегатів і механізмів, які мають працювати узгоджено між собою. До проблем автоматизації пилувугільних блоків середньої потужності, які вимушені працювати в маневрових режимах, додається ще одна важлива

проблема – невизначеність складу і якості палива. Котлоагрегатам ТЕС притаманні зміни динамічних характеристик як в межах доби (маневрові режими), так і під час тривалої експлуатації (перевоснащення основного обладнання, утворення накипу). Наслідком незадовільної роботи встановлених регуляторів є випадки перегріву пари, перевитрати пального, зменшення ресурсу котлоагрегатів за рахунок термоциклічних напруг і зношування виконавчих пристроїв, що збільшує експлуатаційні витрати, а також підвищує технологічну небезпеку ТЕС. Тому актуальною є модернізація пилувугільних енергоблоків діючих ТЕС із метою підвищення їх ефективності, введення більш точного регулювання навантаження енергоблоків, зниження витрат на обслуговування обладнання і зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вдосконалення і модернізації систем керування складними теплоенергетичними об'єктами вирішувалися в роботах М.А. Коновалова [2, 3, 4], Г.Т. Кулакова [5], Ю.М. Ковриго [4, 6, 7], Т.Г. Багана [6], О.С. Бунке [7, 14], В.П. Свириденко [8], В.А. Біленко [9, 10]. Досвід налагоджувальних і експериментальних робіт, проведених низкою організацій як в нашій країні, так і за кордоном, виявив принципові проблеми, які знижують ефективність використання найбільш розповсюджених промислових регуляторів, зокрема ПП- та ППД-регуляторів [2].

Як показують дослідження фірми Honeywell, всережимні налаштування стандартних регуляторів шляхом «загрублення» коефіцієнтів забезпечують робастність системи регулювання [11]. Такий підхід забезпечує стійкість і всережимність систем регулювання, але його недоліком є значне зниження ефективності функціонування систем автоматичного регулювання в неномінальних режимах, що виражається в економічних втратах [12, 13, 14].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз динамічних характеристик пилувугільного прямо-

точного котлоагрегату Трипільської ТЕС при різних значеннях навантаження; розробка моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу; синтез адаптивної системи автоматичного керування контуром температурного режиму котлоагрегату.

Виклад основного матеріалу дослідження. Експериментальні дані для ідентифікації були отримані в результаті проведення активного експерименту на котлоагрегаті ТПП-210А Трипільської ТЕС при навантаженнях 300 МВт і 225 МВт для температур за нижньою радіаційною частиною (НРЧ), верхньою радіаційною частиною (ВРЧ) і поточним пароперегрівачем (ППП). Використовуючи метод додаткових членів [15], були отримані параметри функцій передачі.

В загальному випадку модель температурного об'єкта описується багатоємнісною ланкою самовирівнювання:

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}e^{-\tau_{об}s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)...(T_ns + 1)}, \quad (1)$$

Спостерігається суттєва відмінність моделей для різних режимів роботи. При зменшенні навантаження коефіцієнти підсилення моделей збільшуються, а інерційність контурів – зменшується. По каналу НРЧ основна стала часу змінюється приблизно в 3,5 рази, а по каналу ВРЧ – в 2,2 рази. Для контуру НРЧ така велика розбіжність у динаміці пояснюється зміщенням зони максимальної теплоємності по водопаровому тракту при зміні навантаження. Фактично температура за НРЧ перестає реагувати на зміну витрати палива і випадає із схеми керування як випереджальний сигнал при максимальному навантаженні енергоблоку.

Система автоматичного регулювання (САР) температурного режиму пароводяного тракту є системою із введенням похідних від випереджаючих сигналів, тому для налаштування регулятора спочатку потрібно отримати налаштування диференціаторів [8].

Таблиця 1

Параметри ідентифікованих моделей

N, МВт	Зона топки	$K_{об}$, °C/%	T_1 , с	T_2 , с	T_3 , с	T_4 , с	$\tau_{об}$, с
225	НРЧ	0,55	55	28	-	-	10
	ВРЧ	3,14	79	39	26	-	20
	ППП	4,54	74	37	25	18	94
300	НРЧ	0,46	193	96	-	-	20
	ВРЧ	1,56	173	86	58	-	15
	ППП	2,67	146	77	49	37	85

Грунтуючись на параметрах моделі, були розраховані диференціатори температур НРЧ і ВРЧ. Параметри диференціаторів розраховані за методом РАФХ на квадратичний критерій якості $m = 0.485$, що приблизно відповідає коефіцієнту затухання перехідного процесу ($\psi = 0.95$).

Функція передачі диференціатора для ділянки НРЧ має такий вигляд:

$$W_D^{НРЧ} = \frac{64.5s}{25.2s + 1} \quad (2)$$

Функція передачі диференціатора для ділянки ВРЧ має такий вигляд:

$$W_D^{ВРЧ} = \frac{145.6s}{70s + 1}, \quad (3)$$

На Рис. 2 наведено порівняння реакції об'єкта керування на одиничне ступінчате збурення з урахуванням сигналів від диференціаторів при різних значеннях навантаження.

Для охоплення всього діапазону робочого навантаження енергоблоку запропоновано використовувати як регулятор у системі керування температурним режимом двоканальний нечіткий контролер [16]. Синтез системи керування, лінг-

вістичні змінні та функції належності наведені в роботах [16, 17].

Для вхідного параметру сигналу неузгодженості заданий діапазон від -20°C до $+20^\circ\text{C}$. Такі межі зумовлені вимогами до точності підтримання температури перегрітої пари з урахуванням можливих технологічних відхилень. Для вхідного параметру de/dt заданий діапазон від $-0,3^\circ\text{C}/\text{c}$ до $+0,3^\circ\text{C}/\text{c}$. Межі швидкості зміни сигналу помилки визначаються динамічними властивостями об'єкту керування та величиною збурень. Третьою вхідною змінною є поточне навантаження енергоблоку. Межі роботи пилувугільного котлоагрегату становлять від 75% до 100%.

Вихідним параметром блоку формування імпульсів є тривалість імпульсів. Діапазон зміни вихідного параметра визначений від $-4,2$ секунд до $+4,2$ секунд. Вихідним параметром блоку формування пауз є тривалість пауз. Діапазон зміни цього параметру задається на основі експертних знань, досвіду експлуатації конкретного об'єкта керування, а також його динамічних характеристик. Для досліджуваного об'єкта мінімальна пауза складає 10 секунд, що визначається мінімальним часом запізнення об'єкта керування при мінімальному навантаженні. При максимальному навантаженні ця тривалість складає 210 с.

На Рис. 3 і Рис. 4 наведені поверхні «вхід-вихід» нечітких блоків при різних значеннях навантаження. Фактично ці поверхні є статичними характеристиками нечіткого контролера. За допомогою поверхні в тривимірному просторі яскраво виражено характер роботи такого нелінійного елемента як блок із нечітким логічним виводом. Наглядно видно зміну статичної характеристики залежно від поточного навантаження. Таким чином відбувається адаптація налаштувань двоканального нечіткого контролера до зміни динаміки об'єкта керування.

Імітаційне моделювання САР. Особливістю дослідження розробленої системи керування на базі двоканального нечіткого контролера є те, що керуючий блок є нелінійним елементом. Це робить всю систему керування нелінійною. В цьому випадку для дослідження, наприклад робастності системи, недосить проварювати параметри моделі в діапазоні $\pm 20-30\%$, оскільки в нелінійних системах

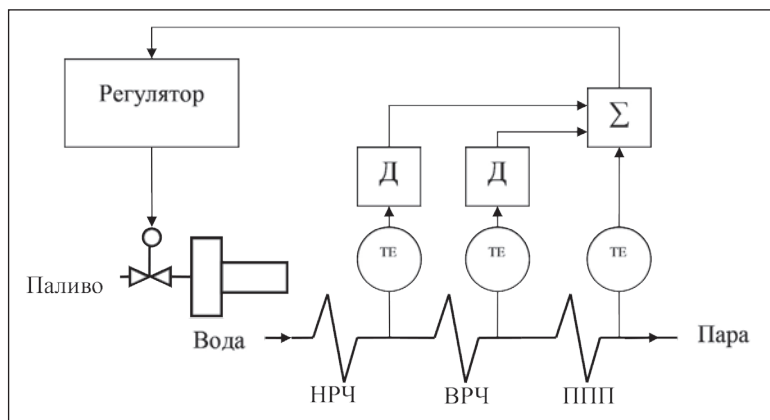


Рис. 1. Структурна схема САР температурного режиму

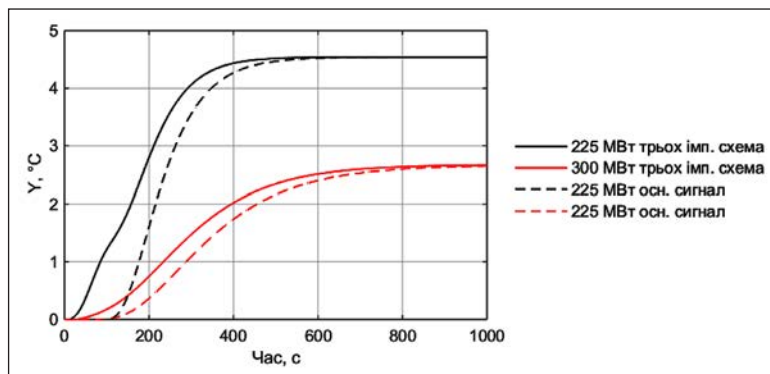


Рис. 2. Порівняння перехідних характеристик об'єкта

не виконується принцип суперпозиції і не можна гарантувати, що в проміжному положенні нелінійна система буде забезпечувати задану якість керування. Вирішенням цієї задачі може бути використання моделі об'єкта керування, яка враховує зміну параметрів залежно від зовнішніх факторів, наприклад навантаження енергоблоку. В Matlab / Simulink побудована модель парового тракту до проміжної точки (Рис. 7). Ця модель враховує зміни динамічних характеристик ділянок водопарового тракту котла (НРЧ, ВРЧ, ППП) залежно від навантаження енергоблоку. Зміна навантаження є зовнішнім збуренням для САР температурного режиму.

Зміна в реальному часі параметрів моделі, що в загальному випадку описується функцією передачі (1), досягається таким чином. Коефіцієнт передачі $K_{об}$ залежить від навантаження і змінюється від 2,67 до 4,54 при максимальному і мінімальному навантаженні. В найпростішому випадку цей зв'язок можна представити у вигляді формули:

$$K_{об} = K_{об}^{MIN} + \frac{N - 75}{100 - 75} (K_{об}^{MAX} - K_{об}^{MIN}), \quad (4)$$

де $K_{об}$ – коефіцієнт передачі об'єкту, $K_{об}^{MIN}$, $K_{об}^{MAX}$ – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту передачі об'єкту, N – поточне значення навантаження енергоблоку.

Модель підмаски змінного коефіцієнту підсилення $K_{об}$ в Simulink матиме такий вигляд:

Сталі моделі об'єкту також залежать від навантаження, але в блоці Transfer function пакету Simulink напряму параметри змінювати не можна. Запропоновано аперіодичну ланку представити у вигляді інтегрувальної ланки, охопленої зворотним зв'язком:

$$\frac{1}{T_i s + 1} = \frac{\frac{K_i}{s}}{1 + \frac{K_i}{s}} = \frac{K_i}{s + K_i} = \frac{1}{\frac{1}{K_i} s + 1}, \quad (5)$$

$$T_i = T_i^{MIN} + \frac{N - 75}{100 - 75} (T_i^{MAX} - T_i^{MIN}), \quad (6)$$

де T_i – i -та стала часу аперіодичної ланки, T_i^{MIN} , T_i^{MAX} – значення i -ї сталої часу аперіодичної ланки при мінімальному і максимальному значеннях навантаження, N – поточне значення навантаження енергоблоку

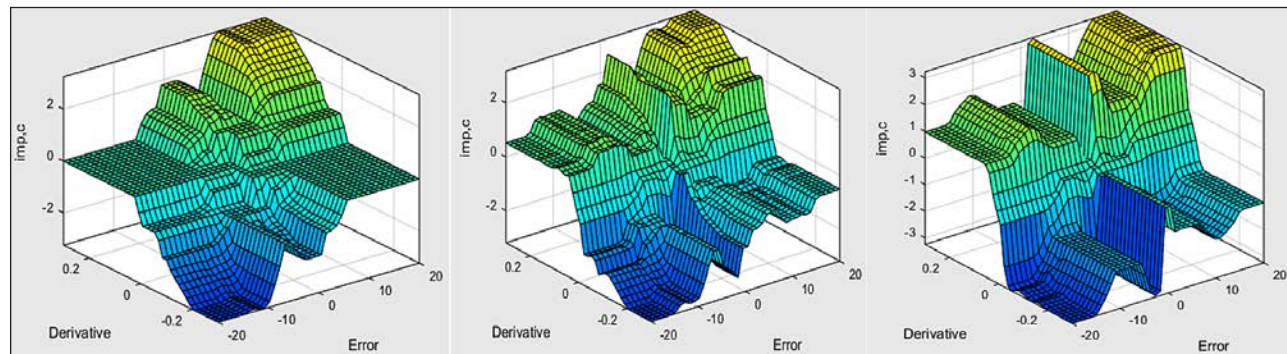


Рис. 3. Поверхня «вхід-вихід» FIS-блоку імпульсів: а – $N = 225\text{MWt}$, б – $N = 265\text{MWt}$, в – $N = 300\text{MWt}$

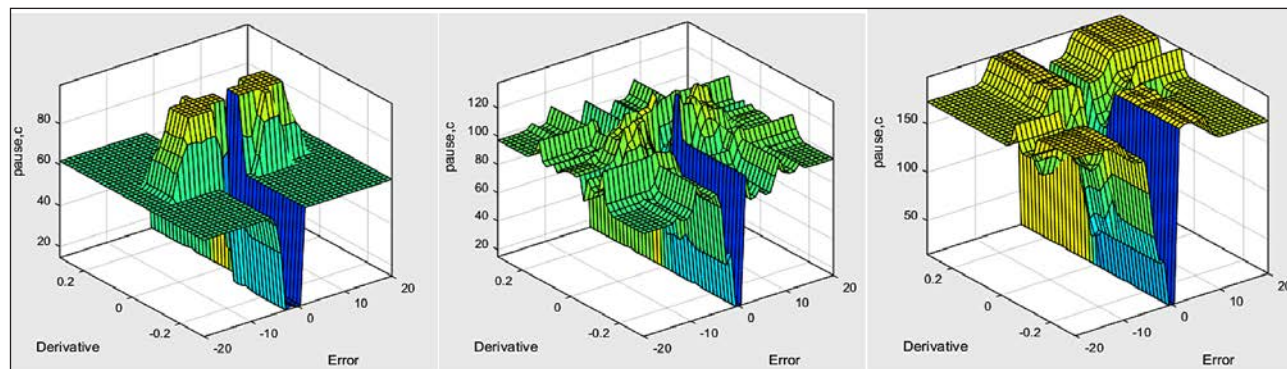


Рис. 4. Поверхня «вхід-вихід» FIS-блоку пауз: а – $N = 225\text{MWt}$, б – $N = 265\text{MWt}$, в – $N = 300\text{MWt}$

Модель підмаски змінної сталої часу T_i в Simulink матиме такий вигляд:

Часову затримку моделі об'єкту, яка реалізується блоком Transport delay пакету Simulink, також напряму змінювати не можна. Запропоновано транспортну затримку апроксимувати послідовним включенням аперіодичних ланок в кількості від 2 до 5 залежно від величини транспортної затримки. Для транспортної затримки τ_{ob} до 20 с використовується дві аперіодичні ланки, а для $\tau_{ob} = 80 \div 95$ – шість аперіодичних ланок.

На Рис. 8 наведені перехідні процеси, отримані в результаті імітаційного моделювання. На систему регулювання здійснювалися різного роду зовнішні збурення: по завданню, зі сторони регульовального органа (відповідає збуренню за паливом), а також по зміні навантаження. Навантаження змінювалося 5 разів в усьому робочому діапазоні від 225 МВт (75% від номінального) до 300 МВт.

Система регулювання з двоканальним нечітким контролером забезпечує задану якість керування в усьому діапазоні навантажень енерго-

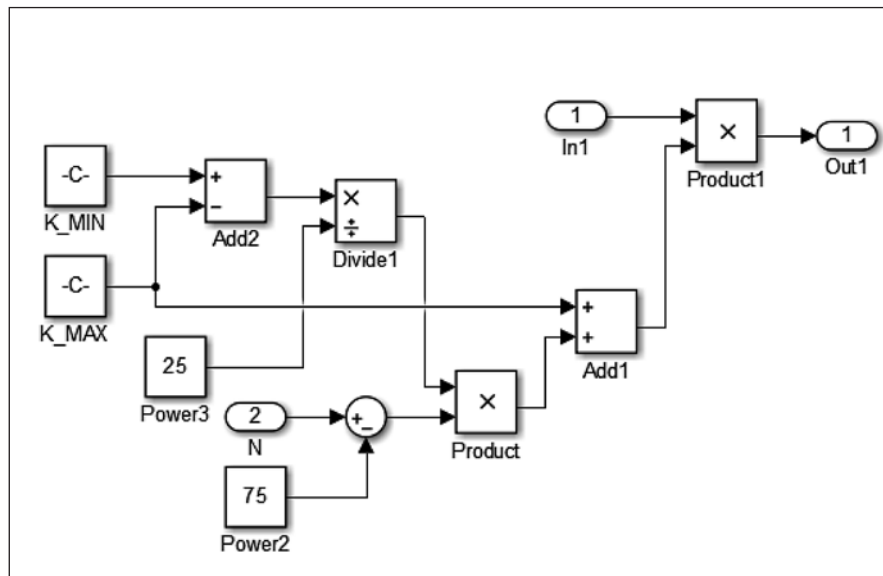


Рис. 5. Модель змінного коефіцієнта підсилення

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, K_{MIN} , K_{MAX} – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту підсилення, $In1$, $Out1$ – вхідний і вихідний сигнали ланки

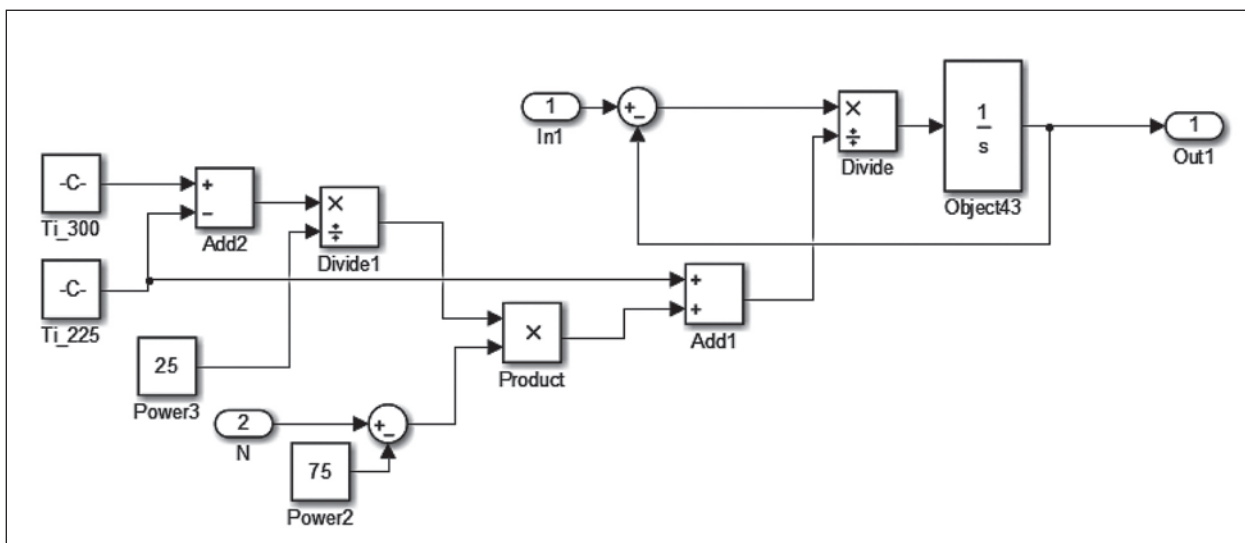


Рис. 6. Модель аперіодичної ланки зі змінною сталою часу

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, Ti_{225} , Ti_{300} – значення сталої часу аперіодичної ланки при мінімальному і максимальному значеннях навантаження, $In1$, $Out1$ – вхідний і вихідний сигнали ланки

блоку, максимальне динамічне відхилення менше 13°C при мінімальному навантаженні, при максимальному навантаженні динамічне відхилення не перевищує 6°C. В перехідних режимах кількість включень ВМ не перевищувала 5 разів. Отримані результати свідчать про ефективність використання сигналу за навантаженням енергоблоку в нечіткому регуляторі, що дало змогу реалізувати систему керування, яка охоплює всі режими роботи котлоагрегату без додаткового ускладнення структури системи керування.

Висновки. Проведено синтез двоканального нечіткого контролера для керування температурою в проміжній точці прямооточного котлоагрегату на основі отриманих математичних моделей. Визначені необхідні вхідні змінні, їх діапазони. Розроблено базу правил для обох блоків нечіткої логіки двоканального fuzzy-контролера.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму

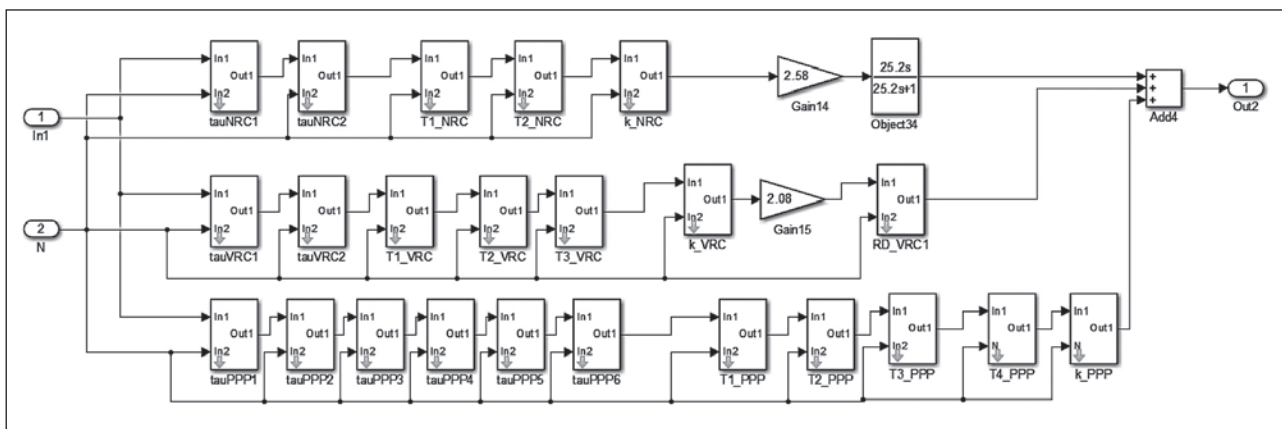


Рис. 7. Модель парового тракту до проміжної точки

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, τ_{NRC1} , τ_{NRC2} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після НРЧ, $T1_NRC$, $T2_NRC$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після НРЧ, k_NRC – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після НРЧ, τ_{VRC1} , τ_{VRC2} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після ВРЧ, $T1_VRC$, $T2_VRC$, $T3_VRC$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після ВРЧ, k_VRC – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після ВРЧ, τ_{PPP1} - τ_{PPP6} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після ППП, $T1_PPP$ - $T4_PPP$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після ППП, k_PPP – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після ППП, $Gain14$ і $Object34$ – диференціатор сигналу по температурі НРЧ, $Gain15$ і RD_VRC1 – диференціатор сигналу по температурі ВРЧ, $In1$, $Out1$ – вхідний і вихідний сигнали об'єкту керування з урахування сигналів від диференціаторів

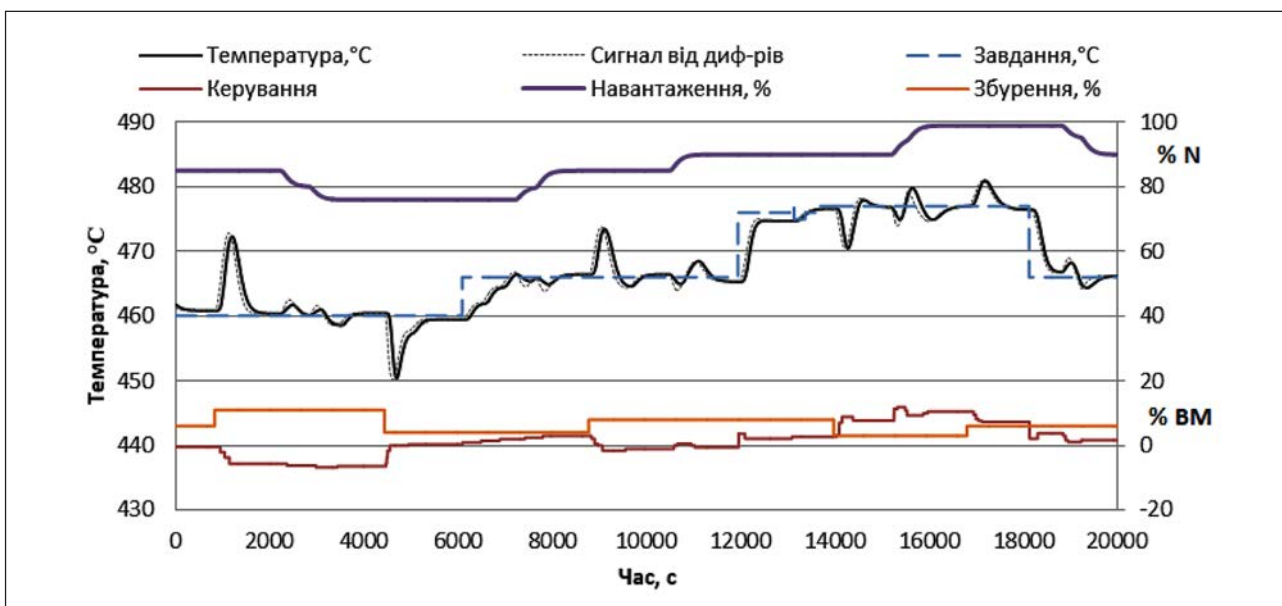


Рис. 8. Результати моделювання роботи АСР температурного режиму

водопарового тракту у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку – 225МВт і 300 МВт.

Для моделювання роботи нелінійної системи керування розроблена комп'ютерна модель, яка враховує зміни параметрів об'єкту керування

залежно від навантаження енергоблоку. На основі імітаційного моделювання можна стверджувати, що двоканальний нечіткий контролер забезпечує необхідну якість роботи і стійкість системи автоматичного керування в усьому діапазоні зміни навантажень енергоблоку ТЕС.

Список літератури:

1. Черноусенко О. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Т. 4 (39). С. 20–28.
2. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. Киев, 2009. 309 с.
3. Коновалов М.А., Бунке А.С. Основы новой стратегии синтеза систем оптимального управления. Киев, 2014. 280 с.
4. Ковриго Ю., Коновалов М., Бунке А. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора. *Теплоэнергетика*. 2012. № 10. С. 1–8.
5. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами : учебное пособие / Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко и др.; под ред. Кулакова Г.Т. Минск : Вышэйшая школа, 2017. 238 с.
6. Ковриго Ю., Баган Т. Методика налаштування H_∞ -ПІД регулятора для об'єктів із запізненням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. Київ, 2013. № 1. С. 27–33.
7. Ковриго Ю., Баган Т., Бунке А. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционными теплоэнергетическими объектами. *Теплоэнергетика*. 2014. № 3. С. 9–14.
8. Свириденко В. Способ настройки двухконтурной автоматической системы регулирования (ДАСР) с дифференциатором по опережающему сигналу. *Энергетика и электрофикация*. 2018. № 3. С. 27–37.
9. Биленко В., Шавочкин И. Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков. *Теплоэнергетика*. 2006. № 4. С. 57–65.
10. Биленко В. Многоконтурные автоматические системы регулирования с несколькими регулирующими воздействиями и их применение для поддержания температуры пара прямоточных котлов. *Теплоэнергетика*. 2011. № 10. С. 51–59.
11. Штейнберг Ш., Серёжин Л., Залуцкий И., Варламов И. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2004. № 7. С. 1–7.
12. Бунке О., Саков Р., Новіков П. Проблеми та передумови вдосконалення автоматизації процесів управління ТЕЦ. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2018. № 61. С. 20–25.
13. Кулаков Г., Кравченко В., Макоско Ю. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть первая). *Наука и техника : международный научно-технический журнал*. 2012. № 5. С. 92–97.
14. Кулаков Г., Кравченко В., Макоско Ю. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть вторая). *Наука и техника : международный научно-технический журнал*. 2013. № 2. С. 77–82.
15. Radtke M. Zur Approximation linearer aperiodischer Übergangsfunktionen. *Zeitschrift messen, steuern, regeln*. 1966. № 9. S. 192–196.
16. Ковриго Ю., Новіков П. Алгоритм роботи двоканального нечіткого контролера для керування теплоенергетичними об'єктами. *Наукові вісті КПІ ім. Ігоря Сікорського*. 2019. № 3. С. 24–32.
17. Ковриго Ю., Новіков П. Двоканальний нечіткий контролер для регулювання технологічних параметрів в умовах нестационарності динамічних характеристик об'єкта керування. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2019. Т. 11 № 1. С. 4–13.

Novikov P.V., Bunke A.S. MODELING OF CONTROL SYSTEM OF TEMPERATURE MODE OF DIRECT-FLOW STEAM BOILER BASED ON TWO-CHANNEL FUZZY CONTROLLER

The article deals with the synthesis of an adaptive system of the control system of the temperature mode of the direct-flow steam boiler unit. The purpose of the article is to analyze the dynamic properties of coal direct-flow boiler at different loads, to develop a model of a control object that takes into account changes of parameters depending on external factors in real time, as well as the synthesis of an adaptive control system. Based on obtained experimental data, mathematical models of contours of regulation of the temperature mode

of the water-steam tract of Trypillia TPP in the form of transfer functions for two extreme values of load of the power unit were developed.

The dynamic characteristics of the coal-fired boiler unit at different load values are analyzed. There is a significant difference between models for different modes of operation, which does not allow the use single control system settings for the whole range of modes of the unit. Static characteristics of blocks of fuzzy logic of a two-channel fuzzy controller are described. The analytical dependences of the model parameters on the current load of the boiler are determined. The operating model has been developed that considers change of parameters depending on external factors in real-time.

In order to model the operation of systems with variable parameters of the control object model, it is proposed to replace the fixed-ratio program blocks with a sequence of elementary links, with the possibility of changing the model parameters directly during the simulation. Models of functional blocks developed are presented. A simulation of the temperature mode control system was performed over the entire range of modes of operation of the control object, considering the dependence of the model parameters on the load.

The results indicate the efficiency of using the signal of unit load in the fuzzy controller, is allowed to implement a control system that covers all modes without additional complications boiler control system structure. The developed two-channel fuzzy controller demonstrates the satisfactory quality of operation and stability of the automatic control system in the whole operating range of loads of the boiler unit.

Key words: *dynamic characteristics, temperature control, fuzzy logic, fuzzy control, simulink, modeling, control system.*

Павлов В.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ДІАГРАМ ГАНТА ДЛЯ ІЛЮСТРАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті проаналізовані математичні та графічні засоби ілюстрації статичного та динамічного балансування навантаження обчислювальних пристроїв. Традиційні способи опису не надають потрібної інформативності та наочності для ілюстрації методів і алгоритмів динамічного балансування. Особливо це необхідно у випадках, коли при виконанні балансування можуть змінюватися деякі показники. Наприклад, кількість завдань, їх складність, час додавання нових завдань, кількість обчислювальних пристроїв тощо.

Стрічкові діаграми, або діаграми Ганта раніше розглядалися лише як зручний і наочний засіб для відображення процесу проектного планування. Автор пропонує застосування діаграми Ганта в якості універсального засобу ілюстрації процесу динамічного балансування. Це дозволяє отримати зрозуміле графічне відображення процесу динамічного балансування. В якості показника завантаженості обчислювального пристрою застосовуються його часові характеристики; розглянути приклади побудови діаграм Ганта для відображення процесу динамічного балансування навантаження при різних випадках формування послідовності завдань, в тому числі і декількома частками з затримкою в часі.

Отримані діаграми дозволили провести аналіз та зрозуміти, з яких складників формується загальний час виконання всіх завдань. Мінімальне значення цього параметру є метою динамічного балансування. Діаграми також наочно надають інформацію про завантаженість кожного з обчислювальних пристроїв. Також визначені перспективи подальшого вдосконалення.

Ключові слова: розподілені обчислення, балансування навантаження, динамічне балансування, стрічкова діаграма, діаграма Ганта.

Постановка проблеми. Обробка величезних обсягів даних, яка супроводжує вирішення багатьох задач у системах штучного інтелекту, вимагає різкого підвищення ефективності обчислень. Динамічне балансування навантаження дозволяє оптимально використовувати наявні обчислювальні пристрої. Традиційні способи опису та ілюстрації методів і алгоритмів динамічного балансування, на жаль, не надають потрібної інформативності та наочності.

Особливо це стосується випадків, коли при виконанні балансування можуть змінюватися такі показники як кількість завдань, їх складність, час додавання нових завдань, кількість обчислювальних пристроїв тощо. Тому запропоновано в якості універсального засобу, який дозволяє врахувати всі ці зміни, використовувати діаграми Ганта. Вони надають необхідну наочність процесу балансування та досить прості в побудові.

Аналізостанніхдослідженьіпублікацій. Використання при динамічному балансуванні показника завантаженості обчислювального пристрою

вперше було запропоновано в роботі [1]. В ній доведено, що застосування цього показника забезпечує отримання мінімального часу виконання всіх завдань за допомогою наявних обчислювальних пристроїв. При цьому враховувалося, що обчислювальні пристрої можуть мати різну продуктивність. Але в наведених прикладах не розглядалися ситуації, коли завдання надходили не одночасно, а кількість обчислювальних пристроїв змінювалася під час балансування.

Стрічкові діаграми, або діаграми Ганта були розроблені більш ніж століття тому [2], але з самого початку й дотепер розглядалися лише в якості зручного та наочного засобу для відображення процесу проектного планування. В той же час для ілюстрації процесу динамічного балансування навантаження обчислювальних пристроїв використовувалися математичні [3] або графо-аналітичні засоби, де для відображення використовувалися графи [4], стовпчасті діаграми [5], структурні схеми [6] або у вигляді черг завдань [7, 8, 9]. Однак в усіх наведених роботах здебільшого розглядаються алгоритми

або статичного балансування, або динамічного зі сталими характеристиками продуктивності обчислювальних пристроїв.

Постановка завдання. Під балансуванням навантаження обчислювальних пристроїв в розподілених системах традиційно розуміється розподіл наявних завдань між наявними на цей же час обчислюваними пристроями. При цьому метою балансування є рівномірне завантаження обчислювальних пристроїв. Необхідною умовою виконання балансування є незалежність обчислень в окремих завданнях або можливість декомпозиції складних задач на певну множину окремих модулів, обчислення в яких є незалежними та можуть виконуватися паралельно.

Найпростіший алгоритм Round Robin передбачає розподіл завдань «по колу», коли не враховуються ні складність завдань, ні продуктивність обчислювальних пристроїв. Зрозуміло, що ігнорування цих важливих показників не дозволяє отримати рівномірного розподілу навантаження. Більш досконалими є алгоритми зваженого розподілу: Weighted Round Robin, Least Connections, Sticky Sessions, Throttel Load Balancing та інші [10, 11]. Всі ці алгоритми дозволяють динамічне пересування (міграцію) завдань із найбільш завантажених обчислювальних пристроїв на менш завантажені. Але жодний із них не розглядає ситуації, коли:

- нові завдання надходять вже після проведення балансування;
- деякі обчислювальні пристрої припиняють вирішувати завдання після проведення балансування;
- до обчислювальних пристроїв, наявних на час проведення балансування, додаються нові, обчислювальні потужності яких потрібно врахувати.

Всі ці ситуації потребують нового підходу до відображення процесу динамічного балансування.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі [1] розглянутий спосіб балансування на основі застосування універсального критерію, а саме *мінімальний час виконання всіх завдань на наявних обчислювальних пристроях* (далі – ОП). Необхідно розглянути приклад застосування цього критерію до диспетчеризації динамічного балансування навантаження, але для ілюстрації використовувалися таблиця. Автор проілюстрував цей же приклад за допомогою діаграми Ганта, де час вимірюється в умовних одиницях, бо в умовах масштабування будь-які визначені одиниці часу не мають значення.

Приклад 1

У наведеному прикладі розглядається балансування 8 завдань, кожне з яких має свою відмінну складність:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 5; Z_2 = 3; Z_3 = 2; Z_4 = 1; \\ Z_5 &= 7; Z_6 = 4; Z_7 = 8; Z_8 = 9 \end{aligned}$$

Наявні чотири ОП з такою обчислювальною потужністю:

$$P_1 = 2; P_2 = 1; P_3 = 1; P_4 = 3.$$

Час виконання i -того завдання на певному j -тому ОП позначено T_{ij} , який визначається:

$$T_{ij} = \frac{Z_i}{P_j}$$

Також в [1] було введено поняття «*поточний час роботи ОП* τ_j », яке відбивало час, що минув з моменту проведення балансування, співпадав із початку роботи ОП. Завдання розподілялися по ОП згідно порядку їх надходження, тобто спочатку розподілялися завдання Z_1 , потім Z_2, \dots, Z_N . Критерієм призначення завдання Z_i j -тому ОП вважався найменший поточний час роботи τ_j , який буде мати j -те ОП порівняно з усіма іншими після виконання завдання Z_i .

Діаграми Ганта у класичному вигляді спрощують роботу над проектами шляхом візуалізації виконання запланованих завдань у часі. Кожному виду робіт відводиться рядок, а окремі етапи виконання розміщуються у вигляді горизонтальних прямокутних блоків, початок і кінець яких синхронізовані в часі.

Для відображення процесу балансування модифікуємо класичну діаграму Ганта: залишимо відлік у часі, але кожний рядок буде зіставлений певному ОП, а завдання, призначені для виконання на ньому, будемо відображати у вигляді прямокутних блоків. Довжина кожного прямокутного блоку буде дорівнювати часу, який потрібен для виконання i -того завдання на певному j -тому ОП, тобто T_{ij} . Звичайно, якщо певне завдання мігрує з одного ОП до іншого, то довжина блоку буде змінюватися: зменшуватися, коли продуктивність ОП більша, або збільшуватися, коли менша.

Диспетчеризація балансування буде назначати i -те завдання j -тому ОП, коли для нього буде найменший поточний час роботи τ_j , тобто час завершення завдання на j -тому ОП буде найменший. У графічному вигляді це буде означати, що правий кінець відповідного прямокутного блоку буде

розташований на найменшій відстані від початку діаграми. Наприклад, при розподілі першого завдання Z_1 всі ОП знаходяться в режимі очікування ($\tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_j = \dots \tau_4 = 0$), тобто для його виконання буде вибрано той ОП, для якого виконується

$$\min \{T_{1j}\} \text{ для } j \in 1, 2, 3, 4$$

Діаграма Ганта для цього випадку буде виглядати так:

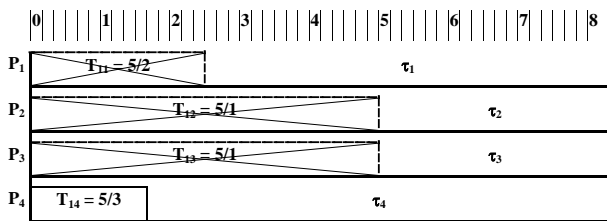


Рис. 1. Діаграма Ганта для розподілу завдання Z_1

Як бачимо з побудованої діаграми Ганта, завдання Z_1 буде призначено ОП P_4 , оскільки час його завершення буде найменший ($T_{14} < T_{11} < T_{12}, T_{13}$), що наочно виглядає як прямокутний блок найменшої довжини з усіх можливих інших варіантів розподілу. Після цього для ОП₄ поточний час роботи τ_4 вже буде дорівнювати $5/3$, для інших ОП він залишиться нульовим ($\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$).

За цими початковими умовами відбудеться розподіл завдання Z_2 .

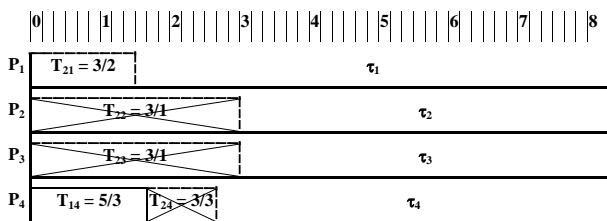


Рис. 2. Діаграма Ганта для розподілу завдання Z_2

Як бачимо з діаграми $\tau_1 = 3/2$, $\tau_2 = 3$, $\tau_3 = 3$, $\tau_4 = 8/3$. Оскільки з урахування розподілу завдання Z_2 найменший поточний час роботи буде в ОП₁, то це завдання буде призначено йому.

Подальші 6 кроків з розподілу завдань Z_3 - Z_8 будуть проходити так само. Кінцевий результат відобразиться такою діаграмою:

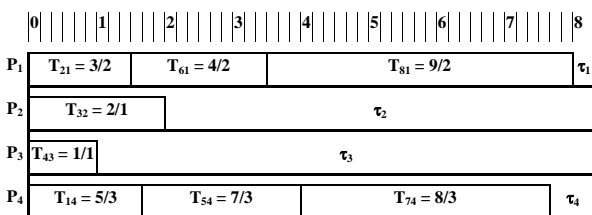


Рис. 3. Діаграма Ганта для розподілу всіх завдань

Таким чином шляхом диспетчеризації процесу балансування 8 завдань розподілені між чотирма обчислювальними пристроями так:

ОП₁: виконуються завдання Z_2, Z_6 та Z_8 , $\tau_1 = 16/2 = 8$

ОП₂: виконується завдання Z_3 , $\tau_2 = 2/1 = 2$

ОП₃: виконується завдання Z_4 , $\tau_3 = 1/1 = 1$

ОП₄: виконуються завдання Z_1, Z_5 та Z_7 , $\tau_4 = 20/3 = 7,67$

Було отримано той же результат, що і в [1], але процес балансування набув більшої наочності і зрозумілості. З побудованої діаграми також легко визначити, що **мінімальний час виконання всіх завдань**: $\Theta^8 = \max \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\} = 8$. Цей результат розподілення є найкращим за умов розподілу завдань у порядку їх природнього надходження без будь-якого впорядкування.

Використання діаграми Ганта в якості наочної ілюстрації процесу балансування навантаження також дозволяє розглянути ситуацію, коли завдання для розподілу надходять не одночасно, а декількома групами.

Приклад 2

Скорегуємо первісні умови Прикладу 1 таким чином: завдання Z_1 - Z_5 надходять відразу, а завдання Z_6 - Z_8 – із затримкою на 4 умовних одиниці часу. Складність завдань і потужність обчислювальних пристроїв автор залишив такою ж, як і у Прикладі 1. Зрозуміло, що балансування на першому етапі перших п'яти завдань не зазнає змін порівняно з Прикладом 1. Знизу буде додано діаграми-позначки часу надходження завдань (Рис. 4).

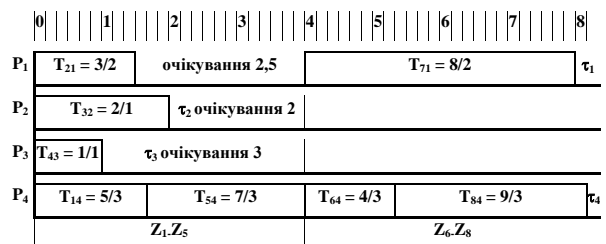


Рис. 4. Діаграма Ганта для Прикладу 2

З побудованої діаграми Ганта вбачається, що на час початку другого етапу балансування, коли додаються завдання Z_6 - Z_8 три з чотирьох обчислювальних пристроїв, а саме ОП₁, ОП₂ та ОП₃ вже закінчили виконання своїх запланованих завдань і знаходяться в режимі очікування. Тому вони можуть розглядатися в якості учасників процесу балансування. Оскільки обчислювальний пристрій ОП₄ зайнятий, то питання врахування його в якості учасника балансування навантаження залежить від часу його звільнення. В такому випадку ОП₄

завершує виконання завдання Z_5 четвертої умовної одиниці часу, а тому теж може розглядатися в якості учасника балансування навантаження. Тому диспетчеризація балансування навантаження обчислювальних пристроїв ОП₁-ОП₄ для вирішення завдань Z_6 - Z_8 буде відбуватися за вже описаним у Прикладі 1 алгоритмом, але результат його буде відмінним (Рис. 4):

ОП₁: виконуються завдання $Z_2, Z_8, \tau_1 = 3/2 + 2,5 + 8/2 = 16/2 = 8$

ОП₂: виконується завдання $Z_3, \tau_2 = 2/1 = 2$ (час очікування не враховується)

ОП₃: виконується завдання $Z_4, \tau_3 = 1/1 = 1$ (час очікування не враховується)

ОП₄: виконуються завдання Z_1, Z_5, Z_6 та $Z_8, \tau_4 = 25/3 = 8,33$

З побудованої діаграми також визначаємо *мінімальний час виконання всіх завдань*: $\Theta^8 = \max \{ \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4 \} = 8,33$. Відмінність пов'язана з двома етапами балансування, кожний з яких відбувався незалежно один від одного та за різними умовами. Побудована на Рис. 4 діаграма диспетчеризації балансування навантаження обчислювальних пристроїв дає повністю зрозумілу наочність цього процесу.

Приклад 3

В цьому прикладі автор розглядає таку ситуацію. Другий етап балансування відбувається, коли ОП₄ ще зайнято виконанням попереднього завдання. Для цього зменшено час затримки другої частки завдань, а саме Z_6 - Z_8 із 4 умовних одиниць часу до 2. Всі інші показники з Прикладу 2 залишаються без змін. Результат диспетчеризації балансування навантаження обчислювальних пристроїв можна бачити на Рис. 5.

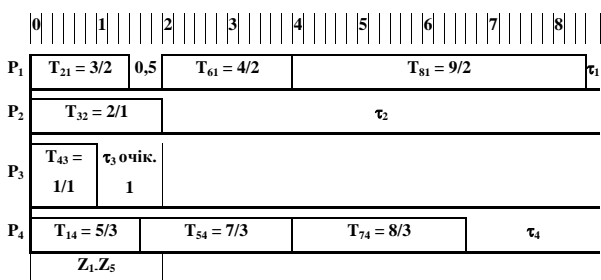


Рис. 5. Діаграма Ганта для Прикладу 3

На першому етапі балансування ніяких відмінностей порівняно з Прикладами 1 і 2 немає. Це

зрозуміло, адже умови щодо складності завдань та обчислювальних потужностей обчислювальних пристроїв теж однакові. Але оскільки час затримки другої частки завдань змінився, бачимо і відмінності порівняно з Прикладом 2.

Справа в тому, що на час другого етапу балансування, пов'язаного з надходженням завдань Z_6 - Z_8 вільними залишалися тільки три обчислювальних пристрої: ОП₁, ОП₂ та ОП₃, серед яких і відбувалося балансування, а ОП₄ був зайнятий вирішенням завдання Z_5 з першої частки завдань. Тому диспетчеризація відбувалася лише серед наявних вільних обчислювальних пристроїв, а саме завдання Z_6 за критерієм *мінімального часу його виконання* було розподілено на ОП₁. Оскільки після завершення виконання Z_5 воно звільнилося, то розподіл завдань Z_7 і Z_8 відбувався з урахування потужностей усіх чотирьох ОП.

Визначений з побудованої діаграми *мінімальний час виконання всіх завдань*: $\Theta^8 = \max \{ \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4 \} = 8,5$ лише на 0,5 умовних одиниць часу гірше ніж у Прикладі 1, де ніякої затримки в надходженні завдань взагалі не було. З порівняння діаграм Ганта з Прикладів 1 та 3 стає зрозумілим, що було отримано абсолютно однакові розподіли завдань між ОП, але оскільки мінімальний час Θ^8 в обох прикладах визначався саме ОП₁, то режим очікування для цього обчислювального пристрою й був причиною збільшення Θ^8 на 0,5 умовних одиниць часу.

Висновки. У статті проаналізовано традиційні способи опису та ілюстрації методів і алгоритмів динамічного балансування, визначено їх недостатню наочність. Запропоновано використовувати діаграми Ганта в якості універсального засобу відображення процесу динамічного балансування в умовах, коли складність завдань, час їх надходження та потужність обчислювальних пристроїв не є сталими величинами.

Розглянуто послідовність диспетчеризації з використанням раніше запропонованого [1] показника завантаженості обчислювального пристрою. Приведені приклади застосування діаграми Ганта для ілюстрації процесу динамічного балансування в різних умовах.

Визначена перспективність подальшого застосування запропонованого способу відображення балансування в умовах динамічної міграції завдань через додавання або вилучення певних ОП.

Список літератури:

1. Павлов В.Г. Диспетчеризація динамічного балансування навантаження обчислювальних пристроїв на основі оцінювання стану поточних обчислень. *Вчені записки Таврійського національного університету*

- імені В.І. Вернадського, Серія: «Технічні науки», Ч. 1, том 30, № 2, 2019, ст. 166–170. URL: www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/2_2019/part_1/28.pdf (дата звернення: 20. 03. 2020).
2. Gantt Henry, Clark Wallace. The Gantt chart, a working tool of management. New-York: The Ronald Press Company, 1922. 186 p. URL: <https://archive.org/details/ganttchartworkin00claruoft/page/n7/mode/2up> (дата звернення: 20. 03. 2020).
 3. Mukherjee D., Borst S.C. van Leeuwen J.S.H. & Whiting P.A. Universality of Power-of- d Load Balancing Schemes. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*. 2016. Issue 44(2). P. 36–38.
 4. 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.
 5. Бельков Д.В. Алгоритмы балансировки загрузки процессоров параллельной вычислительной системы. *Наукові праці ДонНТУ*. 2006. Випуск 106. С. 72–76.
 6. Хританков А.С. Модели и алгоритмы распределения нагрузки. Алгоритмы на основе сетей СМО. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2009. № 2. С. 65–79.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Игнатенко Е.Г., Бессараб В.И., Терепалов В.В. Алгоритм адаптивной балансировки нагрузки в кластерных системах. *Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр.* Київ: ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2010. Вип. 58. С. 142–150.
 10. Abhineet Anand, Kandi Phani Sai Sri Rohith. Analytical Study of different Load balancing algorithms. *International Journal of advanced studies in Computer Science and Engineering (JASCSE) Volume 7, Issue 1, 2018*. URL: https://www.researchgate.net/publication/323426406_Analytical_Study_of_Different_Load_Balancing_Algorithms (дата звернення: 20.03.2020).
 11. Емельянов А. Балансировка нагрузки: основные алгоритмы и методы. *blog.selectel.ru*. 2015. URL: <http://blog.selectel.ru/balansirovka-nagruzkiosnovnye-algoritmy-i-metody> (дата звернення: 20.03.2020).
 12. Burkhard Remo Aslak, Meier Michael, Rodgers Peter, Smis Matthias Thomas Jelle, Stott Jonathan. Knowledge visualization: A comparative study between Project Tube Maps and Gantt Charts. *5th International Conference on Knowledge Management. Graz, Austria: University of Kent. Retrieved 17 September 2017*. P. 388–395. URL: <https://kar.kent.ac.uk/14324/1/content.pdf>.

Pavlov V.G. GANTT CHART APPLICATION FOR ILLUSTRATION OF PROCESS OF DYNAMIC LOAD BALANCING OF COMPUTING DEVICES

In the article it was investigated the mathematical and graphic methods of illustration of static and dynamic load balancing of computing devices. The traditional methods of description do not give the necessary informing and visibility for illustration of methods and algorithms of the dynamic balancing. Especially it is necessary in the case when some indexes can change at implementation of balancing. For example, they are: amount of tasks, their complication, time of receipt of new tasks, and also amount of computing devices.

Bar diagrams or Gantt charts were previously considered only as a comfortable and evident mean for the representation of project planning processes. It was suggested to use the horizontal bar Gantt chart as universal method of illustration of process of the dynamic balancing. It allows us to get an understandable graphical representation of the dynamic balancing process. Time descriptions of computing device are used as an index of his workload.

They were reviewed examples of demonstration of the dynamic load balancing with application of Gantt chart under different conditions of forming of input queue. For example, there are several parts with a delay in time. These diagrams provided an analysis and an idea of what the total time of all tasks is formed from.

A minimum value of this parameter is the goal of the dynamic balancing. The diagrams also provide evidently visual information of the workload of each of the computing devices. Additionally, it was considered possibilities of future improvements of the offered method of load balancing representation.

Key words: distributed computing, load balancing, dynamic balancing, evaluating of loading, horizontal bar chart, Gantt chart.

Політанський Р.Л.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ МЕТОДОМ БУЛЕВОГО ГІПЕРКУБУ

У роботі розглянута методика визначення періоду генерованих дискретними відображеннями псевдовипадкових послідовностей, які мають властивість марківських ланцюгів. Додатній показник Ляпунова зазначених послідовностей вказує на те, що вони володіють властивостями динамічного хаосу і не мають періоду повторення. Однак слід зауважити, що виконання обчислень із дійними числами в реальних комп'ютерних системах завжди виконується зі скінченною точністю, що визначається кількістю цифр у досліджуваних числах.

Максимальна кількість неповторюваних елементів послідовності, представлених у десятковому форматі, становить 10^n . Задача визначення періодів генерованих послідовностей вимагає значних витрат машинного часу. В роботі запропонований алгоритм, який базується на відображенні десяткового дробу на багатовимірний масив двійкових чисел (булевий гіперкуб), який значно скорочує мінімально необхідну кількість обчислень.

Дослідження проводилися з використанням програмного середовища Dev C++. Точність обчислень становила до 9 десяткових знаків. Ефективність запропонованого алгоритму оцінювалася на прикладі логістичного відображення, для виконання програми використовувався комп'ютер класу ПЕОМ.

Отримані якісні дані щодо характеру залежності значення періоду від точності проведених обчислень. Метод має переваги з теоретичної точки зору і скерований на його практичне застосування для генерування псевдовипадкових послідовностей. Запропонований метод є більш точним порівняно з методом визначення періоду шляхом виявлення співпадань із заздалегідь вибраним значенням, оскільки при цьому повторення невідомих значень не можливо виявити. З практичної точки зору метод забезпечує визначення періоду в псевдовипадкових послідовностях, генерованих на основі будь-якого алгоритму з використанням програмних чи апаратних засобів.

Ключові слова: булевий гіперкуб, псевдовипадкові послідовності, стандарти IEEE, ланцюг Маркова, легка криптографія.

Постановка проблеми. Розроблення методів генерування псевдовипадкових послідовностей, які використовуються в системах криптографічного захисту, кодового розділення каналів, розширення спектру, є однією з основних задач, що підлягають вирішенню при побудові високоефективних систем передавання інформації [1, с. 175]. Дослідження статистичних властивостей псевдовипадкових послідовностей можуть бути проведені випробуваннями на відповідність вимогам NIST STS [2, с. 1].

Іншими методами перевірки генерованих послідовностей на їх відповідність критеріям псевдовипадковості є підходи Блюма, Голдвасера, Міккалі та Яо [3, с. 51], які базуються на поліноміальному алгоритмі їх генерування. Більшість зазначених послідовностей володіють властивістю марківських ланцюгів, кожен наступний елемент яких залежить лише від попереднього. Якщо в такому ланцюзі матиме місце повторення деякого значення, то генерована послідовність буде періодичною.

Визначення періоду є складною задачею з точки зору обчислювальної складності. В роботі розроблений алгоритм виявлення повторюваних значень у послідовності, в основу якого покладено відображення десяткового дробу на багатовимірний масив розмірності 10^n булевих змінних, де n – число десяткових знаків, які визначають дробову частину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток технологій, пов'язаних із використанням під'єднаних до мереж загального користування комп'ютеризованих пристроїв (в тому числі пристроїв, підключених до інтернету), вимагає розроблення нових методів шифрування, які одержали назву легкої криптографії. Важливість алгоритмів легкої криптографії зазначається в доповідях [4, с. 1], опублікованих на сайті NIST у 2017 році. Метою цих доповідей є стандартизація алгоритмів шифрування, які не потребують значних машинних ресурсів і можуть бути застосовані в автономних комп'ютерних системах. Згідно з цим документом в якості апаратної

реалізації алгоритмів легкої криптографії використовуються перепрограмовані мікроконтролери та пристрої RFID.

Актуальність досліджень алгоритмів потокового шифрування та розроблення пристроїв, які базуються на алгоритмах легкої криптографії і потребують обмежених обчислювальних ресурсів, підтверджується також низкою сучасних досліджень, результати яких представляються на конференціях IEEE по проблемах розвитку Інтернету речей (IoT) [5, с. 1]. До алгоритмів легкої криптографії належать також алгоритм блокового шифрування DESL, що на відміну від восьми перетворень використовує одне [6, с. 165] перетворення S-box, застосоване у класичному алгоритмі DES.

Крім того, заслуговують на увагу алгоритми потокового шифрування, більшість із яких базуються на псевдовипадкових послідовностях. Зокрема це послідовності Голда [1, с. 178], Уолша [7, с. 198], m-послідовності [1, с. 173], послідовності Баркера [7, с. 40], коди Френка [7, с. 110] та Чу [7, с. 143], які генеруються з використанням регістрів із оберненими зв'язками.

Постановка завдання. Основним недоліком зазначених методів є їх лінійність. Тому актуальним є розроблення нелінійних методів генерування, зокрема методів, заснованих на дискретних відображеннях систем із властивостями динамічного хаосу. Такі системи мають додатні показники Ляпунова і генерують числові послідовності, що теоретично є неперіодичними.

Метою роботи є розроблення та апробація нового алгоритму визначення періодів псевдовипадкових послідовностей. Вирішена задача генерування псевдовипадкових послідовностей зареєстрованої довжини, при яких відсутні повторення комбінацій заданого числа перших цифр десяткового дробу. Дослідження проводилися для різних значень кількості цифр, що позначають дріб (від трьох до дев'яти) на множині початкових значень $x_0 \in [0; 1]$ із різними кроками дискретизації залежно від точності подання десяткового дробу від 0.01 до 0.000001.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичною моделлю довільного одновимірного відображення є такий вираз:

$$x_{n+1} = f(x_n), \quad (1)$$

де f – деяка нелінійна функція, n – номер ітерації, x_n та x_{n+1} – поточний і наступний елементи псевдовипадкової послідовності.

Найвідомішим є логістичне відображення, яке описується функцією другого порядку (2):

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n), \quad (2)$$

де λ – параметр логістичного відображення, за яким генеруються хаотичні коливання.

Зумовлену кінцевою точністю обчислень періодичність хаотичних коливань, генерованих за логістичним відображенням із параметром $\lambda = 4$, автор пояснює на послідовності, утвореній в результаті обчислень із кінцевою точністю двох десяткових знаків:

$$\begin{aligned} &0.1 \rightarrow 0.36 \rightarrow \mathbf{0.92} \rightarrow 0.29 \rightarrow 0.94 \rightarrow \\ &0.23 \rightarrow 0.80 \rightarrow 0.64 \rightarrow \mathbf{0.92}. \\ 0.2 \rightarrow \mathbf{0.64} \rightarrow 0.92 \rightarrow 0.29 \rightarrow 0.94 \rightarrow 0.23 \rightarrow 0.80 \rightarrow \mathbf{0.64}. \\ &0.3 \rightarrow 0.84 \rightarrow 0.54 \rightarrow 0.99 \rightarrow 0.04 \rightarrow 0.15 \rightarrow \\ &0.51 \rightarrow 1.00 \rightarrow \mathbf{0.00} \rightarrow \mathbf{0.00}. \\ 0.4 \rightarrow 0.96 \rightarrow 0.15 \rightarrow 0.51 \rightarrow 1.00 \rightarrow \mathbf{0.00} \rightarrow \mathbf{0.00}. \end{aligned}$$

У наведеному прикладі цифри, які повторюються, виділені більш жирним шрифтом. Очевидно, що після повторення однієї цифри відбуватиметься повторення всієї послідовності.

Визначення періоду повторення заданої кількості десяткових значень у генерованій послідовності здійснювалося методом проектування деякої кількості перших десяткових знаків, які відображають члени послідовності, на багатомірний масив булевих змінних (булевий гіперкуб), розмірність якого становила $10 \times 10 \times \dots \times 10$ (кількість множників залежить від кількості десяткових знаків).

Для прикладу автор розглядає відображення на масив булевих змінних `bool_array`, генерованих за логістичним відображенням псевдовипадкової послідовності із початковим значенням $x_0 = 0.10$, $\lambda = 4$ при умові, що точність обчислень становить два десяткові знаки (перший рядок із наведеного прикладу). При цьому розмірність масиву, що містить контрольовані значення, становить 10×10 . Автор знову наводить генеровану послідовність, вказавши також процедуру заповнення масиву булевих змінних:

$$\begin{aligned} x_0 = 0.10 &-> \text{bool_array} [1] [0] = \text{true} \\ x_1 = 0.36 &-> \text{bool_array} [3] [6] = \text{true}. \\ \mathbf{x_2 = 0.92} &-> \mathbf{\text{bool_array} [9] [2] = \text{true}} \\ x_3 = 0.29 &-> \text{bool_array} [2] [9] = \text{true}. \\ x_4 = 0.94 &-> \text{bool_array} [9] [4] = \text{true} \\ x_5 = 0.23 &-> \text{bool_array} [2] [3] = \text{true}. \\ x_6 = 0.80 &-> \text{bool_array} [8] [0] = \text{true} \\ x_7 = 0.64 &-> \text{bool_array} [6] [4] = \text{true}. \\ \mathbf{x_8 = 0.92} &-> \mathbf{\text{bool_array} [9] [2] = \text{true}}. \end{aligned}$$

Як видно із наведеного прикладу довжина послідовності, утвореної неповторюваними значеннями, становить 9, тобто: $\{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$, тоді як період становить 6 $\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$.

Блок-схема розробленого алгоритму, що визначає довжину послідовності, утвореної неповторюваними значеннями, наведена на рисунку 1.

Автор зауважує, що для визначення періоду потрібно виконати алгоритм ще раз із початковим значенням, яке повторюється і було визначене на

попередньому кроці. В цьому випадку генерована послідовність до завершення алгоритму матиме такі значення:

$x_0 = 0.92 \rightarrow \text{bool_array}[9][2] = \text{true}.$
 $x_1 = 0.29 \rightarrow \text{bool_array}[2][9] = \text{true}.$
 $x_2 = 0.94 \rightarrow \text{bool_array}[9][4] = \text{true}.$
 $x_3 = 0.23 \rightarrow \text{bool_array}[2][3] = \text{true}.$
 $x_4 = 0.80 \rightarrow \text{bool_array}[8][0] = \text{true}.$
 $x_5 = 0.64 \rightarrow \text{bool_array}[6][4] = \text{true}.$
 $x_6 = 0.92 \rightarrow \text{bool_array}[9][2] = \text{true}.$

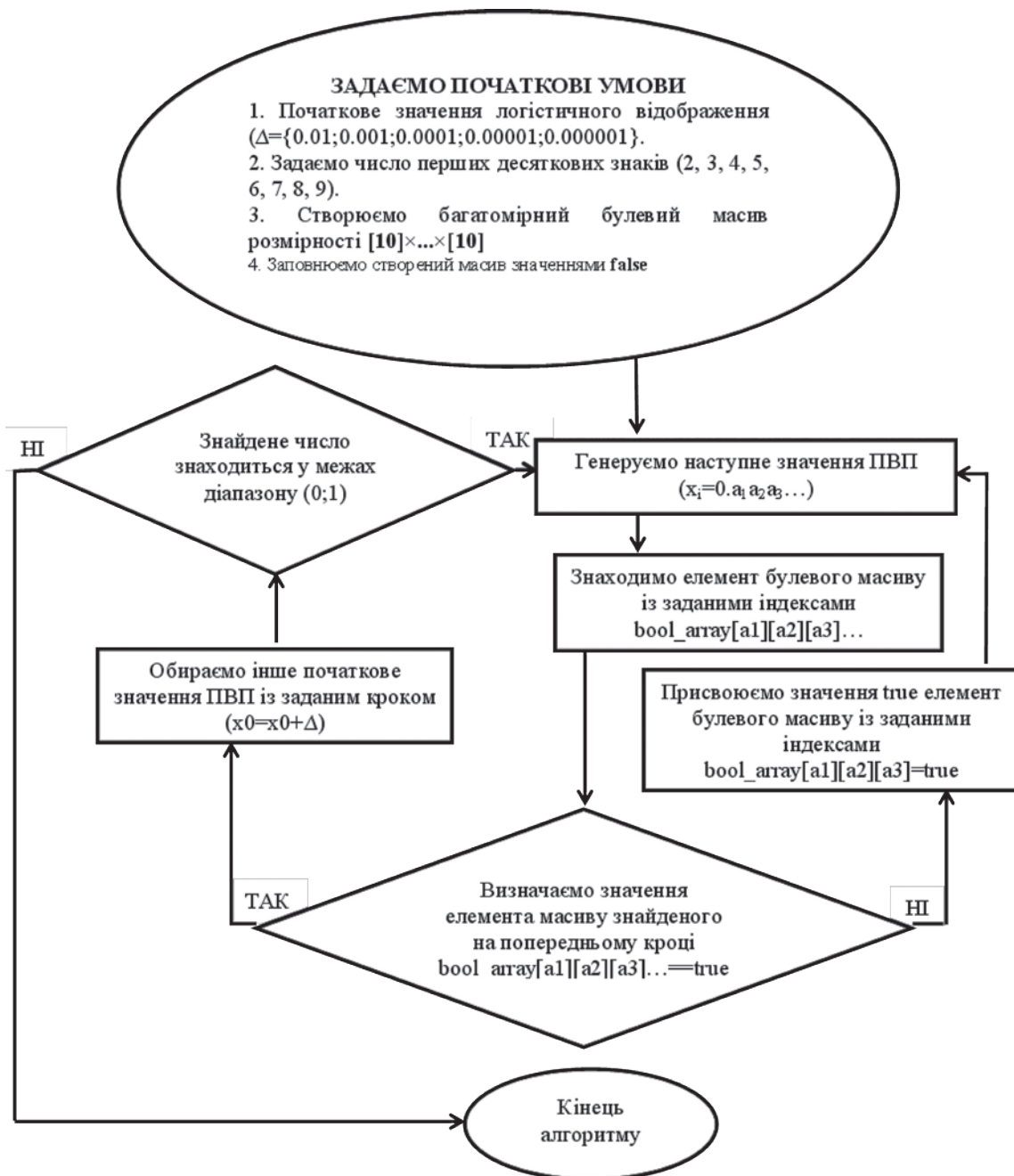


Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення довжини послідовності, утвореної неповторюваними значеннями

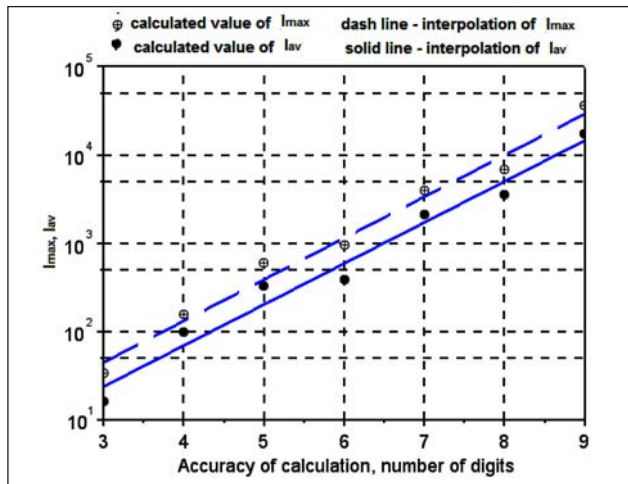


Рис. 2. Обчислені середні та найбільші значення довжин ПВП, генерованих за логістичним відображенням при $\lambda = 4$ і відповідні їм інтерполяційні прямі, розраховані у припущенні експоненційної залежності від точності обчислень

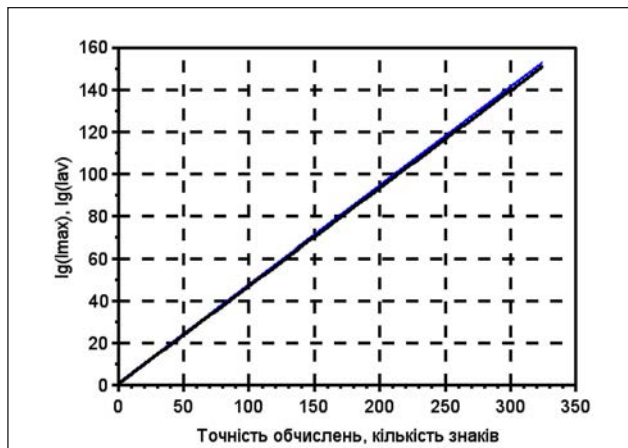


Рис. 3. Екстраполяція середніх і найбільших значень довжин ПВП, генерованих за логістичним відображенням при $\lambda = 4$

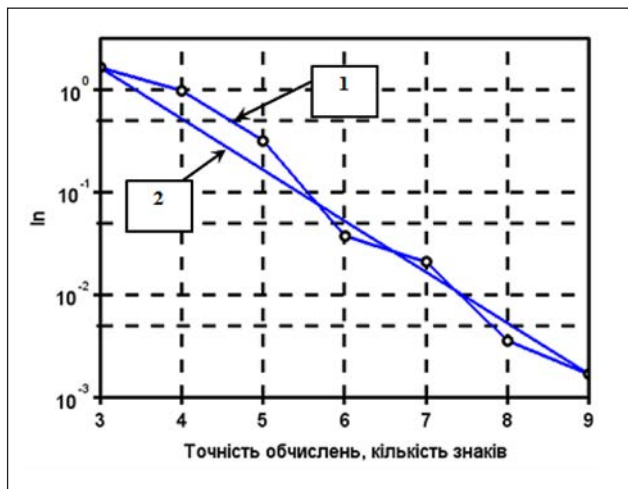


Рис. 4. Залежність нормованого значення довжини ПВП, генерованих за логістичним відображенням при $\lambda = 4$ від точності обчислень (1) та її лінійна інтерполяція (2)

Результати досліджень періодичності ПВП, генерованих за логістичним відображенням з використанням розробленого алгоритму, наведені в Табл. 1.

У таблиці наведені максимальні та відповідні їм початкові значення ПВП, середні та нормовані середні значення довжин ПВП, для яких спостерігається максимальне значення довжини. Розрахунки проводилися для точності обчислень 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, 8-, 9-десяткових значень. Для кожного значення точності обчислень найменшим ступенем дискретизації, для якого було доцільно проводити розрахунки, є 0.01.

Найбільший ступінь дискретизації обмежувався двома чинниками: точністю обчислень і максимальним часом розрахунків, який не перевищував 2 години. Так, для точності обчислень 9-десяткових знаків і кроку дискретизації 4-десяткових знаків час обчислень становив приблизно 15 годин. Наведені в таблиці часові витрати на обчислення довжини ПВП отримані з використанням процесора Intel з частотою 2.00 GHz і програмного середовища Dev C++.

Нормоване значення довжини ПВП розраховано як відношення її середнього значення до потужності множини, утвореної десятковими числами розрядності n (3):

$$l_{norm} = l_{av} / 10^n, \quad (3)$$

де l_{av} та l_{norm} – середнє та нормоване значення довжини ПВП, n – точність обчислень.

Розраховані значення середніх і максимальних довжин ПВП наведені на Рис. 2 у напівлогарифмічному масштабі. Їх можна інтерполювати експоненційними залежностями, описаними такими виразами:

$$l_{av} = 0.957 \cdot e^{1.07 \cdot n}, \quad (4)$$

$$l_{max} = 1.746 \cdot e^{1.08 \cdot n}, \quad (5)$$

На Рис. 2 зображені також інтерполяційні прямі, побудовані на основі виразів (4) і (5) у напівлогарифмічному масштабі.

Екстрапольовані значення десяткових логарифмів середніх і максимальних значень довжин ПВП, які побудовані за формулами (4) і (5), практично збігаються (Рис. 3) і можуть бути використані для оцінювальних значень довжин послідовностей для високих значень точностей обчислень,

Результати статистичних досліджень періодичності ПВП при різних значеннях кроку дискретизації і початкових значень хаотичних коливань в діапазоні $x_0 \in (0;1)$

Точність обчислень, кількість десяткових знаків	Крок дискретизації	Максимальні значення довжин ПВП	Середні значення довжин ПВП	Нормовані середні значення	Час обчислень, с
		Відповідні їм початкові значення			
3	0.01	30 / 0.28	15.38	1.54	<1
	0.001	34 / 0.322	16.37	1.64	<1
4	0.01	150 / 0.22	89.94	0.90	<1
	0.001	154 / 0.072; 0.347	94	0.94	<1
	0.0001	156 / 0.1976	97.7	0.98	5
5	0.01	499 / 0.34	273	0.273	<1
	0.001	581 / 0.069	319.8	0.32	1
	0.0001	595 / 0.0779	324.6	0.32	9.72
	0.00001	603 / 0.27618	323	0.32	115.7
6	0.01	801 / 0.39	384.68	0.038	<1
	0.001	911 / 0.416	375.46	0.038	4.36
	0.0001	931 / 0.0778	382.76	0.038	42.15
	0.00001	947 / 0.39731	383.71	0.038	348.6
	0.000001	948 / 0.357161	382.93	0.038	4390
7	0.01	3371 / 0.24	2150.9	0.022	4
	0.001	3799 / 0.394	2133.1	0.021	42.57
	0.0001	3892 / 0.2536	2109.33	0.021	394
	0.00001	3942 / 0.41866	2116.27	0.021	3865
8	0.01	6194 / 0.34	3258	0.0033	45.24
	0.001	6654 / 0.209	3475.21	0.0035	425
	0.0001	6772 / 0.2478	3548.84	0.0036	4286
9	0.01	34272 / 0.1; 0.2	17200.36	0.0017	494.8
	0.001	36525 / 0.03	17040.99	0.0017	5396

що потребують використання спеціалізованих потужних обчислювальних кластерів.

Наприклад, при точності обчислень 250 знаків середня довжина послідовності становитиме 10^{120} чисел, що приблизно дорівнює 2^{360} .

На Рис. 4 у напівлогарифмічному масштабі наведена залежність нормованих на потужність множини десяткових чисел заданої розрядності значень довжини ПВП, генерованих за логістичним відображенням при $\lambda = 4$.

Так, залежність нормованої довжини від точності обчислень є обернено експоненційною, а відповідна апроксимуюча залежність описується так:

$$l_{norm} = 97.047 \cdot e^{-1.23 \cdot d}, \quad (6)$$

З таблиці 1 випливає, що подальше зменшення кроку дискретизації на порядок призводить до зростання часових затрат приблизно до 10 год. Збільшення точності обчислень вимагає використання спеціалізованих обчислювальних комплексів зі значним обсягом оперативної пам'яті. При точності обчислень 10 десяткових знаків необхідний обсяг пам'яті становить 10^{10} байт, що приблизно дорівнює 9 Гбайт, що не забезпечується техніч-

ними можливостями користувацького програмного та апаратного забезпечення та вимагає використання програмного-апаратних обчислювальних комплексів із спеціалізованою архітектурою.

Підвищення швидкодії обчислень на множині початкових значень із найменшим можливим кроком дискретизації, що дорівнює 10^{-n} , можливе шляхом створення паралельних алгоритмів, що є відносно нескладною задачею, в той час як виконання паралельних обчислень при збільшенні точності обчислень є більш складним.

Висновки. Запропонований алгоритм обчислення довжини ПВП шляхом відображення десяткового дробу на багатовимірний масив булевих змінних уможливує встановлення значень періоду генерованих ПВП та його залежності від початкових значень хаотичних коливань і параметру логістичного відображення з використанням ПЕОМ із відносно невисокими обчислювальними характеристиками.

Одержані результати можуть слугувати основою аналізу поведінки ПВП шляхом екстраполяції даних для більш високих значень точності обчислень, що уможливує вибір оптимальної конфігурації автономних обчислювальних пристроїв для генерування псевдовипадкових послідовностей із заданими значеннями періоду.

Список літератури:

1. Климаш М.М., Пелішок В.О. Проектування ефективних систем безпровідного зв'язку. Львів, 2010. 232 с.
2. NIST. URL: <https://www.nist.gov/publications/statistical-test-suite-random-and-pseudorandom-number-generators-cryptographic>.
3. Гулак Г.М., Мухачов В.А., Хорошко В.О., Яремчук Ю.Є. Основи криптографічного захисту інформації : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2011. 199 с.
4. NIST. URL: <https://www.nist.gov/publications/report-lightweight-cryptography>.
5. Liu B., Wu R., Xie M., Li Q.P. Loong: A Family of Involutional Lightweight Block Cipher Based on SPN Structure. IEEE Access. Vol. 7. 2019. P. 136023–136035.
6. Stallings W. Cryptography and Network Security Principles and Practices, Fourth Edition. Prentice Hall. 2005. 592 p.
7. Сумик М.М., Прудіус І.Н., Сумик Р.М. Теорія сигналів : підручник. Львів : Бескид біт, 2008. 232 с.

Politskyi R.L. INVESTIGATION OF THE PERIODICITY OF PSEUDORANDOM SEQUENCES BY THE BOOLEAN HYPERCUBE METHOD

The method of determining the period of discrete mapping of pseudorandom sequences having the property of Markov chains is considered in the paper. The Lyapunov exponent of these sequences indicates that they have dynamic chaos properties and, as a consequence, do not have a repetition period. However, it should be noted that performing calculations with real numbers on real computer systems is always done with finite accuracy, which is determined by the number of digits in the numbers being investigated. The maximum number of non-repeating elements presented in decimal format in any sequence is 10^n .

The task of defining periods of generated sequences requires considerable machine time. An algorithm based on the mapping of a decimal fraction to a multidimensional array of binary numbers (Boolean hypercube) is proposed, and it significantly reduces the minimum required number of calculations. The studies were conducted using the Dev C++ software environment. The accuracy of the calculations was up to 9 decimal places.

The effectiveness of the proposed algorithm was evaluated by the example of logistic mapping; to use the program used a computer class PC. The qualitative data about the character of the dependence of the value of the period on the accuracy of the calculations are obtained. The method has advantages from the theoretical point of view and is useful for practical application for the generation of pseudorandom sequences.

The proposed method is more accurate than the period determination method based on detecting matches with a pre-selected value, since the repetition of unknown values cannot be detected. From a practical point of view, the method provides for determining the period in pseudorandom sequences generated by any algorithm using software or hardware.

Key words: *Boolean hypercube, pseudorandom sequences, IEEE standard, Markov sequences, light cryptography.*

Портянко Т.М.

Черкаський державний технологічний університет

Кучеренко В.С.

Черкаська медична академія

РОЛЬ ПЛАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОСТІ БІЗНЕСУ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Забезпечення безперервності бізнесу є одним із найважливіших стратегічних напрямів розвитку будь-якої компанії. Відповідно до вимог документації, що регламентує впровадження комп'ютеризованих систем (далі – КС) на фармацевтичних підприємствах, забезпечення безперервності бізнесу зумовлено необхідністю зберігати стійкість і стабільність функціонування КС у різних умовах несприятливого впливу зовнішніх і внутрішніх факторів техногенного та/або природного характеру на бізнес-процеси компанії. Безпека пацієнтів, якість продукції та цілісність даних не повинні піддаватися негативному впливу у разі збоїв у роботі або поломок у процесі експлуатації КС. Управління безперервністю бізнесу включає в себе аварійне відновлення, яке охоплює технічне відновлення КС і містить порядок дій персоналу по відновленню критично важливих ІТ-сервісів. Всі дії в аварійних / надзвичайних ситуаціях необхідно ретельно документувати і затверджувати. Для цього необхідно створити документ (план), що описує заходи, які необхідно вжити в разі часткової чи повної відмови КС. У статті розкрито практичні підходи до створення Плану забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення (далі – План), враховуючи специфіку та нормативні вимоги фармацевтичного виробництва. Відображені заходи, що можуть варіюватися від запланованого скорочення апаратного обладнання до переходу в систему з паперовими носіями інформації тощо. В статті підкреслено, як План визначає, яким чином бізнес-процеси компанії продовжують функціонувати і обробляти дані після збою в роботі КС. Особливу увагу приділено розділам Плану, де відображені кроки, що необхідні для відновлення бізнес-процесів після порушення і, за необхідності, як проходить керування даними, отриманими під час порушення, ролі і обов'язки персоналу, процес передачі інформації, а також визначення схеми для запуску Плану в дію. Визначається та обґрунтовується його необхідність там, де для продовження роботи бізнес-процесів застосовується інтерактивне внесення інформації, як будь-які електронні записи або дані будуть синхронізуватися відразу після відновлення КС. У статті приділена увага плануванню дій у надзвичайній ситуації, що включають регулярне тестування (випробування), оцінку ефективності Плану для підтвердження його працездатності в умовах, що змінюються, а також його корекцію.

Ключові слова: загрози, аварійні ситуації, бізнес-процеси, безпека пацієнтів, план безперервності бізнесу, комп'ютеризована система.

Постановка проблеми. У сучасному інформаційному суспільстві спостерігається зростаюча залежність успішності бізнесу від ефективної і безперервної роботи інформаційної інфраструктури. Інформатизація та автоматизація всіх сфер людської діяльності тягне за собою підвищення масштабів виробничих аварій і катастроф, які збільшують обсяг збитку для суб'єктів господарювання. Спектр загроз економічній, фізичній та інформаційній безпеці, а також перелік вразливостей технічної інфраструктури вітчизняного бізнесу і, зокрема, корпоративних інформаційних систем, стає дедалі більшим. Форс-мажорні обставини можуть виникнути в будь-який період діяльності організації. Навіть незначні інциденти

можуть мати суттєві наслідки. Забезпечення безперервності бізнесу є одним із найважливіших стратегічних напрямів розвитку компанії. Основними причинами, які призводять до таких втрат, є недооцінка ймовірності ризиків або відсутність у компанії ресурсів на розробку планів дій у разі настання аварійних і форс-мажорних ситуацій.

Особливо це стосується фармацевтичної промисловості, де безпека пацієнтів, якість продукції та цілісність даних не повинні піддаватися негативному впливу у разі збоїв у роботі чи поломки у процесі експлуатації комп'ютеризованих систем (далі – КС) [1, с. 10]. Для цього необхідно планувати безперервність виконання бізнес-процесів, дотримуючись нормативних вимог. Наявність

таких планів зводять до мінімуму наслідки різного роду інцидентів та навіть катастрофи і забезпечує можливість максимально швидко взяти під контроль ситуацію і відновити виконання критично важливих завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох країнах система безперервності ведення бізнесу в різних формах функціонує ще з 80-х років ХХ століття. За звітом, складеним U.S. Department of Homeland Security, Office of Domestic Preparedness разом з Michigan State University, можна констатувати таку статистику в Сполучених Штатах Америки:

- 47% підприємств, у яких відбулася пожежа або крадіжка, виходять з бізнесу;
- 44% компаній, які втратили записи під час катастрофи, ніколи не відновлюються;
- 93% компаній, які втратили значну частину даних, виходять з бізнесу впродовж п'яти років;
- більшість підприємств витрачає менше 3% від їх загального бюджету на планування відновлення бізнесу;
- один випадок втрати даних обходиться бізнесу в середньому у 10 000\$.

У роботах зарубіжних та вітчизняних авторів розглядаються питання актуальності впровадження системи забезпечення безпеки бізнесу в інформаційні системи підприємств та банківську діяльність. Проведені дослідження В. Ситніченко, Г. Кисельової, Є. Стоякіна, О. Дуксенко, А. Корченко та інших переважно націлені на виявлення загроз, таких як хакерські атаки, падіння серверів, технічні збої та інше [2, с. 4]. Але, на жаль, це не єдині загрози діяльності підприємств, особливо фармацевтичного сектора. Низький рівень зацікавленості компаній у виділенні окремого процесу й інвестуванні в його розвиток може бути викликаний складнощами в розумінні технічних процесів та достатньо високою вартістю ІТ-продуктів, які забезпечать впровадження автоматизованого процесу бізнес-безперервності компанії [3, с. 48]. Зважаючи на світову статистику, безпека підприємств фармацевтичної галузі у нашій країні є не тільки актуальною для самих підприємств, а й має соціальне та економічне значення. Держава несе відповідальність за якість лікарських засобів та виробів медичного призначення перед громадянами, а фармацевтичні підприємства, як суб'єкти господарювання, відповідальні перед державою. Тому їх безперервне та безпечне функціонування є важливим для забезпечення населення країни стратегічною продукцією.

Мета статті. З огляду на визначену вище актуальність обумовленого питання метою статті

є розробка методичних підходів і практичних рекомендацій щодо плану із забезпечення безпечності бізнес-процесів, що включає технічне відновлення КС і містить порядок дій персоналу з відновлення критично важливих ІТ-сервісів на підприємствах фармацевтичної промисловості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні практично всі учасники ринку прагнуть до збільшення автоматизації бізнес-процесів і зменшення людського впливу на їх впровадження. З одного боку, це позитивне прагнення, проте, з іншого боку, беручи до уваги збільшення кількості і складності кібератак, автоматизація стає найбільш вразливим елементом компанії, який може на значний період часу зупинити або паралізувати її діяльність. Коли йдеться про здоров'я та життя людини, ніхто не має права довіряти КС, не будучи впевненим у належному рівні її надійності. Сьогодні комп'ютерні технології використовуються не тільки у виробничих процесах фармацевтичного виробництва, а й у всіх інших системах, що складають фармацевтичну систему якості організації: управління приміщеннями і обладнанням, системами лабораторного контролю, управління матеріалами, процесами, які охоплюють весь цикл маркування продукції, та інше. Інформаційні системи контролюють параметри виробничого процесу, тим самим керуючи ними. За допомогою інформаційних систем персонал створює електронні документи та записи тощо. Прийнятний рівень їх надійності повинен бути збудований шляхом застосування ефективної моделі життєвого циклу КС. Належне планування аварійного відновлення і методи захисту, так само в числі інших процесів, гарантують надійність КС і точність результатів, отриманих у процесі експлуатації. Відповідно до нормативних вимог, щоб забезпечити придатність КС супроводжувати критичні процеси, мають бути вжиті заходи перестороги для гарантування безперервного супроводу таких процесів у разі поломки системи (наприклад, ручна або альтернативна система). Час, необхідний для приведення в дію альтернативних заходів, має враховувати ризик та бути придатним для конкретної системи та супроводжуваного робочого процесу [4, с. 218]. Такі заходи мають бути адекватно задокументовані та випробувані.

Управління безперервністю бізнесу – це комплексний процес, який допомагає визначити потенційні загрози і їх вплив на звичайний порядок ведення бізнесу. Зазначений процес надає компанії можливість завчасно підготуватися і визначити порядок дій для забезпечення максимально

ефективного управління компанією у разі істотних інцидентів або катастроф. Управління безперервністю бізнесу включає в себе кроки, необхідні для відновлення бізнес-процесів після порушення, продовжуючи при цьому виготовляти продукцію або надавати послуги замовнику, та включає заходи, які часто описуються як відновлення в аварійних ситуаціях.

Управління безперервністю бізнесу, як і будь-який процес, починається з аналізу з подальшим визначенням стратегії, сценаріїв і планів дій. Специфіка планів залежить від типу компанії, критичних для бізнесу процесів, необхідного рівня їх стійкості до позаштатних ситуацій. Планування забезпечення безперервності бізнесу може охоплювати кілька рівнів – від відомчого до корпоративного – і гарантує те, що критично важливі бізнес-процеси зможуть тривати, а своєчасне відновлення основних бізнес-функцій буде реалізовано.

Всі дії в аварійних / надзвичайних ситуаціях необхідно ретельно документувати і затверджувати. Для цього необхідно створити документ (план), що описує заходи, які необхідно вжити в разі часткової чи повної відмови КС.

План забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення (далі – План) забезпечує альтернативні процедури, які будуть виконуватися персоналом для заміни відсутніх функціональних можливостей КС і забезпечення безпечної роботи бізнес-процесів під час збою, а також включає комплекс технічних і організаційних заходів щодо зниження ризиків переривання бізнесу в разі виникнення надзвичайної ситуації. Заходи можуть варіюватися від запланованого скорочення апаратного обладнання до переходу в систему з паперовими носіями інформації. Документ визначає кроки, необхідні для відновлення бізнес-процесів після порушення і, за необхідності, як проходить керування даними, отриманими під час порушення, ролі і обов'язки персоналу, необхідний процес передачі інформації, а також визначає схеми для запуску Плану в дію [5, с. 187].

Там, де для продовження роботи бізнес-процесів застосовується інтерактивне внесення інформації, необхідно розглянути, як будь-які пов'язані електронні записи або дані будуть синхронізуватися відразу після відновлення КС.

План створюється на основі аналізу бізнес-процесів компанії. Специфіка Плану залежить від критичних для бізнесу процесів і необхідного рівня їх стійкості до аварійних / надзвичайних ситуацій. Основний критерій Плану – час, у рам-

ках якого КС буде відновлена і підготовлена до роботи.

Найбільш важливими факторами, що забезпечують успіх планування, є облік усіх дрібниць і поетапна розробка кожного невеликого елемента Плану.

Етапи створення Плану:

- дослідження;
- розробка;
- впровадження;
- тестування.

Під час підготовки Плану необхідно провести аналіз існуючих для компанії ризиків, визначаючи важливі питання безпеки КС. Ризики, пов'язані з недоступністю даних, призводять до уповільнення бізнес-процесів. Критичні функції КС, що підтримують ці процеси, повинні бути виявлені і також мають бути оцінені ризики для кожного з них [6, с. 229; 7, с. 7; 8, с. 26].

Планування дій у надзвичайній ситуації включає регулярне тестування (випробування), оцінку ефективності Плану забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення для підтвердження його працездатності в умовах, що змінюються, і корекцію. На процес формування і тестування впливають часті зміни обладнання, програм і документації. План забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення – це документ, що постійно змінюється. План тестується одним із методів, наприклад, за допомогою періодичних оглядів КС, мозкового штурму, покрокових інструкцій (СОПів), тестування розділів Плану, перевстановлення сервера, переходу на резервний вузол і повного тестування.

Безперервність бізнесу неможливо чітко визначити в системі роботи компанії та прив'язати до якоїсь певної функції. Це комплексні заходи, виконання яких залежить від усіх залучених співробітників – служби безпеки інформаційних технологій, інформаційної безпеки, логістики, персоналу та іншого. Важливо пам'ятати, що без прямого залучення власників бізнес-процесів Плани матимуть лише теоретичне значення і у разі кризової ситуації можуть лише завадити, а не виконувати свою основну функцію – забезпечувати та реалізовувати безперервність бізнесу компанії.

Добре підготовлений План забезпечує компанії покрокові інструкції, що відповідають типу і тяжкості ситуації, що виникла. У ньому вказуються функціональні групи фахівців компанії, підготовлені для реалізації Плану. Документ включає в себе максимально докладний опис дій персоналу в разі будь-якої аварійної / надзвичайної

ситуації, яка може статися. Це може бути, наприклад, відмова обладнання, зависання важливих сервісів, вірусні і хакерські атаки, масштабні природні і техногенні аварії тощо. Організація процесів аварійного відновлення функціонування КС повинна бути стратегією всієї компанії, а не тільки власника КС (системного адміністратора). Керівники всіх підрозділів, діяльність яких залежить від послуг, що надаються КС, розробляють процедури дій у надзвичайних обставинах, а також беруть участь у розробці Плану. Кожний функціональний підрозділ «запускає» частину Плану в рамках загальних зусиль з відновлення діяльності КС. Важливим моментом у процесі складання Плану є участь вищого керівництва компанії, відповідального за надання ресурсів і визначення балансу між інвестиціями в інформаційні технології і часом простою втратою даних у разі збою. Обов'язком керівництва підприємства є (в тому числі власників процесів, власника Системи і департаменту Якості) гарантування, що відповідний документ «План забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення», розроблений і впроваджений, буде періодично перевірятися і відразу після початку впровадження його вимогам буде слідувати персонал структурних підрозділів і аналізувати відповідність вимог Плану корпоративній стратегії компанії і нормативним вимогам.

У Плані має бути відображено навіть виконання таких забезпечуючих функцій, як утримання будівель і устаткування. Ефективність виконання цих функцій може не впливати безпосередньо на роботу ІТ-інфраструктури, проте від неї буде частково залежати відновлення роботи технічних засобів.

Документ «План забезпечення безперервності бізнесу та аварійного відновлення» є не тільки технічним планом – він передбачає проведення організаційних заходів. Тому в основу Плану покладені відомості про структуру та функції компанії, кошти, необхідні для підтримки її діяльності, величину збитку від неможливості нормального функціонування, персонал, який прийме на себе управління в кризовій ситуації, і процедури, які будуть використовувати.

План включає докладні інструкції з переключення на резервні канали зв'язку, використання резервних потужностей, резервування та відновлення інформації, необхідної для роботи, перелік та методика дій з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, а також план тренувальних і тестувальних заходів для персоналу та керівництва.

Аналіз літературних джерел та практичні підходи дозволили автору сформулювати основні розділи Плану та короткий їх зміст.

Першим розділом має бути вступ, в якому викладено мету, завдання, основні положення документу. Формулювання повинні бути чіткими і конкретними.

Другий розділ – це оцінка надзвичайної / аварійної ситуації. Цей розділ описує чинники ризику і заплановані заходи щодо їх контролю, а саме: опис несприятливих подій і небезпеки (кризові ситуації), які можуть негативно вплинути на функціонування КС. Тут доцільним буде провести класифікацію можливих несприятливих подій і небезпек (наприклад, загрозлива, серйозна, що вимагають уваги ситуації), оцінку ймовірності їх виникнення. Коротко описати перелік критеріїв для визначення несприятливих подій і небезпек, а також їх потенційні джерела. Сценарії кризових ситуацій, визначення можливого збитку (у разі потреби). Необхідно провести й описати оцінку остаточних ризиків.

Третій розділ – діяльність у кризовій ситуації. Розділ описує необхідні ресурси і умови для аварійного відновлення. Під час його формування необхідно описати пріоритетні бізнес-процеси компанії, скласти перелік внутрішніх і зовнішніх ресурсів (наприклад, технічні засоби, програмне забезпечення, засоби зв'язку, документи); внести облікову інформацію про технічне, програмне та інше забезпечення, що необхідне для відновлення бізнесу компанії в разі кризової ситуації, контактну інформацію (наприклад, список осіб, яких необхідно сповістити про кризову ситуацію із зазначенням адрес і телефонів). У разі дії SLA-угоди (угоди про рівень надання послуги постачальником КС) – вказати координати зовнішнього підрядника.

Четвертий розділ – організаційні ресурси. Необхідно визначити необхідні ресурси та умови для аварійного відновлення.

П'ятий розділ – технічне забезпечення. Розділ описує заходи щодо створення і підтримки бази технічних засобів, що забезпечує безперебійну діяльність КС у надзвичайній / кризовій ситуації.

Шостий розділ – тестування Плану. Необхідно описати порядок проведення випробувань плану, при цьому вказати, наприклад:

- що підлягає випробуванням під час перевірки реалізації Плану;
- хто повинен проводити випробування;
- коли повинні здійснюватися випробування;
- результати випробувань.

План тестування може бути загальним або складатися з окремих частин. Деякі розділи цього плану можуть бути розділами інших загальних планів.

В останньому розділі з робочою назвою «Порядок перегляду плану» необхідно вказати терміни перегляду плану (наприклад, плановий, частковий, повний).

План повинен бути створений для кожної впровадженої КС у компанії і повинен охоплювати не тільки процес відновлення системи, але і будь-якої інфраструктури, необхідної для функціонування системи.

На думку автора, створення Плану не підміняє собою систему резервного копіювання, він лише надає їй додатковий функціонал у частині критично важливих інформаційних ресурсів і цілий комплекс процедур, необхідних для того, щоб забезпечити постійний доступ до інформаційних ресурсів компанії.

Висновки. З огляду на викладене забезпечення безперервності бізнесу є важливим фактором ефективного функціонування фармацевтичної компанії. Разом з тим не всі аспекти цієї проблеми знайшли досить повне вивчення. Зокрема, є необхідність пошуку більш ефективних управлінських рішень з забезпечення безперервності бізнесу, що включають: облік нових викликів і ІТ-загроз, підвищення обізнаності персоналу, сертифікації планів безперервності бізнесу та впровадження системи менеджменту безперервності бізнесу, що дасть можливість відповідати корпоративним вимогам і враховувати специфічні ризики фармацевтичної галузі. Дані тенденції приводять до появи нових підходів в управлінні, пов'язаних з забезпеченням безперервності діяльності ІТ-залежного бізнесу.

Список літератури:

1. Фабрис Ж. Валідація комп'ютеризованих систем в контексті GMP. *Аптека*. 2012. № 30 (851). С. 10–11.
2. Зборовська Т.В. Обґрунтування актуальності впровадження стандарту ISO 22301 у фармацевтичному секторі України. *Управління, економіка та забезпечення якості в фармації*. 2017. № 2 (50). С. 4–10.
3. Борсуковська В.Ю. Борсуковський Ю.В. Безперервність бізнесу: новий тренд або необхідність. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2017. № 2 (20). С. 48–53.
4. СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2016. Лікарські засоби. Належна виробнича практика. Київ, 2016. 358 с.
5. GAMP 5. Good Automated Manufacturing Practice. International Society for Pharmaceutical Engineering. 2011. 196 p.
6. Портянко Т.М., Кучеренко В.С. Особливості управління ризиками при впровадженні комп'ютеризованих систем на фармацевтичних підприємствах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 6. Том 29 (68) Ч. 1. С. 228–333.
7. СТ-Н МОЗУ 42-4.2:2011 (ICH Q9). Лікарські засоби. Управління ризиками для якості. Київ, 2011. 36 с.
8. ISO 31000:2009. Risk management. Principles and guidelines. International Organization for Standardization. 2018. 32 p.

Portianko T.M., Kucherenko V.S. THE ROLE OF THE BUSINESS CONTINUITY PROTECTION PLAN IN THE IMPLEMENTATION OF COMPUTERIZED SYSTEMS AT PHARMACEUTICAL ENTERPRISES

Ensuring business continuity is one of the most important strategic directions for the development of any company. In accordance with the requirements of the documentation regulating the introduction of computerized systems (hereinafter, CP) at pharmaceutical enterprises, ensuring business continuity is due to the need to maintain the stability and stability of CP operation in various conditions of adverse influence of external and internal factors of technogenic and/or natural character on the business processes of the company. Patient safety, product quality and data integrity should not be adversely affected by malfunctions or breakdowns during any CP operation. Business Continuity Management includes disaster recovery, which covers the technical upgrading of the COP and contains the procedures for staff to restore critical IT services. All alarm / emergency operations must be carefully documented and approved. In order to implement the aforementioned, one shall create a document (plan) describing the steps to be taken in the event of a partial or total failure of the CP. The article describes practical approaches to creating a Business Continuity and Disaster Recovery Plan (hereinafter, the Plan), taking into account the specifics and regulatory requirements for pharmaceutical manufacturing. Measures that can range from scheduled hardware reductions to transition to the system with paper information carriers, and the like, are displayed. The article highlights how the Plan defines how companies' business processes continue to function and process data after a malfunction in the CP. Particular attention is given to sections of the Plan, which outline the steps required to restore business processes after a breach and, where appropriate, how the data obtained during a breach, the roles and responsibilities of staff, the process of information transfer, and how to define a scheme for launching the Plan into action. Its necessity is identified and substantiated where, in order to continue the business processes, an interactive input of information is used, as any electronic records or data will be synchronized immediately after the restoration of the CP. The article focuses on contingency planning, including regular testing (trial), evaluating the effectiveness of the Plan to confirm its performance under changing conditions, and its correction.

Key words: threats, emergencies, business processes, patient safety, business continuity plan, computerized system.

УДК 004.412:519.237.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/25>**Приходько С.Б.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Приходько Н.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Смикодуб Т.Г.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ЧОТИРЬОХФАКТОРНА НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ JAVA-ЗАСТОСУНКІВ З ВІДКРИТИМ КОДОМ

Метою роботи є створення множинної нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом на основі багатовимірного нормалізуючого перетворення за значеннями змінних, що можуть бути визначені за діаграмою класів. Чотирьохфакторну нелінійну регресійну модель для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом побудовано на основі нормалізації за допомогою п'ятивимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B негаусівського набору даних: кількості строк коду (LOC); кількості класів (Classes); кількості статичних методів (NOSM); метрики, що характеризує відсутність згуртованості методів (Lack of Cohesion of Methods, LCOM), та кількості викликів унікального методу в класі (the Response for Class, RFC) з 38 застосунків, розташованих на сайті GitHub (<https://github.com>) за допомогою інструменту СК (<https://github.com/tauricioaniche/ck>). Також нормалізацію цього набору даних було здійснено і за допомогою двох одновимірних перетворень: у вигляді десяткового логарифму та перетворення Джонсона для сімейства S_B . Використання п'ятивимірного перетворення порівняно з одновимірними дозволяє врахувати кореляцію між змінними, що призводить до покращення нормалізації даних, яка пов'язана з виконанням статистичної гіпотези щодо відповідності їх розподілу п'ятивимірному розподілу Гаусу, з подальшим підвищенням достовірності відповідного оцінювання. Виконано порівняння побудованої нелінійної моделі з лінійною регресійною моделлю і нелінійними регресійними моделями на основі десяткового логарифму і одновимірного перетворення Джонсона. Нелінійна модель, що побудована, порівняно з іншими регресійними моделями (як лінійними, так і нелінійними) має більші значення множинного коефіцієнту детермінації та відсотка прогнозування на рівні величини відносної похибки, який дорівнює 0,25, менші значення середньої величини відносної похибки та ширини інтервалу передбачення нелінійної регресії. Цей результат може бути пояснений найкращою багатовимірною нормалізацією і тим, що немає підстав відкидати нульову гіпотезу про те, що п'ятивимірний розподіл для нормалізованих даних, який нормалізується за допомогою п'ятивимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B , є таким самим, як і п'ятивимірний нормальний розподіл.

Ключові слова: нелінійна регресійна модель, інтервал передбачення, оцінювання розміру програми, Java-застосунок, нормалізуюче перетворення, негаусівські дані.

Постановка проблеми. Сьогодні найпопулярнішою мовою програмування у світі [1] та серед програмістів в Україні [2] є Java, вперше випущена Sun Microsystems у 1995 році (<https://www.java.com>). Зараз Java використовується практично скрізь – від ноутбуків до центрів обробки даних, ігрових консолей до суперкомп'ютерів, мобільних телефонів до Інтернету.

Задача оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом, як і іншого програмного забезпечення (ПЗ) на ранній стадії розробки, є важливою, оскільки ця інформація використовується для прогнозування трудомісткості створення ПЗ

за допомогою такої відомої моделі, як СОСОМО II [3]. Це потребує відповідних моделей для оцінювання розміру ПЗ, включаючи Java-застосунки з відкритим кодом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Натепер для оцінювання кількості строк коду інформаційних Java-систем з відкритим кодом існують як лінійні, так і нелінійні регресійні рівняння та моделі залежно від трьох метрик концептуальної моделі даних у вигляді діаграми класів [4–7]. В [4; 5] відповідне лінійне рівняння побудовано на основі методів множинного лінійного регресійного аналізу. Але, як відомо, під час

побудови лінійних регресійних моделей необхідно виконання певних умов, зокрема, похибки повинні бути розподілені за нормальним законом, що має місце лише в поодиноких випадках. А це веде до необхідності побудови нелінійних регресійних моделей, у тому числі і для оцінювання розміру ПЗ, та застосування певних методів множинного нелінійного регресійного аналізу [8].

Тому для оцінювання розміру інформаційних Java-систем з відкритим кодом в [7] було запропоновано рівняння нелінійної регресії, а в [6] – нелінійна регресійна модель. Запропоновані нелінійні регресійні рівняння та модель побудовано за допомогою множинного нелінійного регресійного аналізу із застосуванням чотиримірного перетворення Джонсона сім'ї S_B на основі таких же трьох метрик діаграми класів, що і в [4; 5]: загальна кількість класів, загальна кількість зв'язків та середня кількість атрибутів на клас. Але для Java-застосунків з відкритим кодом, що не є інформаційними системами, таких як різноманітні інструменти і фреймворки, регресійні моделі можуть залежати від інших метрик.

Зазвичай для побудови моделей нелінійної регресії використовують одновимірні нормалізуючі перетворення [9–13]. Але їх застосування для побудови нелінійних регресійних моделей не завжди призводить до задовільних результатів прогнозування, насамперед за такими стандартними показниками, як середня величина відносної похибки та відсоток передбачення [6–8]. Також нелінійні регресійні моделі, що побудовані за допомогою одновимірних нормалізуючих перетворень, зазвичай мають більші ширини довірчих інтервалів та інтервалів передбачення. Це призводить до необхідності використання багатовимірних нормалізуючих перетворень під час побудови нелінійних регресійних моделей, у тому числі і для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом.

Постановка завдання. Метою статті є побудова чотирьохфакторної моделі нелінійної регресії та визначення нижньої і верхньої границь її інтервалів передбачення для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом залежно від: кількості класів (Classes); кількості статичних методів (NOSM); метрики, що характеризує відсутність згуртованості методів (LCOM), та кількості викликів унікального методу в класі (RFC) на основі п'ятивимірного нормалізуючого перетворення Джонсона. Це дозволить підвищити достовірність оцінювання залежної змінної нелінійної регресії порівняно з лінійними моделями та нелінійними моделями з використанням одновимірних нормалізуючих перетворень.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для досягнення цілі статті, що сформульована вище, ми скористалися методами, наведеними в [8, с. 100–102]. Згідно з [8, с. 100] спочатку виконується нормалізація багатовимірних негаусових даних за багатовимірним нормалізуючим перетворенням. Для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом були зібрані дані з метрик 38 програм, розташованих на сайті GitHub (<https://github.com>): фактична кількість строк коду (в тисячах рядків коду) Y ; кількість класів (Classes) X_1 ; кількість статичних методів (NOSM) X_2 ; метрика, що характеризує відсутність згуртованості методів (LCOM) X_3 , та кількість викликів унікального методу в класі (RFC) X_4 . Ці дані були отримані за допомогою інструменту СК (<https://github.com/mauricioaniche/ck>) та наведені у табл. 1. Вибір саме цих метрик був зумовлений практичною відсутністю мультиколінеарності між ними. Наявність мультиколінеарності свідчить про те, що в множинній лінійній регресійній моделі два або більше факторів пов'язані між собою або мають високий ступінь кореляції [14].

Наявність або відсутність мультиколінеарності ми визначали за коефіцієнтами впливу дисперсії (VIFs) серед майбутніх факторів у моделі множинної лінійної регресії. Для множинної лінійної регресійної моделі з k -факторами X_i , $i = 1, 2, \dots, k$, VIFs – це діагональні елементи оберненої коваріаційної $k \times k$ матриці [15]. Значення VIFs більше за 10 часто сприймаються як сигнал, що дані мають проблеми з мультиколінеарністю. У разі, якщо значення VIFs знаходяться у межах від 1 до 5, то мультиколінеарності немає. Для X_1 , X_2 , X_3 та X_4 значення VIFs відповідно дорівнюють 4,79, 3,10, 1,12 та 5,63, що свідчить про практичну відсутність мультиколінеарності між цими факторами.

Згідно з [16], п'ятивимірні дані для змінних Y , X_1 , X_2 , X_3 та X_4 , що наведені в табл. 1, мають негаусівський розподіл, оскільки для п'яти застосунків (2, 10, 12, 37 та 39) значення квадрату відстані Махаланобіса MD^2 , які, відповідно, дорівнюють 30,17, 20,21, 34,02, 28,28 та 21,47, є більшими, ніж величина квантіля розподілу χ^2 , що становить 16,75 для рівня значущості 0,005. Значення MD^2 , що є більшими за 16,75, в табл. 1 виділені напівжирним шрифтом. Також про негаусівський розподіл п'ятивимірних даних для змінних Y , X_1 , X_2 , X_3 та X_4 з табл. 1 свідчить оцінка багатовимірного ексцесу β_2 , яка визначалася за [16]. Відомо, що для m -вимірного нормального розподілу $\beta_2 = m(m + 2)$. У нашому випадку $\beta_2 = 35$. Для цих п'ятивимірних даних оцінка β_2 дорівнює

100,77, що майже у 3 рази перевищує теоретичне значення.

Також у табл. 1 наведені значення нормалізованих змінних з метрик Java-застосунків з відкритим кодом, які були отримані за допомогою п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , компоненти якого визначаються, як і в [8]:

$$Z_j = \gamma_j + \eta_j \ln \frac{X_j - \phi_j}{\phi_j + \lambda_j - X_j}, \quad (1)$$

де γ_j, η_j, ϕ_j та λ_j – параметри перетворення Джонсона, $\phi_j < X_j < \phi_j + \lambda_j, j = 1, 2, 3, 4$.

Значення нормалізованої залежної змінної Z_Y також визначається за (1) з тою різницею, що в (1) замість $Z_j, X_j, \gamma_j, \eta_j, \phi_j$ та λ_j потрібно підставити, відповідно, $Z_Y, Y, \gamma_Y, \eta_Y, \lambda_Y$ та λ_Y .

Для даних з табл. 1 оцінки параметрів п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B такі: $\hat{\gamma}_Y = 1,39056, \hat{\gamma}_1 = 1,0380, \hat{\gamma}_2 = 1,18671, \hat{\gamma}_3 = 2,44690, \hat{\gamma}_4 = 1,82065, \hat{\eta}_Y = 0,455264, \hat{\eta}_1 = 0,373337, \hat{\eta}_2 = 0,388760, \hat{\eta}_3 = 0,352541, \hat{\eta}_4 = 0,519554, \hat{\phi}_Y = 0,875, \hat{\phi}_1 = 13,500, \hat{\phi}_2 = 2,500, \hat{\phi}_3 = 137,252, \hat{\phi}_4 = 77,9181, \hat{\lambda}_Y = 868,212, \hat{\lambda}_1 = 4276,548, \hat{\lambda}_2 = 4627,30, \hat{\lambda}_3 = 26483781,6$

Таблиця 1

Дані з метрик Java-застосунків з відкритим кодом

№	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	MD ²	Z _Y	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
1	1,075	22	5	994	217	0,77	-2,42	-1,28	-1,74	-1,20	-1,84
2	114,784	239	1306	9743493	6321	30,17	0,53	-0,04	0,82	2,26	0,16
3	29,468	298	529	15129	2589	0,70	-0,15	0,05	0,39	-0,19	-0,33
4	149,332	1243	1050	273258	19129	0,86	0,67	0,70	0,71	0,84	0,78
5	349,794	1528	1033	1237536	36496	16,05	1,21	0,81	0,70	1,38	1,18
6	75,862	845	361	33312	8862	0,88	0,32	0,51	0,22	0,09	0,34
7	133,992	553	472	272629	17434	1,49	0,61	0,32	0,34	0,84	0,73
8	1,771	14	9	564	156	0,76	-1,74	-2,34	-1,37	-1,44	-2,14
9	9,802	36	90	11729	1342	0,70	-0,69	-0,92	-0,35	-0,28	-0,69
10	262,21	1710	1276	118134	12494	20,21	1,01	0,88	0,81	0,54	0,53
11	111,224	752	848	62203	15890	0,33	0,51	0,45	0,60	0,31	0,67
12	817,049	4256	4553	562576	136233	34,02	2,64	2,84	2,77	1,10	2,72
13	29,148	198	182	37993	2882	0,39	-0,15	-0,12	-0,06	0,14	-0,27
14	196,028	1690	1523	104556	22694	2,99	0,83	0,87	0,91	0,50	0,88
15	52,132	499	286	13735	5423	0,27	0,13	0,27	0,13	-0,22	0,07
16	29,033	201	89	22545	2510	0,45	-0,16	-0,11	-0,35	-0,05	-0,35
17	1,949	15	26	175	292	0,76	-1,66	-1,93	-0,87	-2,30	-1,62
18	11,385	40	6	4388	1729	0,78	-0,61	-0,86	-1,61	-0,63	-0,55
19	3,266	17	16	1001	785	0,81	-1,29	-1,62	-1,08	-1,20	-0,99
20	3,117	19	4	887	436	0,77	-1,32	-1,45	-1,94	-1,25	-1,35
21	1,744	26	3	263	236	0,76	-1,75	-1,14	-2,36	-1,87	-1,77
22	39,118	171	155	8404	2796	0,62	-0,01	-0,18	-0,13	-0,40	-0,29
23	44,566	345	340	20297	7664	0,60	0,05	0,11	0,20	-0,08	0,26
24	30,496	256	157	5590	3320	0,38	-0,13	-0,01	-0,12	-0,55	-0,20
25	198,999	1891	542	279133	28402	4,95	0,84	0,95	0,40	0,85	1,02
26	202,452	1339	310	98554	26446	2,98	0,85	0,74	0,16	0,48	0,98
27	3,441	24	21	556	339	0,73	-1,26	-1,20	-0,96	-1,45	-1,51
28	147,937	748	716	81283	18112	0,90	0,67	0,45	0,53	0,41	0,75
29	242,821	1870	1480	4341969	27904	7,66	0,96	0,94	0,89	1,87	1,01
30	79,187	662	439	25388	8376	0,20	0,34	0,40	0,31	0,00	0,31
31	19,884	234	85	2618	4241	0,86	-0,34	-0,05	-0,37	-0,82	-0,06
32	27,83	357	100	7703	3399	0,57	-0,18	0,13	-0,31	-0,43	-0,18
33	12,079	72	37	12157	1867	0,71	-0,58	-0,56	-0,71	-0,27	-0,51
34	22,274	223	94	9883	3627	0,63	-0,28	-0,07	-0,33	-0,34	-0,15
35	63,609	388	513	75303	7228	0,25	0,23	0,16	0,38	0,38	0,23
36	102,473	247	1270	2042353	9178	3,28	0,47	-0,03	0,81	1,57	0,36
37	131,096	834	3403	189931	10820	28,28	0,60	0,50	1,58	0,71	0,45
38	377,943	3829	1759	195632	48231	21,47	1,27	1,83	1,00	0,72	1,38

і $\hat{\lambda}_4 = 160289,7$.

Далі для нормалізованих даних будемо лінійну регресійну модель

$$Z_y = \hat{Z}_y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2 + \hat{b}_3 Z_3 + \hat{b}_4 Z_4 + \varepsilon, \quad (2)$$

де ε – випадкова величина з розподілом Гаусу, $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$; оцінки параметрів для даних з табл. 1 є такими: $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0,094587$, $\hat{b}_2 = 0,178654$, $\hat{b}_3 = 0,090668$, $\hat{b}_4 = 0,654896$. Оцінки параметрів моделі (2) визначалися за методом найменших квадратів. За даними з табл. 1, сума квадратів відхилень для моделі (2) склала 1,0378.

Потім будемо нелінійну регресійну модель за [8, с. 101]

$$Y = \hat{\phi}_y + \hat{\lambda}_y \left[1 + e^{-(\hat{z}_y + \varepsilon - \hat{\gamma}_y) / \hat{\eta}_y} \right]^{-1}, \quad (3)$$

де відповідні складники визначаються за (2). За даними з табл. 1, сума квадратів відхилень для моделі (3) склала 25 414,8.

Побудована модель (3) була перевірена за множинним коефіцієнтом детермінації R^2 , середньою величиною відносної помилки MMRE і відсотком прогнозованих результатів, для яких величини відносної помилки MRE менші за 0,25, PRED(0,25). Ці показники зазвичай використовуються для оцінювання якості прогнозування за допомогою регресійних моделей і в інженерії програмного забезпечення [17; 18]. Допустимі значення MMRE і PRED(0,25) складають не більше 0,25 і не менше 0,75 відповідно. Допустиме значення R^2 приблизно таке ж, як для PRED(0,25).

Для моделі (3), що була побудована за даними з табл. 1 на основі п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , значення R^2 , MMRE та PRED(0,25) мають, відповідно, такі значення: 0,971, 0,173 та 0,789, що вказує на добру її якість стосовно оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом.

Для порівняння моделі (3) для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом в подальшому було також побудовано лінійну та нелінійну регресійні моделі на основі одновимірного перетворення Джонсона. Для цього ми також використовуємо значення змінних Y , X_1 , X_2 , X_3 та X_4 , що наведені в табл. 1.

Лінійна регресійна модель для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом має вигляд

$$Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_1 + \hat{b}_2 X_2 + \hat{b}_3 X_3 + \hat{b}_4 X_4 + \varepsilon, \quad (4)$$

де оцінки параметрів такі: $\hat{b}_0 = 5,9139$, $\hat{b}_1 = 0,051232$, $\hat{b}_2 = 0,015127$, $\hat{b}_3 = 6,0916 \cdot 10^{-6}$, $\hat{b}_4 = 0,0039244$.

Сума квадратів відхилень для моделі (4) склала 26 204,7, що всього на 3,1% більше за цю суму для моделі (3). Також невелика різниця між значеннями R^2 для моделей (3) і (4): всього 0,1%. Значення двох інших показників лінійної моделі (4) – MMRE і PRED(0,25), що дорівнюють 0,744 і 0,526 відповідно, вказують на незадовільну її якість з оцінками параметрів, що були отримані за значеннями змінних Y , X_1 , X_2 , X_3 та X_4 з табл. 1.

Перевірку нульової гіпотези про нормальність закону розподілу випадкової величини ε для моделі (4) здійснюємо за критерієм Пірсона. Для вибірки значень випадкової величини ε значення χ^2 , яке дорівнює 81,32, більше за $\chi_{кр}^2$, що становить 7,81 для 3 ступенів вільності та 0,05 рівня значущості. Тобто цю гіпотезу про нормальність розподілу випадкової величини ε потрібно відкинути. Це свідчить взагалі про відсутність теоретичного обґрунтування використання моделі лінійної регресії (4) і призводить до необхідності застосування нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом.

Нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом на основі одновимірного перетворення Джонсона сімейства S_B також має вигляд (3), але оцінки параметрів, що отримані за значеннями змінних Y , X_1 , X_2 , X_3 та X_4 з табл. 1, дещо інші: $\hat{\gamma}_y = 1,39056$, $\hat{\gamma}_1 = 1,0380$, $\hat{\gamma}_2 = 1,18671$, $\hat{\gamma}_3 = 1,17761$, $\hat{\gamma}_4 = 1,66557$, $\hat{\eta}_y = 0,455264$, $\hat{\eta}_1 = 0,373337$, $\hat{\eta}_2 = 0,388760$, $\hat{\eta}_3 = 0,209433$, $\hat{\eta}_4 = 0,468450$, $\hat{\phi}_y = 0,875$, $\hat{\phi}_1 = 13,500$, $\hat{\phi}_2 = 2,500$, $\hat{\phi}_3 = 174,50$, $\hat{\phi}_4 = 139,989$, $\hat{\lambda}_y = 868,212$, $\hat{\lambda}_1 = 4276,548$, $\hat{\lambda}_2 = 4627,30$, $\hat{\lambda}_3 = 9743319,0$ і $\hat{\lambda}_4 = 153563,5$. Також інші і оцінки параметрів моделі (2): $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0,153713$, $\hat{b}_2 = 0,228632$, $\hat{b}_3 = 0,0670969$, $\hat{b}_4 = 0,586594$.

Сума квадратів відхилень для моделі (3) з оцінками параметрів, що отримані на основі одновимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , склала 28398,6, що на 11,7% більше за цю суму для моделі (3) з оцінками параметрів, що отримані на основі п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B . Також гірші значення для моделі (3) з оцінками параметрів, що отримані на основі одновимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , мають три інші показники – R^2 , MMRE і PRED(0,25), що дорівнюють 0,968, 0,176 і 0,711 відповідно. Хоча слід зазначити, що значення MMRE і PRED(0,25) значно кращі, ніж у лінійної моделі (4).

Межі інтервалів передбачення нелінійних регресій

№	Одновимірне		П'ятивимірне		№	Одновимірне		П'ятивимірне	
	LB	UB	LB	UB		LB	UB	LB	UB
1	1,20	3,12	1,24	2,99	20	1,52	5,08	1,55	4,57
2	45,99	316,74	41,88	212,74	21	1,13	2,78	1,15	2,57
3	14,75	79,99	13,12	63,11	22	11,42	59,01	10,96	49,27
4	78,51	319,04	91,23	322,20	23	27,24	135,89	28,78	125,71
5	126,11	441,94	162,79	480,73	24	13,18	68,27	12,43	56,43
6	34,58	167,74	36,16	153,74	25	93,53	366,15	114,60	384,17
7	54,64	250,17	68,06	267,52	26	72,33	311,51	88,90	329,42
8	0,98	1,62	1,09	2,09	27	1,78	6,49	1,67	5,17
9	5,39	27,67	5,39	23,72	28	61,97	271,63	71,82	274,32
10	64,20	283,07	66,32	260,91	29	125,62	436,82	154,86	471,30
11	59,02	260,37	66,05	255,55	30	33,39	161,86	34,43	146,74
12	743,90	849,30	748,40	847,83	31	13,04	68,27	12,65	58,63
13	12,75	65,93	12,74	57,90	32	12,83	67,57	12,35	56,64
14	97,62	371,75	107,86	363,15	33	6,23	31,73	6,42	28,24
15	22,21	112,77	21,81	97,25	34	12,59	65,26	12,67	57,00
16	10,12	52,56	10,04	45,71	35	30,23	148,45	32,53	139,25
17	1,34	4,39	1,35	3,91	36	43,17	212,42	51,75	226,62
18	3,52	18,84	3,89	18,04	37	72,18	328,61	72,31	296,22
19	2,34	10,93	2,37	9,49	38	208,17	587,82	232,28	581,96

Для визначення нижньої і верхньої границь інтервалів передбачення нелінійних регресій ми використовували відповідний метод, запропонований у [8, с. 101]. Нижні (LB) і верхні (UB) інтервали передбачення нелінійних регресій для моделі (3), як для одновимірного, так і для п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , наведені в табл. 2.

Для моделі (3) з оцінками параметрів, що були отримані за даними з табл. 1 з 38 Java-застосунків на основі п'ятивимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , ширини інтервалу передбачення нелінійної регресії менші для 32 рядків даних (всі, окрім рядків 5, 7, 8, 26, 29 та 36) порівняно з одновимірним перетворенням Джонсона. Причому різниця у ширині інтервалу передбачення для даних з рядка 2 складає 58%.

Кращі показники оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом за моделлю нелінійної регресії на основі п'ятивимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства S_B можна передусім пояснити кращою багатовимірною нормалізацією, яка перевірялася за відомими критеріями [15]. Так, якщо за критерієм на основі квадрата відстані Махаланобіса гіпотеза про нормальність багатовимірного закону розподілу нормалізованих за

допомогою п'ятивимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства S_B даних для 38 застосунків з табл. 1 приймається для рівня значущості 0,0001, то у разі застосування одновимірного перетворення та без нього – відкидається.

Висновки. Удосконалено чотирьохфакторну модель нелінійної регресії та визначення нижньої і верхньої границь її інтервалів передбачення для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом залежно від кількості класів; кількості статичних методів; метрики, що характеризує відсутність згуртованості методів, та кількості викликів унікального методу в класі на основі п'ятивимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства S_B . Це дозволяє підвищити достовірність оцінювання залежної змінної нелінійної регресії порівняно з використанням одновимірних нормалізуючих перетворень. Модель, що побудовано, порівняно з іншими регресійними моделями має більший відсоток прогнозування, менші середні величини відносної похибки та ширини інтервалу передбачення нелінійної регресії. В майбутньому планується використання інших наборів даних для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Java-застосунків з відкритим кодом.

Список літератури:

1. TIOBE Index for April 2020. URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (дата звернення: 03.04.2020)
2. Рейтинг мов програмування 2019: JavaScript майже зрівнялася з Java, популярність Go знижується URL: <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-jan-2019/> (дата звернення: 03.04.2020)
3. Boehm B.W., Abts C., Brown A.W., Chulani S., Clark B.K., Horowitz E., Madachy R., Reifer D.J., Steece B. Software Cost Estimation with COCOMO II. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 2000. 544 p.
4. Tan H.B.K., Zhao Y., Zhang H. Estimating LOC for information systems from their conceptual data models. *Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering (ICSE '06)*. (May 20-28, 2006, Shanghai, China). Shanghai, 2006. P. 321–330.
5. Tan H.B.K., Zhao Y., Zhang H. Conceptual data model-based software size estimation for information systems. *Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2009. Vol. 19. Issue 2. October 2009. Article No. 4.
6. Prykhodko N.V., Prykhodko S.B. The non-linear regression model to estimate the software size of open source Java-based systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. No. 3 (46). P. 158–166. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-17.
7. Prykhodko S.B., Prykhodko N.V., Mandra A.V. Building the nonlinear regression equations to estimate the software size of Java-based information systems. *Materials of the VII International scientific-practical conference on Information Control Systems and Technologies*. (17th-18th September, 2018, Odessa). Odessa, Astroprint, 2018. P. 222–224.
8. Prykhodko N.V., Prykhodko S.B. Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations. *Electronic modeling*. 2018. Vol. 40. No. 6. P. 101-110. DOI: 10.15407/emodel.40.06.101.
9. Bates D.M., Watts D. G. Nonlinear regression analysis and its applications. New York: John Wiley & Sons, 1988. 384 p.
10. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear regression. New York : John Wiley & Sons, 1989. 768 p.
11. Ryan T.P. Modern regression methods. 2nd Edition. New York : John Wiley & Sons, 2008. 672 p.
12. Drapper N.R., Smith H. Applied regression analysis. New York : John Wiley & Sons, 1998. 736 p.
13. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied multivariate statistical analysis. – Pearson Prentice Hall, 2007. 800 p.
14. Chatterjee S., Price B. Regression analysis by example. New York: John Wiley & Son, 1977. 228 p.
15. Olkin I., Sampson A.R. Multivariate Analysis: Overview. *International encyclopedia of social & behavioral sciences* / N. J. Smelser, P. B. Baltes (eds.) 1st edn. Elsevier, Pergamon, 2001. P. 10240–10247.
16. Mardia K.V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*. 1970. Vol. 57. P. 519–530. DOI: 10.1093/biomet/57.3.519.
17. Foss T., Stensrud E., Kitchenham B., Myrtveit I. A simulation study of the model evaluation criterion MMRE. *IEEE Transactions on software engineering*. 2003. 11(29). P. 985–995.
18. Port D., Korte M. Comparative studies of the model evaluation criterions MMRE and PRED in software cost estimation research. *Proceedings of the 2nd ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*. ACM, New York, 2008. P. 51–60.

Prykhodko S.B., Prykhodko N.V., Smykodub T.G. FOUR-FACTOR NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SIZE OF OPEN SOURCE JAVA-BASED APPLICATIONS

The goal of the work is the creation of the multiple non-linear regression model for estimating the size of open source Java-based applications based on the multivariate normalizing transformation. A four-factor non-linear regression model to estimate the size of open source Java-based applications is constructed on the basis of the Johnson five-variate normalizing transformation for S_B family of the non-Gaussian data set from 38 applications hosted on GitHub (<https://github.com>). The data set was obtained using the CK tool (<https://github.com/mauricioaniche/ck>). The model is built around the metrics (variables) of class diagram: number of classes (Classes), number of static methods (NOSM), a measure of the number of response abilities of classes (Lack of Cohesion of Methods, LCOM), number of unique method invocations in a classes (the Response for Class, RFC). Comparison of the constructed model with the linear model and non-linear regression model based on the Johnson univariate transformation has been performed. In comparison with other linear regression models both linear and non-linear models based on the univariate normalizing transformations, constructed model has larger values of multiple coefficient of determination and the percentage of prediction at the level of magnitude of relative error, which equals 0.25, smaller values of the mean magnitude of relative error and width of the prediction intervals of non-linear regression. This may be explained best multivariate normalization and the fact that there is no reason to reject the null hypothesis that the four-variate distribution for normalized data, which normalized by the Johnson five-variate transformation for S_B family, is the same as the four-variate normal distribution. The practical significance of obtained results is that the software realizing the constructed model is developed in the sci-language for Scilab. The experimental results allow to recommend the constructed model for use in practice. Prospects for further research may include the application of other multivariate normalizing transformations and data sets to construct the multiple non-linear regression model for estimating the size of open source Java-based applications.

Key words: nonlinear regression model, prediction interval, software size estimation, Java application, normalizing transformation, non-Gaussian data.

Романюк А.Н.

Винницький національний технічний університет

Вяткин С.И.

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

Войтко В.В.

Винницький національний технічний університет

Романюк О.В.

Винницький національний технічний університет

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Під час візуалізації складних сцен необхідні детальні 3D моделі, щоб надати користувачам відчуття занурення в навколишнє середовище. Традиційно ці моделі будуються з використанням засобів автоматизованого проектування для визначення геометрії та властивостей матеріалу. Але створення детальних моделей забирає багато часу, і також важко реалізувати відтворення всіх геометричних і фотометричних особливостей реального світу сцени. За допомогою комп'ютерного зору намагаються вирішити цю проблему шляхом вилучення геометрії і фотограмметрії із зображень реального світу сцени. Проте ці моделі все ще обмежені кількістю деталей під час відновлення сцени. Візуалізація на основі зображень генерує нові подання шляхом перерахунку набору образів навколишнього середовища без орієнтування на явні геометричні моделі. Відомі методи обмежують розмір і форму навколишнього середовища. У цій роботі визначено параметризацію чотирирівимірної пленоптичної функції, яка підходить для відбору проб і реконструкції довільних форм. Візуалізація на основі зображень базується на реконструкції безперервного подання пленоптичної функції, що складається з набору зразків дискретного зображення. Запропоновано простий і швидкий метод захоплення складних середовищ. Реалізований автоматичний алгоритм реконструкції пленоптичної функції. Перевага запропонованого підходу полягає в легкості захоплення навколишнього середовища, автоматизованій обробці даних, масштабованості в великих середовищах, підтримці довільно сформованих середовищ. Крім того, в запропонованому методі, порівняно з наявними методами, час обчислень і вимоги до пам'яті в кожному циклі зображення не залежать від складності моделі. З відповідною попередньою обробкою також можна виконувати реконструкцію для складних середовищ. Оскільки цикли зображення можуть бути довільної форми, можна створити середовища довільної форми. Вдалося отримати параметризацію 4D пленоптичної функції у вільному просторі. Пленоптична функція важлива для використання в області комп'ютерного зору, щоб отримати зображення сцени з будь-якої можливої позиції перегляду під будь-яким кутом огляду в будь-який момент часу.

Ключові слова: віртуальне середовище, пленоптична функція, рендеринг на основі зображень, візуалізація складних сцен, комп'ютерний зір.

Постановка проблеми. Приложения компьютерной графики, такие как виртуальная реальность, пошаговая демонстрация процедуры процесса или явления, пошаговый разбор, сквозной контроль, проход камеры при съёмке теле- или кинофильмов, показ изнутри и перемещение внутри трёхмерных объектов в компьютерной графике и компьютерных играх и так далее требуют детальных 3D-моделей их окружения. Традиционно такими средами являются созданные с использованием систем автоматизированного

проектирования задания геометрии и свойств материалов. Используя модель освещения, окружающая среда может быть представлена с любой точки зрения. Однако обычные методы моделирования, как правило, отнимают много времени и их не хватает для воссоздания подробной геометрии и особенностей световых эффектов, встречающихся в большинстве реальных объектов сцены. Фотографии реальных сцен могут помочь восстановить геометрические [1] и фотометрические свойства [2; 3]. Компьютерное зрение применяется

для создания моделей реального мира с помощью автоматического получения геометрии и фотограмметрии из изображения объектов реального мира. Эти методы основаны на стерео согласовании, которое часто зашумлено и имеет проблемы с надежностью сопоставления достаточного количества объектов при создании детализированных моделей сложных сцен. Поэтому актуальной является задача разработки новых методов и подходов формирования изображений в компьютерном зрении и графике.

Постановка задания. Цель работы – упрощение методов визуализации изображений с использованием технологии захвата сложных сред, базирующейся на автоматическом алгоритме реконструкции пленоптической функции и рендеринге изображений, что позволяет генерировать новые представления путем пересчета набора образов окружающей среды без использования явных геометрических моделей.

Объектом исследования является процесс визуализации изображений.

Предмет исследования – метод захвата сложных сред с использованием возможности реконструкции пленоптической функции.

Изложение основного материала исследования. Рендеринг на основе изображений создает новые виды окружения непосредственно из набора существующих образов, путем пересчета изображений для создания нового представления, избегая необходимости в явной геометрической модели. Параметризация луча в трехмерном пространстве задается положением (x, y, z) и направлением (θ, φ) . Излучение вдоль таких лучей в трехмерном пространстве называется пленоптической функцией [4]. Пленоптическая функция освещения является идеальной функцией, используемой в области компьютерного зрения, чтобы получить изображение сцены из любой возможной позиции просмотра под любым углом обзора в любой момент времени. Она фактически никогда не используется на практике в вычислительном отношении, но концептуально полезна для понимания других концепций в компьютерном зрении и графике [5].

Целью визуализации на основе изображений является реконструкция непрерывного представления пленоптической функции из набора образцов дискретного изображения [6]. На практике все методы являются подмножеством полной семимерной пленоптической функции. Ограничиваясь статическими сценами, снятыми на дискретных длинах волн (например, красный,

зеленый, синий), можно уменьшить семимерную пленоптическую функцию до пятимерной [6]. Для этого используют изображения, дополненные значениями глубины при реконструкции пятимерной пленоптической функции (5D). Применяется эффективная операция деформации изображения, которая использует эталонное изображение для создания изображений для небольшой близлежащей области просмотра. Для реальных сред вычисляется глубина путем установления характерных соответствий между двумя цилиндрическими проекциями окружающей среды, захваченной с небольшой базовой линии. Однако большие окружающие среды требуют выборки большого количества изображений из близко расположенных объектов с известных точек зрения. Для свободных пространств можно еще больше уменьшить пленоптическую функцию до четырехмерного пространства (4D). Световое поле [7] и люмиграф [8] захватывают большое количество изображений с известных ракурсов и создают базу данных 4D световых лучей. Световое поле представляет собой вектор-функцию, которая описывает количество света, проходящего в каждом направлении через каждую точку пространства. Световое поле и люмиграф можно было бы объединить вместе в большие модели, но они будут ограничены регулярными областями, и это займет много времени. Полная 5D пленоптическая функция может, в теории, реконструировать большие, сложные окружающие среды. Однако представление 5D функций требует восстановления глубины, что трудно сделать точно и надежно для сложных сцен.

Необходимо разработать метод реконструкции 4D пленоптической функции для наблюдателя, движущегося в открытых пространствах в пределах большой и сложной окружающей среды при ограничении движения камеры в плоскости на уровне глаз. Для этого будем снимать образы окружающей среды, перемещая видеоканеру по нескольким путям, образуя нерегулярную сетку. Пересекаем записанные пути изображения и сшиваем вместе простые, замкнутые циклы изображения. Во время выполнения программы будут генерироваться произвольные ракурсы внутри каждого цикла изображений с помощью окружающих образов. Наблюдатель также сможет свободно перемещаться от одного объекта к другому. Таким образом, имея тайловую структуру с циклами изображения, сможем захватить и реконструировать окружающее пространство произвольного размера и формы с использованием

приблизительно постоянного размера памяти. Преимущества предлагаемого подхода заключаются в следующем:

- легкость захвата: будут захватываться сложные окружающие среды за несколько минут;
- автоматизированная обработка: вся обработка предполагается автоматической, за исключением оценки положения камеры, которая требует минимального вмешательства пользователя при инициализации;
- масштабируемость: метод сможет масштабироваться в больших средах. Реконструкция и алгоритм интерактивного отображения требуют только четко определенного локального подмножества захваченных данных;
- поддержка произвольно сформированных сред: так как циклы изображения могут быть произвольной формы, можно создать среды произвольной формы.

Описание метода. Параметризация. Осуществим параметризацию 4D пленоптической функции в свободном пространстве. Одна из возможностей заключается в параметризации всех потенциальных световых лучей, с помощью пересечения двух перпендикулярных плоскостей: произвольной горизонтальной плоскости формы, которая представляет все позиции наблюдателя и линейчатой поверхности, созданной с помощью заматающей вертикальной линии вокруг периметра открытого пространства, которое представляет собой область просмотра.

Параметризуются лучи света с помощью их пересечения с плоскостью наблюдателя (x, y) и с линейчатой поверхностью (u, v), создающей 4D пленоптическую функцию (x, y, u, v). Исходим из предположения, что взгляд наблюдателя удерживается приблизительно горизонтально, ограничиваем вертикальное поле зрения и игнорируем направления просмотра вверх и прямо вниз. Для того чтобы реконструировать непрерывное представление четырехмерной пленоптической функции, необходимо идеально выбрать все открытое пространство очень плотно. Однако это не практично, чтобы выбрать плоскость наблюдателя плотно.

В связи с этим, выберем плоскость наблюдателя, используя нерегулярную сетку всенаправленных последовательностей изображений. Каждая последовательность изображений – это 3D пленоптическая функция. Сетка адаптирована к размеру, форме и сложности окружающей среды. Пересекаем пути записанных последовательностей изображений и формируем циклы изображений в

плоскости наблюдателя. Для каждого закрытого цикла используем когерентность цикла изображения и искривление пикселей от границы цикла на реконструированный ракурс для произвольных точек зрения внутри цикла. Реконструкция также обеспечивает плавный визуальный переход, когда наблюдатель движется от одного цикла к следующему.

Предлагаемый подход можно рассматривать как обобщение шивки смежных пленоптических функций. В данном методе устраняются ограничения, связанные с положением камеры в параллельных плоскостях, например, в световом поле [7].

Цикл. Учитывая набор циклов изображения, цель алгоритма реконструкции заключается в создании новых плоских представлений об окружающей среде из произвольных точек зрения внутри цикла. Реконструируется новый ракурс путем объединения пикселей из всенаправленных изображений, содержащихся в ракурсе на уровне глаз (Forward-looking view frustum) с пикселями во всенаправленных изображениях, содержащихся в обратном взгляде (Reverse-looking frustum). Для ракурса внутри цикла проводим несколько линий сегментов через точку зрения, которые пересекают окружающий цикл (рис. 1). В каждом пересечении извлекаем из всенаправленных изображений радиальные линии пикселей, которые соответствуют направлению взгляда. Конечное реконструируемое изображение создается с помощью деформации (ворпинга – warping) и комбинирования извлеченных пикселей.

Строится новый образ сектор за сектором. На рисунке 1 показан процесс реконструкции среднего сектора для образца изображения (Sample image). Отрезок линии, соответствующий направлению обзора среднего сектора, пересекает окружающее пространство. Цикл изображения образуется, по крайней мере, в двух местах. Для невыпуклых циклов может быть больше двух пересечений. В таких случаях используем два ближайших к наблюдателю пересечения. Всенаправленные изображения, полученные в этих точках пересечения, – это пример среды вне цикла в том же направлении просмотра, но от двух различных центров проекции. Камера производит выборку сектора при определенном направлении просмотра с помощью радиальной линии пикселей. В сторону от вертикали дисклюзии (ситуация, когда ранее закрытый объект становится видимым), особенности окружающей среды, отобранные радиальной линией пары отличаются только радиальным

смещением. Если точка зрения совмещена с одним из центров проекции, то новый сектор – это плоская репроекция из этой радиальной линии. Но для того, чтобы реконструировать сектор для точки обзора в любом месте вдоль направления просмотра, необходимо установить отображение между радиальными линиями в двух всенаправленных изображениях. Используется это отображение для того, чтобы исказить две радиальные линии к плоской репроекции для текущей точки зрения и сместить их вместе.

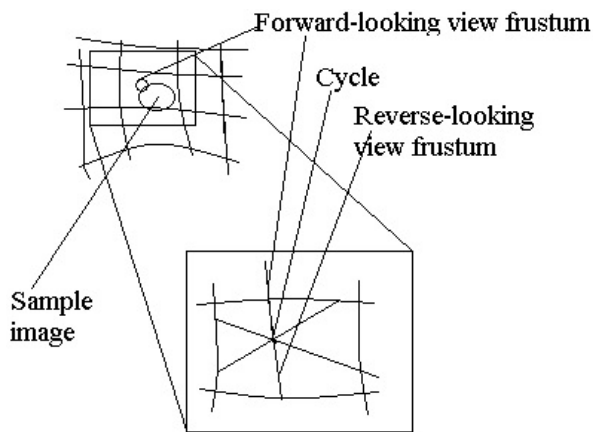


Рис. 1. Цикл

Чтобы вычислить положение камеры, разработан алгоритм оценки для калибровки камеры. В двух углах отслеживаемой области помещаются шесть, оснащенные маленькими яркими лампочками, и измеряется расстояние между шестами. Калиброванная камера удерживается на уровне фиксированной высоты, параллельно плоскости пола. Перед записью пользователь инициализирует оценку положения с помощью идентификации проекций лампочек в первом отсчете изображения. Затем, по мере движения камеры, алгоритм автоматически отслеживает лампочки и, используя триангуляцию, вычисляет положение камеры (x , y) и ориентацию (w) со средней ошибкой положения 0,5% во внутреннем пространстве комнаты. Для точки зрения внутри цикла изображения (рис. 1, 2), проводим несколько отрезков линии через точку зрения, которая пересекает окружающий цикл. На каждом перекрестке извлекаем из изображений радиальные линии пикселей, соответствующих направлению визирования. Окончательное реконструированное изображение создается путем деформации и объединения извлеченных пикселей. Поскольку известно, что камера движется по гладкой

траектории с приблизительно постоянной скоростью и частотой кадров захвата, компенсируем шум в оценке положения путем подгонки B-сплайнов к позициям камеры вдоль записанных траекторий. Далее вычисляется локальная средняя скорость трансляции и репроекции положения камеры на сплайновой кривой.



Рис. 2. Внутреннее пространство комнаты

Реконструкция. Как только изображения будут захвачены над сеткой в окружающем пространстве, создаются циклы изображения (рис. 1). График представляет собой сетку с путями пересечения в виде вершин и отрезков пути между двумя точками пересечения в виде ребер. Рекурсивно пересекаем график для определения всех циклов изображения. Для вычисления пересечений путей используется объектно-ориентированный ограничивающий параллелепипед. Путь состоит из последовательности следующих элементов: изображения, которые примерно равномерно распределены вдоль пути. Вычисляется дерево объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда для каждого пути. Разделив его на два сегмента, окружающие каждый сегмент ориентированной границей параллелепипеда, продолжается процесс до тех пор, пока не появится небольшое количество изображений, остающееся в каждом узле. Чтобы найти пути пересечения, пересекаем путь дерева объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда сверху вниз и затем находим пересекающиеся отрезки линии в узлах листьев дерева по перечислению.

Новый ракурс с произвольной точки зрения внутри цикла изображений состоит из реконструкции сектора за сектором пикселей всенаправленных изображений. Горизонтальная и вертикальная оси графика представляют параметрическое положение соответствующих объектов изображения. Деформируем соответствующие сегменты каждой радиальной линии до сектора в реконструированном изображении. Необходимо рассмотреть геометрию камеры при деформировании радиальных отрезков линии. Для всенаправленных изображений определяем проекционные положения p_1 и p_2 образца функции в секторе изображения. Вычисляем положение сектора изображения p_0 объекта для виртуального наблюдателя, используя подобные треугольники. Следующее выражение вычисляет p_0 , учитывая p_1 , p_2 и параметрическое положение (a) в зависимости от расстояния d между секторами всенаправленных изображений вдоль направления визирования:

$$p_0 = \frac{p_2}{\left(a \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) + 1 \right)} \quad (1)$$

Используя прямое отображение, совместимое с упорядочением пикселей радиальной линии [6], устраняем необходимость явно адресовать порядок видимости. Поскольку пиксели на изображении позади точки зрения, как правило, растягиваются во время преобразования, отображаем пиксели, используя фиксированный размер сплатов [9; 10]. В нашем случае сплаты на самом деле являются короткими отрезками линий. Чтобы заполнить вертикальные расхождения, просто используем более длинные, чем ожидалось, сплаты. Это равносильно заполнению разрывов с последним образцом фонового объекта. Уменьшаем количество оставшихся артефактов реконструкции путем фильтрации конечного изображения, используя Гауссово ядро свертки 3×3 . Как правило, направление просмотра не будет пересекать цикл изображения точно в центре проекции всенаправленного изображения. В этом случае извлекаем две радиальные линии, параллельные направлению вида, смешиваем их и продолжаем реконструкцию.

Так как может быть большое смещение между всенаправленными изображениями на противоположных сторонах цикла, то трудно достоверно идентифицировать соответствующие признаки в радиальном направлении линии

только из двух линий. Вместо этого полагаемся на временной когерентности всего цикла изображения для определения требуемых параметров. Выбираем произвольное всенаправленное изображение из цикла и используем метод обработки изображений для идентификации набора особенностей (например, точки, углы). Затем используем алгоритм отслеживания объектов из исходного изображения вокруг цикла, сохраняя только функции, которые успешно отслеживают все пути вокруг и имеют похожие начальные и конечные позиции изображения.

Чтобы получить положение объекта для конкретной радиальной линии, триангулируем отслеживаемые объекты на каждом изображении и используем следующие параметры: точки пересечения между триангулированными ребрами и радиальными линиями в качестве точек объекта для отображения. В криволинейной камере проецируемые прямые линии изгибаются. Для параболического зеркала эти кривые представляют собой дуги окружностей. Таким образом, для каждого изображения вычисляем триангуляцию Делоне отслеживаемых объектов и заменяем прямые ребра треугольников дугами. Каждая дуга обладает тем свойством, что она проходит через две вершины исходного ребра и пересекает зеркальную границу в двух точках на 180 градусов друг от друга.

Чтобы получить выражение для окружности, содержащей дугу, необходимо преобразовать две вершины исходного ребра триангуляции к каноническому пространству. В этом пространстве захваченное изображение имеет радиус равным единице и вершины повернуты так, что одна из них лежит вдоль оси X. Вершины представляются в виде $(x_0, 0)$ и (x_1, y_1) . Следующие выражения вычисляют окружность (c_x, c_y) радиуса r , проходящей через две вершины и пересекающей зеркальную границу, разделенную на 180 градусов:

$$c_x = \frac{x_0^2 - 1}{2x_0} \quad (2)$$

$$c_y = \frac{x_1 - x_0 + x_0(x_1^2 + y_1^2) - x_0^2 x_1}{(2x_0 y_1)} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{1 + c_x^2 + c_y^2} \quad (4)$$

Пересекаем ребро дуги с радиальной линией, решая квадратичную задачу уравнения. Представляем радиальную линию лучом от начала координат через (t_x, t_y) и до края дуги на границе

окружности (c_x, c_y, r) . Точки пересечения – (t_x, t_y) , где t удовлетворяет уравнению:

$$(r_x^2 + r_y^2)t^2 - 2(c_x r_x + c_y r_y)t + (c_x^2 + c_y^2 - r^2) = 0 \quad (5)$$

На рис. 3 показана реконструкция для нескольких точек обзора посередине циклов изображения, где правильная реконструкция наиболее трудна.

Выводы. Представлен метод реконструкции на основе изображений виртуальной прогулки по 3D средам для наблюдателя, движущегося через свободное пространство в плоскости. Показана

параметризация 4D пленоптической функции. Рассмотрен быстрый и легкий захват образцов окружающей среды и автоматическая реконструкция четырехмерной пленоптической функции.

Эксперименты показывают, что параметризация 4D пленоптической функции эффективна для широкого круга применений. В сравнении с другими методами, время вычислений и требования к памяти в каждом цикле изображения не зависят от сложности модели. С соответствующей предварительной обработкой можно выполнять реконструкцию для сложных сред.



Рис. 3. Ракурсы посередине циклов изображения

Список літератури:

1. P. Debevec, C. Taylor, J. Malik. Modeling and rendering architecture from photographs. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 11–20.
2. Y. Yu, J. Malik. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs, *Computer Graphics, SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 207–218.
3. Вяткин С.И., Романюк А.Н. Метод спектральной обработки геометрии трехмерных объектов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». Всеукраїнський науковий збірник*. 2019. № 1 (28)-2(29). С. 19–26. DOI:10.31474/1996-1588-2019-1-28-19-26.
4. Jin-Xiang Chai, Xin Tong, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum. Plenoptic Sampling. *SIGGRAPH'2000*, New Orleans, LA, USA, July 23–28, 2000, P. 307–318.
5. Tien-Tsin Wong, Chi-Wing Fu, Pheng-Arm Heng, Chi-Sing Leung. The Plenoptic Illumination Function. *IEEE Transactions on Multimedia (Volume: 4, Issue: 3, Sep 2002)*, P. 361–371. DOI: 10.1109/TMM.2002.802835.
6. L. McMillan, G. Bishop. Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System, *Computer Graphics SIGGRAPH'95*, Los Angeles California USA August, 1995, P. 39–46.
7. M. Levoy, P. Hanrahan. Light Field Rendering. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 31–42.
8. S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. F. Cohen. The Lumigraph. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 43–54.
9. Vyatkin S.I. / Вяткин С.И., Romanyuk A.N. / Романюк А.Н., Necheporyk M.L. / Нечипорук Н.Л., Roptanov V.I. / Роптанов В.И. The method of splatting the filter-based weighted average. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien. Issue 6. Part 1*, December 2018, Published by: Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany. Technical sciences P. 44 -49. DOI: 10.30890/2567-5273.2018-06-01-065.
10. Вяткин С.И., Романюк А.Н. Адаптированный метод сплаттинга для медицинских приложений. *Збірник доповідей. Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень»*. Суми-Вінниця. 2019. С. 33–40. URL: https://drive.google.com/file/d/1e06nMRb0hIz1FX6_cBD7CKWafknSmj_a/view?usp=sharing.

Romanyuk O.N., Vyatkin S.I., Voitko V.V., Romanyuk O. V. RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SCENES BASED ON IMAGES

When visualizing complex scenes, detailed 3D models are needed to give users a sense of immersion in the environment. Traditionally, these models are built using computer-aided design to determine the geometry and properties of the material. But creating detailed models is time consuming, and it is also difficult to do to reproduce all the geometric and photometric features of the real world scene. Using computer vision, they are trying to solve this problem by extracting geometry and photogrammetry from images of the real world of the scene. However, these models are still limited in detail when restoring the scene. Image-based rendering generates new views by recalculating a set of environmental images without a basis for explicit geometric models. Known methods limit the size and shape of the environment. In this work, the parametrization of a four-dimensional plenoptic function is determined, which is suitable for sampling and reconstruction of arbitrary shapes. Image-based visualization is based on the reconstruction of a continuous representation of the plenoptic function, consisting of a set of samples of a discrete image. A simple and fast method for capturing complex environments is proposed. An automatic algorithm for reconstructing the plenoptic function is implemented. The advantage of the proposed approach lies in the ease of capturing the environment, automated data processing, scalability in large environments, and support for arbitrarily formed environments. In addition, in the proposed method, in comparison with existing methods, the computation time and memory requirements in each image cycle do not depend on the complexity of the model. With appropriate pretreatment, reconstruction can also be carried out for complex environments. Because image loops can be arbitrary shapes, you can create environments of arbitrary shape. It was possible to obtain a parameterization of the 4D plenoptic function in free space. The plenoptic function is important for use in the field of computer vision in order to obtain an image of a scene from any possible viewing position at any viewing angle at any time.

Key words: virtual environment, plenoptic function, image-based rendering, visualization of complex scenes, computer vision.

Сабодашко Д.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Хома Ю.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Хома В.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВОЇ СТІЙКОСТІ СИГНАЛУ ЕКГ ЯК БІОМЕТРИЧНОГО МАРКЕРА В СИСТЕМІ АВТЕНТИФІКАЦІЇ

Унікальність електрокардіограми для кожного індивіда доведена багатьма дослідженнями. На цей час вирішено проблеми, пов'язані із особливістю роботи біометричних систем – простий відбір електричних потенціалів, ефективні методи кондиціонування ЕКГ-сигналу, надійні алгоритми інтелектуального аналізу прихованих індивідуальних характеристик електрокардіограми. Проте залишилося без відповіді питання довгочасової стабільності інформативних параметрів сигналів ЕКГ, що важливо для роботи біометричних систем автентифікації у реальних застосуваннях. Тому метою цієї роботи було – дослідити стійкість електрокардіограми як унікального біометричного маркера для автентифікації суб'єктів упродовж довгих інтервалів часу тривалістю місяці-роки. У статті представлено власну реалізацію системи біометричної автентифікації користувачів за їх електрокардіограмами, яку було використано для реєстрації ЕКГ-записів, їх комп'ютерного опрацювання, тренування і тестування моделей нейромережових класифікаторів. Верифікація роботи системи біометричної автентифікації здійснювалася на відкритій для доступу базі даних LBDS (Lviv Biometric Data Set), у якій зібрано 1 809 унікальних записів електрокардіограм тривалістю від 10 до 20 секунд. Записи здійснювалися впродовж двох років і належать 115 різним особам. Описано методику проведення досліджень, яка передбачала проведення двох експериментів. Перший експеримент націлений на верифікацію роботи системи біометричної автентифікації після одного-двох місяців, що минули з часу навчання нейромережового класифікатора, а другий – після одного-двох років. Обидва експерименти показали досить високі результати: точність автентифікації користувачів за записами їх ЕКГ-сигналів, зробленими через місяць та через два роки, утримується практично на одному рівні – відповідно 95,61% і 94,97%. Це дає підстави для висновку, що електрокардіограма є стабільним у часі біометричним маркером, який можна застосовувати у реальних системах біометричної автентифікації.

Ключові слова: біометрична система, ЕКГ-записи, нейромережовий класифікатор, часова стабільність біометричних ознак ЕКГ-сигналу, точність автентифікації.

Постановка проблеми. Біоінформатика – це галузь науки, що займається дослідженням, розробкою і застосуванням обчислювальних методів і засобів для аналізу та інтерпретації біологічних, фізіологічних, медичних і поведінкових даних людини та інших біологічних об'єктів. Традиційно розрізняють такі напрями у біоінформатиці, як опрацювання біосигналів, розпізнавання медичних зображень, комп'ютерна геноміка і аналіз електронних медичних записів [1; 2]. Кожний напрям має свою специфіку, але спільним є видобування інформації із набору відібраних із об'єкта даних. Наприклад, у випадку біосигналів як змінного у часі процесу дані – це часові ряди, а у геноміці – це просторова зміна параметрів нуклеотидної послідовності, що визначає генетичний код.

У другій половині ХХ сторіччя спочатку електроніка, а згодом і комп'ютери стали застосовуватися для відбору і аналізу біомедичних сигналів. Комп'ютеризовані діагностичні системи вже давно стали надбанням не лише великих медичних закладів, але і звичайних поліклінік, де використовуються для цілей медичної діагностики пацієнтів.

Розвиток інформаційних технологій, удосконалення і здешевлення обчислювальної техніки, а, з іншого боку, нагромадження великого обсягу оцифрованих біомедичних даних спричинили суттєве розширення сфер застосування біоінформатики. На цей час шляхом опрацювання біосигналів можна розв'язувати різні задачі у «немедичних» сферах, наприклад, виконувати

біометричну автентифікацію користувачів інформаційних систем на основі електрокардіограм. З погляду практичного застосування сигналу ЕКГ як біометричного маркера важливо дослідити стійкість у часі тих інформативних ознак, за якими система приймає рішення про надання чи відмову у доступі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сигнали ЕКГ належать до найбільш відомих біосигналів і є носіями не лише цінної діагностичної інформації, але також і біометричної. В останні роки було підтверджено, що електрокардіограма (ЕКГ) є надійним біометричним маркером [3–5]. Важливо зазначити, що анатомічні відмінності серця між індивідуумами позначаються на формі сигналу ЕЕГ, роблячи його своєрідним індивідуальним почерком для людей, навіть серед близнюків і двійнят [6].

Проте принципи побудови і опрацювання сигналів ЕКГ, які застосовуються у сучасних цифрових електрокардіографах, не можна просто перенести на біометричні системи. Передовсім істотно відрізняються умови використання цих систем. Формування електрокардіографічних записів у медичній діагностиці (переважно у вигляді 12 відведень) відбувається в комфортних умовах, коли пацієнт розслаблено лежить на кушетці, а тривалість записів зазвичай не обмежена. У системах біометричної автентифікації застосовується простий відбір біопотенціалів, найчастіше із пальців рук [7; 8].

Такі зручні з погляду практичного застосування способи відбору біопотенціалів супроводжуються значно інтенсивнішими спотвореннями ЕКГ-записів, які мають різне походження, структуру і частотний діапазон. Зростає деструктивний вплив дрейфу ізоляції, наведення мережі живлення, електропотенціалів від роботи м'язів (інтерференція електроміографічного сигналу). Для їх придушення найчастіше застосовують методи цифрової фільтрації [9], хвилькову декомпозицію із відбором релевантних компонент [10]. Проте навіть у знешумленому сигналі можуть спостерігатися викиди (англ. – outliers), тобто аномальні відхилення вибірок у записі ЕКГ, наявність яких знижує достовірність результатів біометричної автентифікації.

Поширеним способом боротьби з викидами, що застосовувався багатьма дослідниками, було їх виявлення за певним правилом і подальше відкидання цілого сегменту, який містить аномальні відхилення окремих чи серії вибірок [11; 12].

Проте у застосуваннях біометрики тривалість записів є обмеженою і складає зазвичай до десяти серцевих циклів (сегментів). Тому відкидання сегментів з аномальними вибірками зменшує обсяг даних, які надходять на класифікатор системи, що теж негативно позначається на точності автентифікації. Для вирішення цієї суперечливості в роботах [14; 15] запропоновано не відкидати, а коригувати пошкоджені сегменти. Реалізація такого підходу дає змогу зберегти необхідний для надійної класифікації об'єктів обсяг вхідних даних, без потреби збільшення тривалості відбору ЕКГ.

Ще однією проблемою, важливою для біометричних застосувань, є забезпечення інваріантності до змін серцевого ритму (частоти серцевих скорочень) [16–18]. Переважне число досліджень спирається на бази даних ЕКГ сигналів, записаних упродовж одного сеансу, тому серцевий ритм для кожного суб'єкта має певне значення, яке класифікатор системи на етапі навчання зараховує як одну із інформативних ознак. Проте у роботі реальної системи неминуче виникатимуть ситуації, коли законний користувач одержить відмову у доступі через розбіжність значень частоти серцевих скорочень у моменти реєстрації (навчання моделі класифікатора) і запиту на автентифікацію (робочий режим класифікатора). Як показано у роботі [19], застосування часової нормалізації ЕКГ-сегментів в усіх записах є ефективним інструментом забезпечення інваріантності системи автентифікації до зміни серцевого ритму.

На шляху запровадження у практику систем біометричної автентифікації на основі ЕКГ важливо дослідити стабільність основних дискримінаційних ознак на довгих проміжках часу (місяці-роки), за якими класифікатор приймає рішення про надання чи відмову у доступі. Аналіз літературних джерел показав на відсутність публікацій із результатами подібних досліджень.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження часової стабільності ЕКГ-сигналів на довготривалих проміжках часу, а також оцінювання ступеня впливу варіативності інформаційних ознак електрокардіограми на точність автентифікації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опис імплементації системи біометричної автентифікації. Для виконання досліджень автори розробили власний варіант трирівневої системи біометричної автентифікації за ЕКГ (рис. 1).

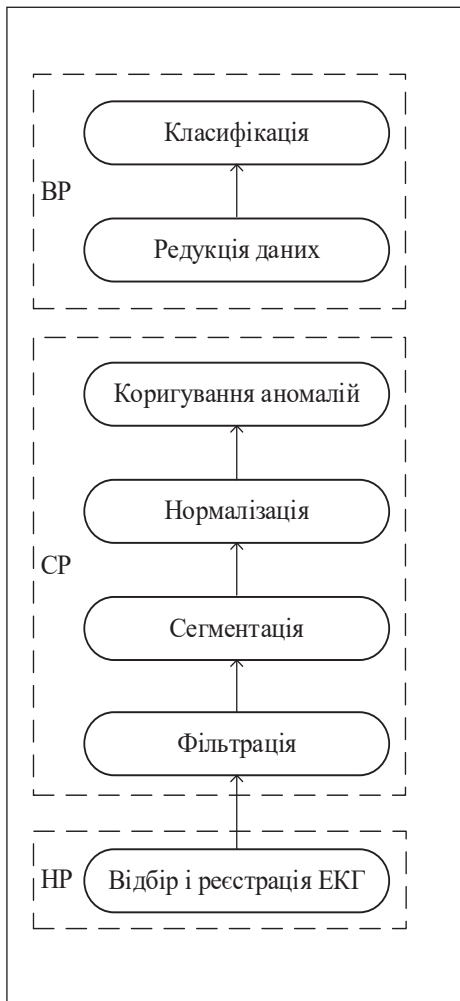


Рис. 1. Структурна схема біометричної системи автентифікації на основі ЕКГ-сигналу

На нижньому системному рівні (НР) для відбору і реєстрації електрокардіограм застосовано просту і доступну вимірювально-обчислювальну систему на базі таких апаратних засобів, як e-Health Sensor Platform V2.0 (рис. 2,а) та Arduino Uno (рис. 2,б), із відповідним програмним забезпеченням на мові Python. Для формування сигналу ЕКГ здійснювався відбір електричних потенціалів із пальців правої та лівої руки трьома електродами (рис. 2, в).

Цей спосіб реєстрації електрокардіограми за термінологією медичної діагностики відповідає першому стандартному відведенню (I-lead).

До основних компонент апаратної обчислювальної платформи Arduino належать плата мікроконтролера з елементами вводу / виводу та середовище розробки Arduino IDE. Платформа Arduino може використовуватися як для створення автономних інтерактивних об'єктів, так і підключатися до програмного забезпечення, яке виконується на комп'ютері [20]. Апаратна платформа e-Health Sensor Shield V2.0 дає змогу використовувати Arduino для біометричних і медичних цілей. За допомогою десяти сенсорів можна вимірювати різні біомедичні параметри і сигнали [21].

З нижнього рівня оцифровані за допомогою 8-бітного АЦП із частотою дискретизації 277 Гц ЕКГ-сигнали передаються через COM-порт на ПК з використанням бібліотеки PySerial. Кожне вимірювання тривало близько 10 с., відповідно, кожний запис зазвичай містить не менше 10-ти серцевих циклів.

На ПК реалізуються функції середнього системного рівня (СР), націленого на кондиціонування ЕКГ-сигналу методами цифрового опрацювання сигналів, а також верхнього (ВР), де виконується інтелектуальний аналіз даних засобами машинного навчання. Корисний ЕКГ-сигнал має низький рівень, а тому особливо вразливий на спотворення такого характеру:

- низькочастотний складник, спричинений диханням, рухами тіла, потовиділенням, що впливає на імпеданс контакту «тіло-електрод»;
- зосереджена гармонічна завада 50 Гц (наведення від мережі живлення);
- широкосмугові завади, зумовлені інтерференцією електричних потенціалів м'язів, внутрішніми шумами електронних пристроїв вимірювального тракту, побічним електромагнітним випромінюванням.

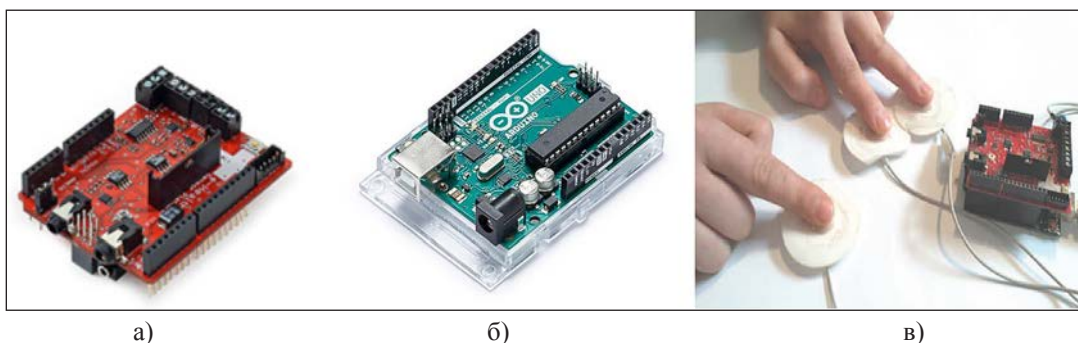


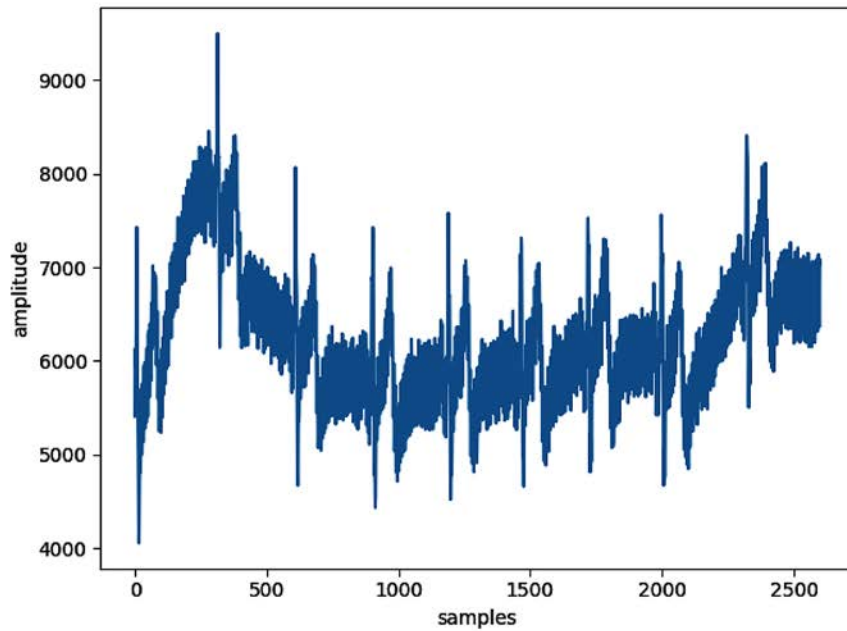
Рис. 2. Мікросхеми вимірювального тракту біометричної системи автентифікації

Вигляд зареєстрованого сирого ЕКГ-сигналу наведено на рис. 3, а. Для придушення зазначених вище шумів застосовано смуговий рекурсивний фільтр Баттерворта, а результат для візуальної оцінки показано на рис. 3, б.

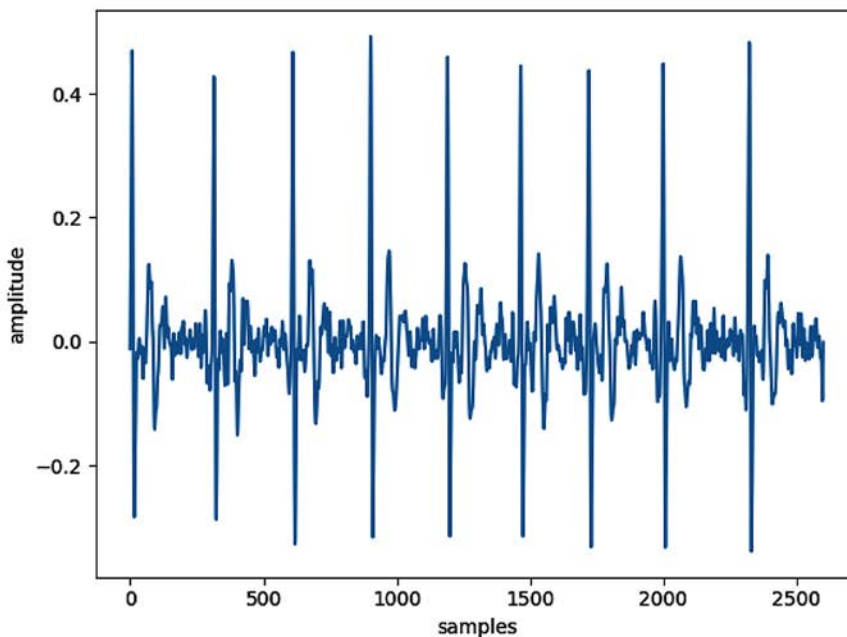
Далі відфільтрований сигнал піддається сегментації та нормалізації за амплітудою. Сегментацію проведено на основі відомого алгоритму Гамільтона шляхом детекції R-піків у записі (рис. 4). Це уможливило виділення сегментів, еквівалентних окремим циклам серцебиття. Сегментований

ЕКГ-сигнал далі унормовується за амплітудою (до масштабу ± 1).

Для використання електрокардіограми як біометричного маркера у реальних системах автентифікації важливо забезпечити інваріантність класифікатора до змін серцевого ритму. Для цього на наступному етапі застосовано темпоральну нормалізацію за алгоритмом, детально представленим у роботі [19]. Ідея алгоритму полягає у приведенні всіх сегментів із записів кожного суб'єкта до однакової фіксованої тривалості. З



а)



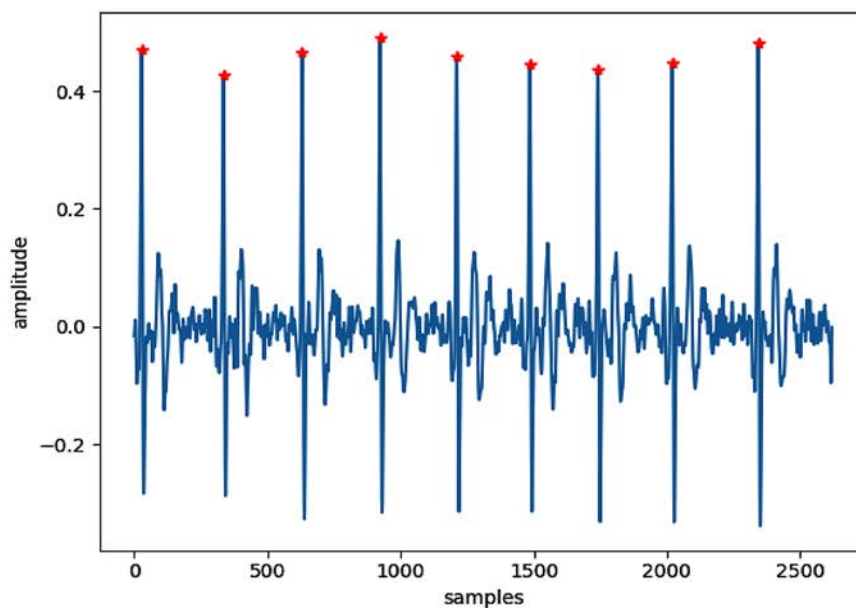
б)

Рис. 3. Вимірний ЕКГ-сигнал із шумами до (а) та після (б) фільтрації

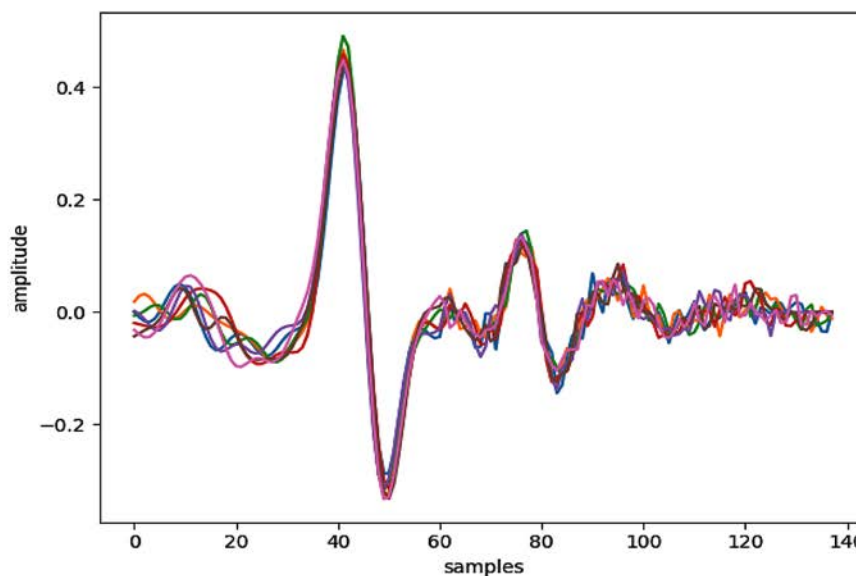
цією метою кожен сегмент розбивається на дві частини: перший – від початку Р зубця до кінця QRS-комплексу, а другий – від початку ST-сегмента до кінця U зубця. Перша частина сегмента мало залежить від зміни серцевого ритму, тому залишається незмінною, а друга піддається стисненню чи розтягненню так, щоб тривалість цілого нормалізованого сегмента точно становила $2/3$ секунди (90 уд./хв.).

Навіть після знешумлення у ЕКГ-записах, а отже, і в унормованих за амплітудою і часом

сегментах можуть залишаються спотворення у вигляді аномальних відхилень окремих чи серії вибірок. Щоб точність автентифікації не знижувалася, застосовано статистичний метод виявлення та коригування аномалій, детально описаний у [22]. Даний метод заснований на ковзаючому вікні, яке обчислює евклідову відстань між вибірками всередині вікна та відповідними усередненими на всіх сегментах значеннями. Якщо відстань перевищує встановлений поріг, всі вибірки у поточному вікні розглядаються як



a)



б)

Рис. 4. ЕКГ-запис з відміченими R-піками (а) і унормовані за рівнем сегменти ЕКГ-сигналу (б)

аномальні, а тому підлягають заміні на усереднені значення.

У машинному навчанні для збільшення продуктивності роботи класифікатора часто зменшують розмірність даних. Для цього використано метод головних компонент (Principle Component Analysis – PCA) як один із найпростіших, але ефективних алгоритмів редукції розмірності даних [23].

Заключним етапом опрацювання електрокардіограм у системі біометричної автентифікації є їх класифікація. Класифікатор побудовано на основі багатошарової штучної нейронної мережі (перцептрона). Нейрони кожного шару з'єднуються з нейронами попереднього і наступного шарів за принципом «кожний з кожним». Вхідний шар розробленого нейромережевого класифікатора складається із 30 нейронів, що відповідає числу дискрипторів (інформаційних ознак), відібраних за алгоритмом PCA із вибірок кожного сегменту ЕКГ-сигналу. Розмір двох прихованих шарів становить 256 і 128 нейронів, а розмір вихідного шару визначається числом зареєстрованих у біометричній системі користувачів. У нейромережевому класифікаторі застосовано такі гіперпараметри: функція активації (гіперболічний тангенс), алгоритм оптимізації (Adam), коефіцієнт L2 регуляризації (0,0001), точність оптимізації (10^{-5}), чисельна стабільність (10^{-8}).

Методика виконання експериментів. У дослідженнях використовувалася база даних електрокардіограм Lviv Biometric Data Set (LBDS), одержаних на описаному у попередньому пункті обладнанні, яка на момент написання статті містила 1809 ЕКГ-записів від 115-ти осіб [24]. Важливо зазначити, що у базі зібрано записи сигналів ЕКГ із кількох сеансів вимірювань, проведених упродовж двох років. На цей час база електрокардіограм LBDS є однією із найбільших, як за числом осіб, так і за обсягом записів. Набір даних із цієї бази зорієнтований на біометричні застосування та неодноразово використовувався для різних досліджень [5; 14; 25].

Для оцінювання ефективності роботи розробленої системи біометричної автентифікації використано такі загальноприйняті у машинному навчанні метрики [14; 26]:

– помилка першого виду FRR (False Reject Rate) – ймовірність того, що система автентифікації не зможе автентифікувати справжнього користувача (або часто говорять, що система приймає «свого» за «чужого»);

– помилка другого роду FAR (False Accept Rate) – ймовірність того, що система автентифікації автентифікує незареєстрованого користувача (тобто прийме «чужого» за «свого»);

– точність (Accuracy) – відношення числа вірно розпізнаних об'єктів до загального їх числа.

Для детальнішої інтерпретації результатів досліджень використано матрицю помилок (confusion matrix), яка має розмірність $N \times N$ (N – число класів). Стовпці відповідають істинним значенням, а рядки – результатам роботи класифікатора.

У статті наведено результати досліджень, отриманих авторами в процесі двох експериментів. Мета першого експерименту – дослідження середньострокової стійкості електрокардіограми як біометричного маркера. Для цього з бази даних електрокардіограм було виокремлено підмножину ЕКГ-записів, інтервал між якими становив один-два місяці. Отриманий набір даних містить записи ЕКГ 20-ти осіб. Його було розділено на навчальний та тестовий набори так, щоб проміжок між останнім вимірюванням навчального набору та першим вимірюванням тестового становив як мінімум один місяць. Для кожної особи у табл. 1 наведено дані про число записів у навчальному і тестовому наборах.

Результати першого експерименту наведено у табл. 2. Для демонстрації ефекту темпоральної нормалізації експерименти проведено в наступній конфігурації:

– без застосування алгоритму темпоральної нормалізації. У навчальному та тестовому наборі збережено оригінальне значення серцевого ритму;

– з застосування алгоритму темпоральної нормалізації. Значення серцевого ритму усіх ЕКГ-записів навчального та тестового наборів приведено до значення, еквівалентного 90 ударам серця за хвилину.

У багатьох дослідженнях здійснюють випадковий поділ на навчальний і тренувальний набори даних. Це зумовлено тим, що зазвичай набори даних, які використовуються у цих роботах, містять невеликий обсяг вимірювань, виконаних впродовж короткого проміжку часу. Набір даних, який використовується у цій роботі, дає можливість розділити тренувальний і тестовий набори за часом вимірювання (це повинно репрезентувати використання біометричної системи в реальних умовах повсякденного використання). Тому в цій роботі також представлено порівняння цих двох варіантів поділу на навчальний і тестовий набори даних: випадковий та за часом вимірювання.

Вища точність автентифікації за випадкового розподілу пояснюється тим, що ЕКГ-записи як у навчальному, так і тестовому наборі було виміряно на короткому проміжку часу. Результати у варіанті часового поділу наборів ЕКГ-записів, тобто коли тестовий набір виміряно на один-два місяці пізніше, ніж навчальний, також є достатньо високими за умови проведення темпоральної нормалізації серцевого ритму (див. останню колонку табл. 2). Для згаданої конфігурації системи автентифікації матрицю помилок наведено на рис. 5, де її головна діагональ матриці репрезентує випадки вірно автентифікованих користувачів за їх ЕКГ-сигналами. Як видно за нормалізації серцевого ритму, мало місце 9 помилок на 205 ЕКГ-записах (проти 24 без такої нормалізації), а також відпо-

відно є кращими результати за метриками точності, FAR і FRR.

Варто також зазначити, що система здатна розпізнати кожного користувача (відсутні нульові елементи на головній діагоналі матриці помилок). Це свідчить про те, що імплементована система сконфігурована належним чином та може достовірно автентифікувати її користувачів.

Метою другого експерименту було – дослідити стійкість електрокардіограми як біометричного маркера на тривалішому часовому горизонті. Для цього з бази електрокардіограм було виокремлено підмножину записів, інтервал між якими становив приблизно два роки. Отриманий набір даних містить ЕКГ-записи 20-ти осіб (як і у першому експерименті). Його було розділено на навчальний

Таблиця 1

Опис набору даних першого експерименту

Номер суб'єкта	Навчальний набір		Тестовий набір		Інтервал, дні
	Кількість вимірювань	Дата останнього вимірювання	Кількість вимірювань	Дата першого вимірювання	
user4	11	2017-12-01	11	2018-02-12	73
user9	11	2017-10-25	11	2017-11-22	28
user13	10	2017-12-01	10	2018-02-12	73
user14	11	2017-12-01	11	2018-02-12	73
user15	11	2017-12-01	2	2018-02-12	73
user54	17	2017-12-01	11	2018-02-12	73
user55	11	2017-12-19	11	2018-02-01	44
user73	9	2017-10-25	10	2017-11-22	28
user74	8	2017-10-25	17	2017-11-22	28
user75	9	2017-10-25	11	2017-11-22	28
user76	11	2017-10-25	11	2017-11-22	28
user78	11	2017-10-25	11	2017-11-22	28
user80	21	2017-10-25	22	2017-11-22	28
user81	11	2017-10-25	11	2017-11-22	28
user82	11	2017-10-25	10	2017-11-22	28
user84	11	2017-10-25	5	2018-01-24	91
user85	11	2017-11-22	7	2018-01-24	63
user86	11	2017-11-22	6	2018-01-24	63
user87	17	2017-11-22	8	2018-01-24	63
user88	11	2017-11-22	9	2018-01-24	63

Таблиця 2

Результати стійкості ЕКГ як біометричної характеристики упродовж 1-2 місяців

Поділ навчального і тестового наборів	Без темпоральної нормалізації		Із темпоральною нормалізацією	
	Випадковий	Відповідно до табл. 1	Випадковий	Відповідно до табл. 1
Обсяг тестового набору	205			
Число помилок	3	24	2	9
Точність	0.9854	0.8829	0.9902	0.9561
FAR	0.0009	0.0106	0.0007	0.0031
FRR	0.011	0.0399	0.0092	0.0376

і тестовий набори так, щоб проміжок між останнім вимірюванням навчального набору та першим вимірюванням тестового становив два роки. У табл. 3 наведено відомості про число ЕКГ-записів у навчальному і тестовому наборах даних для кожної особи. Зазначимо, що користувачі у першому і другому експериментах не збігаються на 100% через відсутність у базі даних їх ЕКГ-записів за обидвома періодами.

Результати другого експерименту наведено у табл. 4. Помітно, що при випадковому розподілі ЕКГ-записів на навчальний та тестовий набори система також показала високу точність автентифікації. Але і результати автентифікації за тестовим набором ЕКГ-сигналів, що виміряні два роки пізніше за навчальний набір, також є достатньо

Рис. 5. Матриця помилок експерименту 1 для конфігурації наборів ЕКГ із табл. 1

Таблиця 3

Опис набору даних другого експерименту

Номер суб'єкта	Навчальний набір		Тестовий набір		Інтервал, дні
	Кількість вимірювань	Дата останнього вимірювання	Кількість вимірювань	Дата першого вимірювання	
user4	32	2018-02-12	15	2019-12-27	683
user9	35	2017-11-22	15	2019-12-20	758
user13	34	2018-02-12	15	2019-11-01	627
user14	33	2018-02-12	11	2019-12-27	683
user15	17	2018-02-12	6	2019-11-08	634
user17	21	2018-02-12	10	2019-12-09	665
user73	25	2018-01-24	9	2019-12-20	695
user74	31	2018-01-24	7	2019-12-20	695
user75	20	2017-11-22	10	2019-12-20	758
user78	26	2018-01-24	12	2019-12-20	695
user80	50	2018-01-24	6	2019-12-20	695
user81	30	2018-01-24	9	2019-12-20	695
user84	16	2018-01-24	7	2019-12-20	695
user85	18	2018-01-24	10	2019-12-20	695
user86	17	2018-01-24	10	2019-12-20	695
user87	25	2018-01-24	10	2019-12-20	695
user88	20	2018-01-24	6	2019-12-20	695
user96	7	2018-01-24	8	2019-12-20	695
user97	10	2018-02-12	9	2019-12-27	683
user99	11	2018-02-12	14	2019-12-27	683

Таблиця 4

Результати стійкості ЕКГ як біометричної характеристики упродовж 1-2 років

Поділ навчального і тестового наборів	Без темпоральної нормалізації		Із темпоральною нормалізацією	
	Випадковий	Відповідно до табл. 3	Випадковий	Відповідно до табл. 3
Обсяг тестового набору	199			
Число помилок	2	45	0	10
Точність	0.9899	0.7739	1.0	0.9497
FAR	0.0006	0.0177	0.0	0.0025
FRR	0.0096	0.0839	0.0	0.0433

7. Matos, A.C., Lourenco, A., Nascimento, J. Embedded system for individual recognition based on ECG Biometrics. Conf. on Electronics, Telecom. and Computers. Procedia Technology 17, 2014, p. 265–272.
8. Albulbul, A. Evaluating Major Electrode Types for Idle Biological Signal Measurements for Modern Medical Technology. Bioengineering. 2016, 20(3), p. 1–10.
9. Wieclaw, L., Khoma, Y., Falat, P., Sabodashko, D., & Herasymenko, V. (2017). “Biometric Identification From Raw ECG Signal Using Deep Learning Techniques”. 9th IEEE Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition & Advanced Computing Syst: 21-23 September 2017, Bucharest, Romania, p. 129–133.
10. Lugovaya, T.S. “Biometric human identification based on electrocardiogram”. Saint-Petersburg, Russian Federation, Publ. “LETI”, 2005.
11. Hodge, V., & Austin, J. (2004). A Survey of Outlier Detection Methodologies. Artificial Intelligence Review, 22(2), p. 85–126.
12. Chan, A.D.C., Hamdy, M.M., Badre, A., et al. (2008). Wavelet distance measure for person identification using electrocardiograms. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 57, No. 2, 248–253.
13. Lourenco, A., Plácido da Silva, H., Carreiras, C. (2013). Outlier detection in non-intrusive ECG biometric system. In International Conference Image Analysis and Recognition. Berlin, Heidelberg, 43–52.
14. Хома, В.В., Хома, Ю.В., Сабодашко, Д.В., Хома П.П. Автоенкодера для опрацювання промахів сигналів ЕКГ у системі біометричної автентифікації. *Штучний інтелект.* № 1–2, 2019, с. 101–110.
15. Karpinski, M., Khoma, V., Dudykevych, V., Khoma, Y., & Sabodashko, D. Autoencoder Neural Networks for Outlier Correction in ECG-Based Biometric Identification. IEEE 4th Int. Symp. on Wireless Syst. (IDAACS-SWS), 2018 p. 210–215.
16. Tawfik M.M., Selim H., Kamal T. Human identification using time normalized QT signal and the QRS complex of the ECG. In Proc. 7th Int. Symp. Commun. Syst. Netw. Digit. Signal Process. (CSNDSP), Jul. 2010, pp. 755–759.
17. Lourenço A., Silva H., Fred A. Unveiling the biometric potential of finger-based ECG signals. *Comput. Intell. Neurosci.* vol. 2011, p. 5, Jan. 2011.
18. Kim K.S., Yoon T.H., Lee J.W., Kim D.J., Koo H.S. A robust human identification by normalized time-domain features of electrocardiogram. In: 27th annual international conference of the engineering in medicine and biology society, 2005 IEEE-EMBS 2005. 2005. p. 1114–7.
19. Дудикевич В.Б., Хома В.В., Чекурін В.Ф., Хома Ю.В., Сабодашко Д.В. Нормалізація сигналів ЕКГ для застосування в системах біометричної ідентифікації. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2019, Том 30 (69), ч. 1 № 4, с. 49–56.
20. Arduino UNO & Genuino UNO Pi. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>.
21. e-Health Sensor Platform V2.0 for Arduino and Raspberry Pi. URL: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/ehealth-biometric-sensor-platform-arduino-raspberry-pi-medical>.
22. Khoma, V., Pelc, M., Khoma, Y., & Sabodashko, D. “Outlier Correction in ECG-Based Human Identification”. “Biomedical Engineering and Neuroscience”. *BCI Adv. in Intel. Syst. & Comp.* 2018, Vol. 720. p. 11–22. Springer.
23. Метод головних компонент. URL.: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_головних_компонент.
24. Lviv Biometric Data Set. Available online. URL: <https://github.com/YuriyKhoma/Lviv-Biometric-Data-Set>.
25. Khoma V., Pelc M., Khoma Y. Artificial Neural Network Capability for Human Being Identification based on ECG. *Proc. 23rd Intern. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics*, Miedzyzdroje, 27-30 August 2018, p. 479 – 482.
26. Хома Ю.В. «Класифікація віброартрографічних сигналів з використанням хвилькового перетворення і технологій машинного навчання» *Вісник НУ «Львівська політехніка» – «Інформаційні системи та мережі»*. 2019. Вип. 5. с. 40–52.

Sabodashko D.V., Khoma Yu.V., Khoma V.V. STUDY OF TIME STABILITY OF ECG SIGNAL AS A BIOMETRIC MARKER IN AUTHENTICATION SYSTEM

Many studies has already proven that electrocardiogram is unique for individual person. Currently, the most issues related to biometric systems design are solved – simple analog-front end for measuring of electrical potentials, effective methods of the ECG signal conditioning, reliable algorithms for the intellectual analysis for individual hidden patterns disclosure from the electrocardiogram. Long-term stability of the ECG signal informative parameters is important for the operation of biometric authentication systems in real-world applications, however this question still remains opened.

Therefore, the purpose of this work was to investigate the stability of an electrocardiogram as a unique biometric marker for human authentication over long time intervals of months/years.

The article presents its own design and implementation of the ECG-based system for human biometric authentication, which was used for the registration of ECG records, their computer processing, training and

testing of models of neural network classifiers. The biometric authentication system was verified on an open Lviv Biometric Data Set (LBDS) dataset, which collected over 1800 unique electrocardiogram records lasting from 10 to 20 seconds. The recordings were made over a two-year period and are belong to 115 different individuals. Research methodology for two sets of experiments is described in the paper. The first experiment is aimed to verify systems reliability after one or two months, science neural network classifier has been trained, while the second experiments is aimed to verify reliability for a much longer timeline of two years. Both experiments have shown rather good results: the accuracy of authentication with one month and two years interval is kept practically at the same level – 95,61% and 94,97% respectively. This leads to the conclusion that the electrocardiogram is a time-stable biometric marker that can be used in real-world biometric applications.

Key words: *biometric system, ECG records, neural network classifier, time stability of biometric markers, biometric authentication, FAR, FRR.*

УДК 621.039.56

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>**Сичило А.А.**

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕСЗ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т» (ЧАСТИНА 2)

В енергосистемі України існує невідповідність між споживанням і виробленням електроенергії протягом доби. Сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальною стає задача адаптації діючих АЕС до нових специфічних умов роботи. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між виробленою енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється (для двокоонтурної АЕС) зі зміною тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Вказана невідповідність має усуватися автоматичним регулятором потужності енергоблоку, котрий надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну залежно від режиму роботи енергоблоку з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблоку були знижені, а також щоб економічна ефективність енергоблоку зберігалася на необхідному рівні. На цей час регулювання потужності енергоблоку з реакторами ВВЕР здійснюється саме за допомогою автоматичного регулятора потужності реактора (АРП) і регулятора турбіни (РТ). Регулятор потужності реактора забезпечує наступні режими роботи:

- режим астатичної підтримки теплотехнічного параметра (тиску пара перед турбіною) впливом на реактор (Т);
- режим астатичної підтримки нейтронної потужності (Н);
- режим підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою впливу на реактор (К);
- охоронний режим підтримки теплотехнічного параметра впливу на реактор (С).

Розроблено автоматизовану систему регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дозволить експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Ключові слова: АЕС, енергія, автоматичний регулятор потужності, синтез регулювання, режими роботи, комбінована програма регулювання.

Постановка проблеми. На цей час всі українські АЕС з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це пов'язано з тим, що на цей час маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється оператором у ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, оскільки під час управління необхідно одночасно контролювати зміни багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактора на безпеку АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Стаття на тему «Автоматизована система регулювання потужності енергоблоку для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою входу в реактор» [1, с. 20–21] сказано, що для підтримки балансу потужності в енергосистемі необхідно щодоби або щотижня здійснювати зміну потужності енергоблоку з мінімальною участю оператора. Тому актуальною є задача розробки АСР потужності енергоблоку, яка б здійснювала розвантаження / навантаження енергоблоку в автоматизованому режимі.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення існуючої автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000, яка дозволить з дотриманням

регламентних вимог, без зниження рівня безпеки, експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового або тижневого циклу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В енергоблоці, що працює на електричну мережу, відбувається перетворення теплової енергії, що виробляється в ядерному реакторі, на механічну енергію валу турбіни і потім на електричну енергію в генераторі. Основне завдання регулювання паросилової установки – підтримання рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між вироблюваною енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється (для двоконтурної АЕС) в зміні тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Зазначена невідповідність має усуватися регулятором потужності реактора (РПР), який надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну залежно від режиму роботи енергоблоку.

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. Енергоблоки працюють на енергосистемі з великою кількістю споживачів електроенергії (рис. 1). Динамічні процеси в генераторі практично безінерційні, тому електрична потужність, що віддається в енергосистемі (за винятком втрат енергії в генераторі), дорівнює механічній енергії на роторі турбіни. Основне завдання регулювання енергосистеми полягає в тому, щоб виробляти вироблення електроенергії точно відповідно до еволюційного споживання. По суті, єдиним джерелом інформації про величину невідповідності вироблення електроенергії її споживання є відхилення частоти в енергосистемі від її номінального значення. Відхилення частоти від номінального значення (50 Гц) допускається в вузьких межах $\pm 0,5$ Гц. Навіть в аварійних режимах енергосистеми можлива лише короткочасна робота з частотами: від 51 до 50,5 Гц – 60 з на рік, але не більше 10 з одноразово; від 49 до 48 Гц – 12 хв. на рік, але не більше 2-х хв. одноразово; від 48 до 47 Гц – 6 хв. на рік, але не більше 1 хв. одноразово; від 47 до 46 Гц – 60 з на рік, але не більше 10 з одноразово.

Завдання регулювання частоти і потужності в енергосистемі вирішують регулятори частоти і потужності турбіни (АСУ ТП) і регулятор потужності енергосистеми (РПЕ). Структура системи управління потужністю енер-

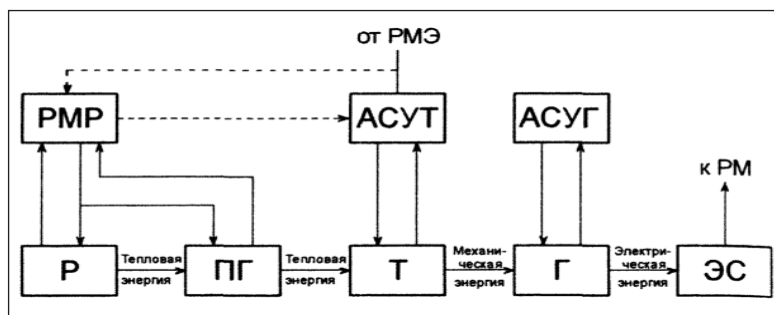


Рис. 1. Схема перетворення енергії та регулювання енергоблоку

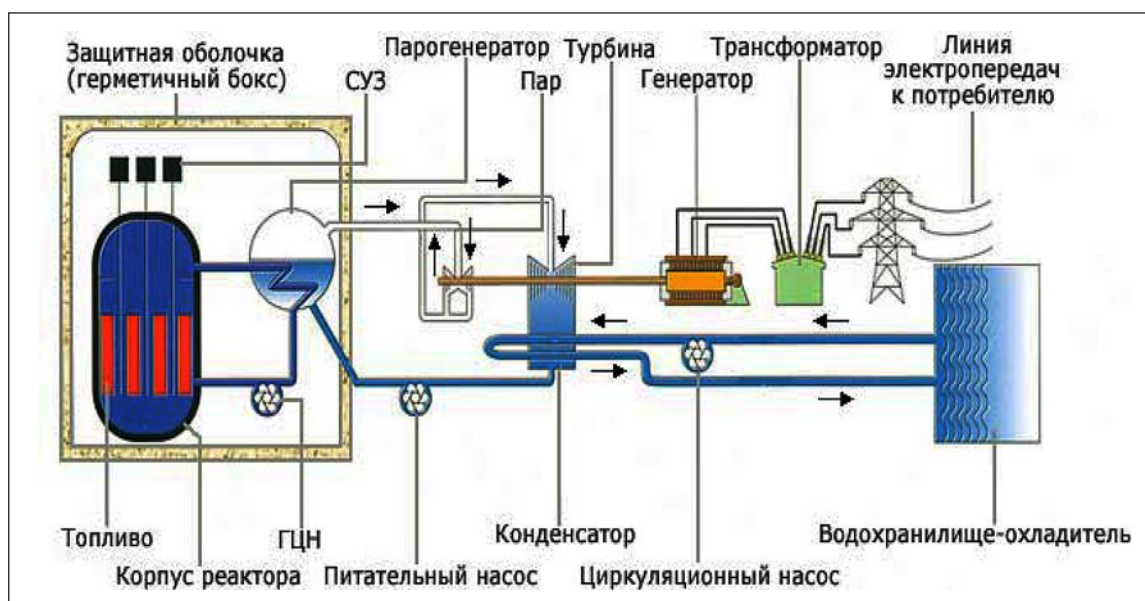


Рис. 2. Технологічна схема енергоблоку з реактором ВВЕР-1000

гоблоку значною мірою визначається графіком електричного навантаження енергосистеми і енергоблоку. Однак цей графік дає усереднене значення навантаження, тоді як дійсне енергоспоживання може в певних межах змінюватися, що вимагає (як уже зазначалося) постійного регулювання частоти. Для цього необхідні невеликі (до 5%), але досить швидкі (до 10% на хв.) зміни потужності відповідно до реального користування електроенергією. Для двоконтурних енергоблоків важливим є характер зміни параметрів робочих середовищ за контурами (тиск, температура, витрата) за зміни потужності в 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. При цьому статична програма регулювання підтримується тільки в стаціонарних режимах роботи енергоблоку і лише приблизно реалізується в численних перехідних процесах. Найбільшого поширення набули двоконтурні енергоблоки з водо-водяними енергетичними реакторами ВВЕР (рис.2). Для таких реакторів теплова потужність, яка знімається однофазним теплоносієм (водою) з активної зони реактора, $N = G C_p (t_{вх} - t_{вх}) = G C_p \Delta t$, де G – витрата теплоносія; C_p – середня питома теплоємність теплоносія; $t_{вх}$, $t_{вх}$ – температура теплоносія на вході і виході реактора відповідно.

Для реакторів ВВЕР витрата теплоносія 1-го контуру постійна і не залежить від потужності. Можна також вважати, що $C_p = const$. У цьому разі потужність реактора лінійно залежить від різниці температур теплоносія, тобто $N = k \Delta t$. За вільно обраного закону зміни $t_{вх}$ однозначно визначається закон зміни $t_{вх}$ і навпаки. Під час вибору статичних програм регулювання враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільшого поширення набули програми з постійним тиском пари перед турбіною і постійною середньою температурою теплоносія в 1-му контурі.

Автоматичний регулятор потужності АРП є складовою частиною системи регулювання

потужності енергоблоку (рис. 3) і призначений для:

- стабілізації потужності реактора на заданому рівні (режим Н);
- підтримання потужності реактора відповідно до навантаження ТГ (підтримка тиску в ЦПК) (режим Т);
- обмеження тиску в ЦПК на заданому рівні (режим С)

Витрата теплоносія 1-го контуру в енергоблоці з реактором ВВЕР постійна, тому потужність реактора $N = k(t_{вх} - t_{вх})$. Крім того, в барабанному ПГ в 2-ому контурі отримують насичений пар, для якого температура і тиск зв'язані одночасно. Розрізняють такі програми регулювання: з постійною середньою температурою t_{cp} теплоносія 1-го контуру; з постійним тиском пари в 2-гому контурі $P_s = const$; компромісні програми.

Розглянемо переваги та недоліки програми.

З постійним тиском пара в 2-гому контурі $P_s = const$ (рис. 4).

Переваги: полегшення температурних умов 2-го контуру при знижених загрузках; використання ПГ мінімальної вартості.

Недоліки: зміна реактивності внаслідок зміни середньої температури теплоносія; значні зміни температурного стану компонентів АЗ при переході на новий рівень потужності; мінливість об'єму теплоносія. Коли стає вибір статичних програм регулювання, враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільшого поширення набули програми з постійним тиском пари в 2 контурі ($P_s = const$), з постійною середньою температурою теплоносія в 1 контурі (theorist) і компромісні

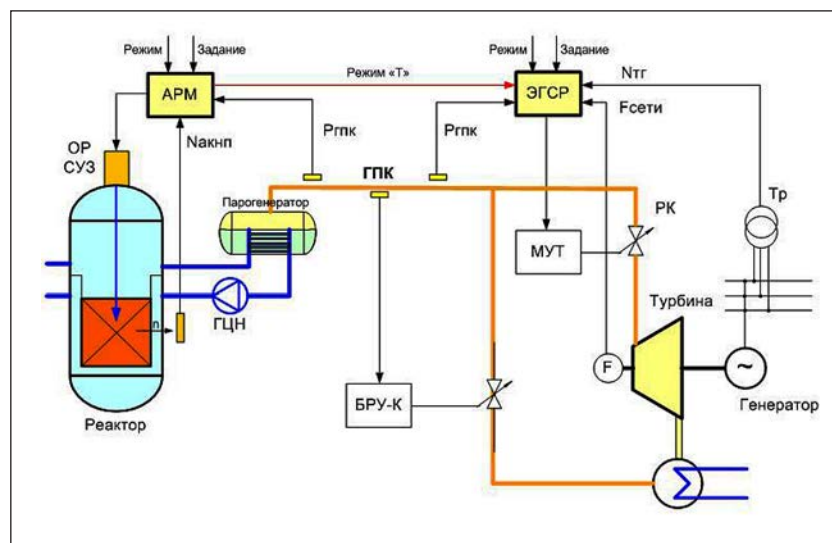


Рис. 3. АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР

програми. Схема автоматичного регулювання енергоблоку в режимі «Т» зображена на (рис. 5).

Якщо енергоблок працює в базовому режимі, то потужність задається оператором регулятора турбіни РТ, який у разі відхилення дійсної потужності від заданої впливає на механізм управління турбіною МУТ і за допомогою регулятора частоти обертання турбіни Рп і регулюючого клапана змінює витрату пари на турбіну. Приведена у відповідність потужність турбогенератора і реактора здійснюється регулятором реактора АРМ, який отримує сигнал тиску пари перед турбіною, порівнює його з сигналом заданого значення тиску і в разі їх невідповідності переміщує за допомогою виконавчого механізму ІМ регулюючі стрижні реактора до відновлення заданого тиску. Для зміни потужності енергоблоку необхідно змінити задану потужність, при цьому потужність блоку змінюється зі швидкістю 10 МВт/хв. Можливі внутрішні обурення в реакторі за нейтронним потоком сприймаються іонізаційними камерами, сигнал камер надходить на дифференціатор ДФ, звідки сигнал швидкості надходить на АРМ. У статичному режимі сигнал на виході ДФ дорівнює нулю, і АРМ підтримує задане значення тиску. Статична точність підтримки тиску становить $\pm 0,05$ МПа. Для забезпечення роботи енергоблоку в регулюючому режимі

необхідно задану потужність блоку змінювати від регулятора частоти системи (на схемі не показано). Розглянемо роботу системи під час збільшення заданої потужності блоку. При цьому регулятор турбіни РТ впливає на МУТ, який через регулятор частоти обертання Рп відкриває регулюючий клапан турбіни. Витрата пари при цьому зростає, статична характеристика турбіни зміщується вправо і турбогенератор за незмінної частоти мережі приймає нове навантаження. Збільшення витрати пари призводить до падіння тиску перед турбіною, що сприймається регулятором АРМ, який через виконавчий механізм ВМ піднімає регулюючі стержні. Це призводить до збільшення середньої температури теплоносія 1-го контуру, генерації пари в ПГ та відновлення тиску пари перед турбіною. Стабілізація тиску свідчить про відновлення енергетичного балансу між парогенеруючою установкою і турбогенератором.

Беручи до уваги всі недоліки та переваги основних режимів роботи регулювання потужності реактора ВВЕР-1000, в середовищі Simulink була змодельована схема автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 (рис. 6).

Привода СУЗ спільно з органами регулювання є виконавчими механізмами системи регулювання та захисту реактора ВВЕР-1000, за допомогою яких здійснюється регулювання потужності, компенсація надлишкової реактивності і зупинка реактора шляхом введення і виведення ОР з активної зони реактора, а також аварійної зупинки реактора шляхом скидання ОР під час знеструмлення приводів.

За даними випробувань, час падіння ОР СУЗ в активній зоні становить від 2 до 4 сек. і не перевищує допустимого за проектом часу падіння ОР СУЗ в режимі АЗ. Швидкість руху груп ОР СУЗ в режимі скидання після сходу з ВКВ постійна по всій висоті активної зони.

Висновки. У роботі була розглянута проблема невідповідності між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, і що сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала. Було підмічено, що для підтримки балансу потужності в енергосистемі необхідно щодоби або щотижня здійснювати зміну потужності енергоблоку з мінімальною участю оператора. Задача розробки АСР потужності енергоблоку, яка б розвантажувала / навантажувала енергоблок здійснювала в автоматизованому режимі, виконана.

Було досліджено та порівняно ефективність режиму «Т» та створена структурна схема АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за програмою регулювання в середовищі Simulink.

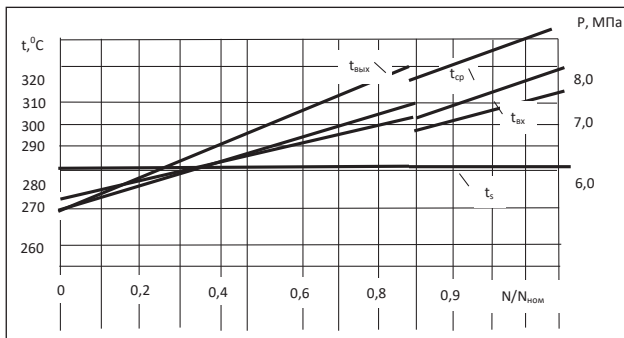


Рис. 4. Статична програма $P_s = \text{const}$

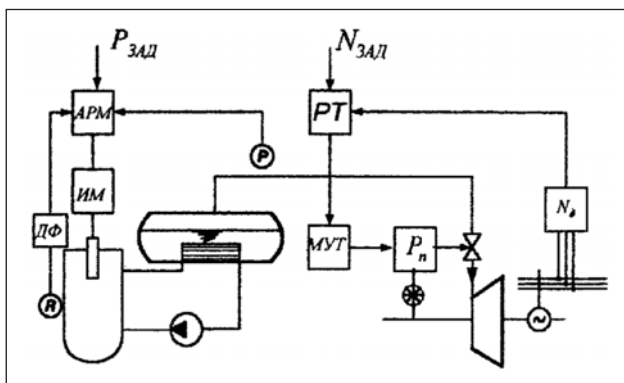


Рис. 5. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку в режимі «Т»

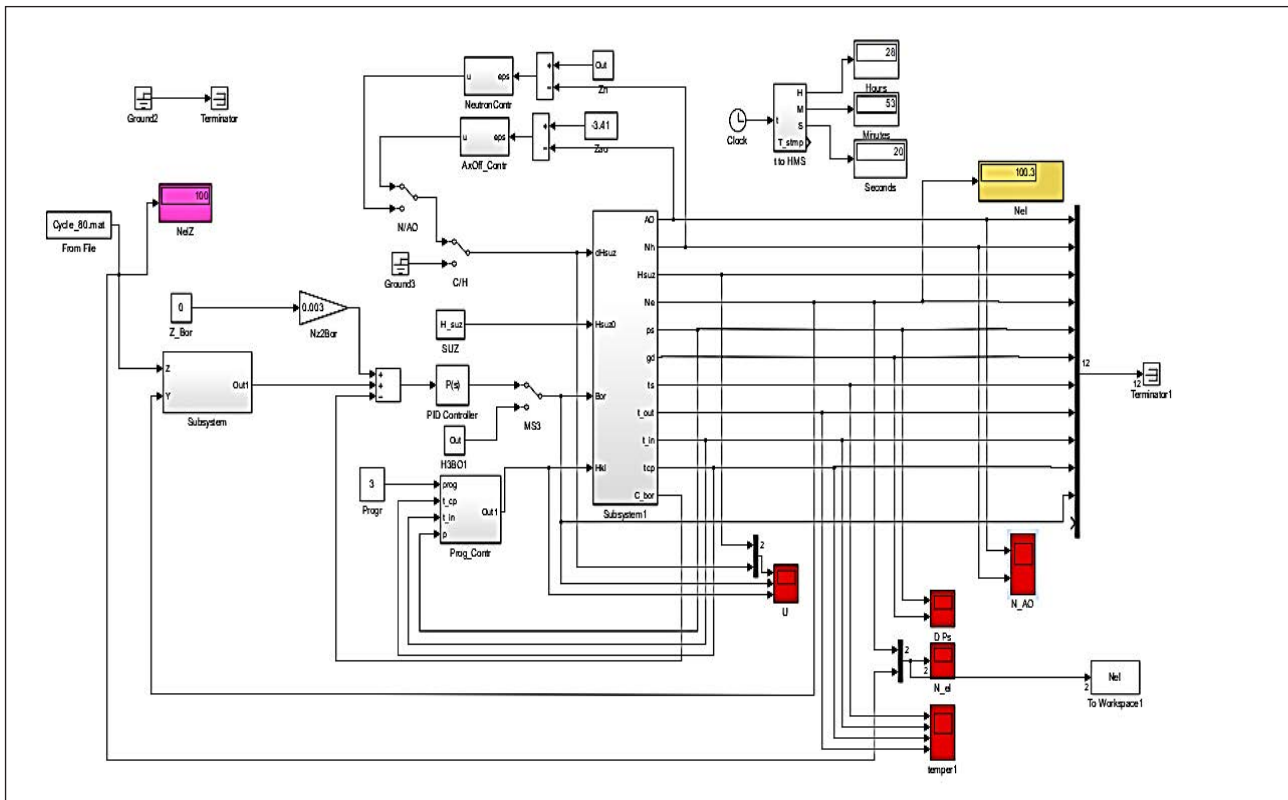


Рис. 6. Структурная схема АСР з регулятором тиску

Список літератури:

1. Теплотехнічний довідник. В двох томах. Том 2, Ред. В. Юрнев, П. Лебедев: Видавництво «Енергія», 1976 р.
2. Тодорцев Ю.К., Цисельская Т.А., Никольский М.В. Автоматизована система регулювання потужності енергоблоку для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою входу в реактор. *Ядерна та радіаційна безпека*. Вип. 4(60), 2013.
3. Автоматичні системи регулювання технологічними процесами АЕС. В.А. Демченко. ОНПУ 1994 р.
4. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988 р.
5. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС», «Регулювання енергоблоків». Одеса: ОНПУ, 1994 р.

Sychylo A.A., Beglov K.V., Lysyuk H.P. DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE (PART 2)

In the power system of Ukraine there is disparity between a consumption and making of electric power within 24 hours. The total proportion of installations designed to regulate the daily load schedule of the power system is very small, therefore, the task of adapting the existing NPP becomes actual to the new specific terms of work.

The main task of regulating the steam power plant is to maintain equality between the amount of energy produced and consumed. Disparity between productive energy in a reactor and consumed in a turbine shows (for dual circuit NPP) up with the change of pressure and temperature of coolant moderator in the 1st circuit and pressure (temperatures) of the saturated pair in the 2nd circuit. The indicated disparity must remove an automatic regulator to power of power unit. That gives managing influence or on a reactor, or on a turbine depending on the mode of operations of power unit with a requirement, that reliability and safety of power unit were reduced, and also, that economic efficiency of power unit was kept on a necessity levels. Currently, the control of the power of the unit with reactors VVER is carried out precisely with the help of an automatic reactor power regulator (ARP) and a turbine controller (RT). The reactor power controller provides the following operating modes:

- *mode of astatic support of thermal parameter (steam pressure in front of turbine) influence on reactor (T);*
- *Astatic Neutron Power (H) mode;*
- *mode of maintenance of the thermal parameter in the compromise program impact on the reactor (K);*
- *conservative mode of maintaining the thermal parameter by influencing the reactor (C).*

Development of an automated power unit power control system NPP is in the mode of “T”, that will allow to exploit power unit in the manoeuvre modes of day’s cycle for support of balance of power in the power system of Ukraine.

Key words: *NPP, energy, automatic power controller, regulation synthesis, operating modes, combined adjustment program.*

Снитюк В.Є.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Сорока П.М.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Ткаченко О.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ПРОБЛЕМА РОЗБИТТЯ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ НА КЛАСТЕРИ З МЕТОЮ ПРОВЕДЕННЯ РЕГІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ПОЛІТИКИ

Задача кластеризації сьогодні є однією з найпопулярніших задач машинного навчання. Вона являє собою задачу розбиття об'єктів на групи так, щоб об'єкти в одній групі були максимально подібні, а об'єкти з різних кластерів істотно відрізнялися. Ця задача полегшує обробку даних та має багато застосувань у реальному житті.

У статті розглядається проблема розбиття регіонів України на кластери з метою проведення регіонально орієнтованої економічної політики. Зроблено математичну постановку задачі, у якій кожен вектор описує конкретний регіон України за певними ознаками. В роботі вважають, що всі ознаки є рівноважними, тому перед початком розв'язання проводиться нормалізація даних з використанням лінійного перетворення. Наведено функцію, яку мінімізують у задачі кластеризації з використанням нормалізованого набору даних (датасету).

У статті розглядаються такі алгоритми кластеризації: еволюційна стратегія, алгоритм диференціальної еволюції, генетичний алгоритм, імунний алгоритм, K-means, метод найближчого сусіда. Вони використані під час розв'язання задачі розбиття регіонів України на групи за соціально-економічними показниками. Для експерименту було взято 10 показників для кожного із регіонів. У розрахунках використано нормалізований набір даних, побудований за даними з веб-сайту Державної служби статистики України за 2017 рік. У дослідженнях використовуються двомірні проєкції цього багатовимірного набору даних та згенерований допоміжний набір даних.

Побудовано графіки залежності результатів мінімального значення функції f_{min} від кількості ітерацій для алгоритму диференціальної еволюції і генетичного алгоритму. Показано, що при ітераціях більших 250 для алгоритму диференціальної еволюції і більших 80 для генетичного алгоритму мінімальне значення функції f_{min} стабілізується. Зроблено порівняння та аналіз результатів досліджень від кількості кластерів, одержаних різними алгоритмами. Показано, що за кількості кластерів рівної 5 еволюційні алгоритми дають досить пристойні результати.

Ключові слова: регіон, кластер, кластеризація, економічна політика, алгоритм, ітерація.

Постановка проблеми. Задача кластеризації – це задача розбиття об'єктів на групи так, щоб об'єкти в одній групі були максимально подібні, а об'єкти з різних кластерів істотно відрізнялися. Такого роду задача сьогодні є однією з найпопулярніших задач машинного навчання, бо полегшує обробку даних та має багато застосувань у реальному житті.

У цій статті буде розглянуто декілька алгоритмів кластеризації для розбиття регіонів України на групи за соціально-економічними показниками. Таке розбиття полегшує ведення політики та дозволяє визначати напрями розвитку не окремо для

кожного регіону України, а для групи регіонів одночасно. Це дозволяє економити людські ресурси, спрямовані на розробку стратегій для кожного регіону, та розробити більш детальну стратегію для групи регіонів. У роботі використано набір даних (датасет), побудований за даними з веб-сайту Державної служби статистики України за 2017 рік [1].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження проблеми розбиття регіонів України на кластери з метою проведення регіонально орієнтованої економічної політики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математична постановка задачі. Нехай є N

векторів x_1, x_2, \dots, x_p , де $x_i \in \mathcal{R}^d$ для кожного i з множини $\overline{1, N}$ та d – це розмірність вектору. Кожен вектор описує конкретний регіон України за певними ознаками. Потрібно розбити ці вектори на k груп. В статті будемо вважати, що всі ознаки є рівноважними, тому перед початком розв’язання необхідно провести нормалізацію даних, тобто перевести значення кожної ознаки з \mathcal{R} у інтервал $[a, b]$.

Для цього використаємо наступне лінійне перетворення. $\forall x_i, i \in \overline{1, N}$ побудуємо вектор \hat{x}_i за формулою:

$$\hat{x}_{i,j} = \frac{(x_{ij} - a_{\text{now}_j})(b-a)}{b_{\text{now}_j} - a_{\text{now}_j}} + a,$$

де $j \in \overline{1, d}$, $a_{\text{now}_j} = \min_{i \in \overline{1, N}} x_{i,j}$ та $b_{\text{now}_j} = \max_{i \in \overline{1, N}} x_{i,j}$.

Далі будемо використовувати тільки нормалізований датасет. Щоб не перевантажувати статтю індексами та позначаннями, далі будемо використовувати позначання $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ для нормалізованої множини $\{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N\}$.

Розглянемо функцію, для мінімізації якої буде застосовано алгоритми, що описані далі:

$$f_k(X, y) = \sum_{p=1}^k d_{cp}(X_p),$$

де k – це кількість кластерів;

y – це вектор-результат кластеризації, $y \in (\overline{1, k})^N$;

X_p – це підмножина множини X , що складається з векторів, які потрапили в p -ий кластер;

$d_{cp}(X_p)$ – середня відстань між векторами у кластері p та центроїдом кластеру, яка обчислюється за формулою:

$$d_{cp}(X_p) = \frac{1}{|X_p|} \sum_{h=1}^{|X_p|} \|x_h^p - c_p\|,$$

де c_p – центроїд кластеру X_p ;

$|X_p|$ – кількість елементів у кластері X_p ;

x_h^p – h -ий елемент кластеру X_p .

Іноді в задачах кластеризації намагаються не тільки мінімізувати функцію, наведену вище, а також максимізувати функцію відстаней між кластерами, або навіть тільки її.

Норма $\|x_h^p - c_p\|$ – це довільна норма. У статті буде розглянута звичайна евклідова норма, але в загальному випадку норма може бути довільна.

Опис використаних методів кластеризації.

Для методів кластеризації еволюційної стратегії, диференціальної еволюції, генетичного та імунного алгоритмів функція $f_k(X, y)$ буде переписана в іншому вигляді. Ми будемо мінімізу-

вати $f(X, c) = f_k(X, y)$, де c – це множина центрів відповідних кластерів. Тоді кожна точка початкової множини буде належати тому кластеру, до якого вона знаходиться найближче всього. Кожен елемент популяції $p_i^j \in \mathbb{R}^{d \times k}$ являє собою множину центрів кластерів, розгорнуту в один вектор, тобто перші d компонент вектору – це центр 1-го кластеру, другі d компонент вектору – це центр 2-го кластеру і так далі. Зауважимо, що $f(X, c)$ – це невід’ємна функція. Деякі з формул, що наведені нижче, правильні тільки для такого роду функцій.

Зробимо опис декількох алгоритмів кластеризації, використаних для розбиття регіонів України на групи за соціально-економічними показниками.

Еволюційна стратегія. У ньому використані такі позначення: T – кількість ітерацій; μ – кількість батьків; λ – кількість дітей; d – розмірність простору; k – кількість кластерів; p_i^j – i -ий елемент популяції P_j .

Використаний алгоритм еволюційної стратегії [2] виглядає таким чином:

1: Початкова ініціалізація:

$$P_0 = \{p_1^0, \dots, p_\mu^0\},$$

де $p_i^0 \in [a, b]^{d \times k}$ – випадковий вектор

2: **for** $t = 1..T$ **do**

3: Обрати λ індивідуумів з P_t рівномірно $\{p_1^{(t)}, \dots, p_\lambda^{(t)}\}$,

4: Згенерувати множину потомків $\{c_1^t, \dots, c_\lambda^t\}$, де $c_i^t = p_i^{(t)} + N(0, \sigma^2)$,

5: Обчислимо значення f для потомків та їх батьків

6: P_{t+1} = множина \propto найкращих з батьків та дітей

7: **end for**

Алгоритм диференціальної еволюції. Тут використано такі позначення: T – кількість ітерацій; d – розмірність простору; k – кількість кластерів; N – розмір популяції; $CR \in (0; 1)$ – константа; F – константа; $v^{(d_{\text{now}})}$ – координата d_{now} вектора v ; p_i^j – i -ий елемент популяції P_j .

Використаний алгоритм диференціальної еволюції [3] виглядає таким чином:

1: Початкова ініціалізація:

$$P_0 = \{p_1^0, \dots, p_N^0\},$$

де $p_i^0 \in [a, b]^{d \times k}$ – випадковий вектор

2: **for** $t = 1..T$ **do**

3: **for** $j = 1..N$ **do**

4: Випадково обрати 3 різні представника з $P_t : r_0, r_1, r_2$

```

5: dim_random = randint(1, d)
6: for d_now = 1..d do
7:   if (rand[0,1) < CR or d_now == dim_random):
8:      $u_{d\_now} = r_1^{(d\_now)} + F(r_2^{(d\_now)} - r_0^{(d\_now)})$ 
9:   else:
10:     $u_{d\_now} = p_j^{(d\_now)}$ 
11:   end for
12:   if ( $f(u) < f(p_j^t)$ ):
13:     В множину  $P_t$  додамо елемент  $u$ 
14:   else:
15:     В множину  $P_t$  додамо елемент  $p_j^t$ 
16:   end for
17: end for

```

Генетичний алгоритм. У ньому використані такі позначення: T – кількість ітерацій; d – розмірність простору; k – кількість кластерів; N – розмір популяції; μ – точність, використовується для знаходження кількості бітів, необхідних для кодування; δ – константа, яка описує ймовірність мутації.

Використаний генетичний алгоритм [2] виглядає таким чином:

```

1: Початкова ініціалізація:
 $P_0 = \{p_1^0, \dots, p_N^0\}$ ,
де  $p_i^0 \in [a, b]^{d \times k}$  – випадковий вектор
2: for  $t = 1..T$  do
3: Обчислимо значення  $f$  для елементів популяції
4: Обчислимо значення ймовірності бути обраним для оператора кросовера залежно від якості функції  $f$ :

```

$$probability_array_i^{temporary} = 1 - \frac{f(p_i^t)}{\sum_{h=1}^N f(p_h^t)}$$

$$probability_i = \frac{probability_array_i^{temporary}}{\sum_{h=1}^N probability_array_h^{temporary}}$$

```

5: for  $d_{now} = 1.. \frac{N}{2}$  do

```

```

6: Візьмемо з урахуванням ймовірності  $probability\_array$  два вектора з  $P_t$   $r_0, r_1$ 

```

```

7: Отримаємо  $r_0, r_1$  після використання оператора кросинговера до  $r_0, r_1$ .

```

```

8: Застосуємо оператор мутації з ймовірністю  $\delta$  до  $r_0, r_1$ 

```

```

9: Додамо  $r_0, r_1$  у множину дітей

```

```

10: end for

```

```

11: Обчислимо значення  $f$  для потомків та їх батьків

```

```

12:  $P_{t+1}$  = множина  $N$  найкращих з батьків та дітей

```

```

13: end for

```

Зауваження: Для використання операторів мутації та кросинговера до p_i^j завжди застосовується двійковий запис числа.

Імунний алгоритм. Тут використано такі позначення: T – кількість ітерацій; d – розмірність простору; k – кількість кластерів; N – розмір популяції; ε – точність, використовується для знаходження кількості бітів, необхідних для кодування; δ – константа, яка описує ймовірність мутації; $max_{\text{вклад унікальності}}$ – константа; $k_{\text{унікальність}}$ та $k_{\text{якість}}$ – константи, відношення між якими залежить від важливості унікальності елемента популяції відносно важливості якості функції.

Використаний імунний алгоритм на основі [4], [5], [6], [7] виглядає таким чином:

```

1: Початкова ініціалізація:

```

$$P_0 = \{p_1^0, \dots, p_N^0\},$$

де $p_i^0 \in [a, b]^{d \times k}$ – випадковий вектор

```

2: for  $t = 1..T$  do

```

```

3: Обчислимо значення  $f$  для елементів популяції

```

```

4: Обчислимо якість кожного з елементів популяції:

```

$$f_{\text{якість}}(p_i^t) = f(p_i^t) - f_{\min+1},$$

де f_{\min} – мінімальне значення функції для елементів популяції

```

5: Обчислимо значення унікальності для кожного з елементів популяції:

```

u_i – унікальності комбінації нулів та одиниць для p_i^t відносно інших елементів популяції обчислюється за формулою:

$$u_i = Pr_1^1 Pr_2^1 * \dots * Pr_R^1 * \dots * Pr_1^d Pr_2^d * \dots * Pr_R^d$$

(R – кількість бітів використано для запису числа у двійковій системі;

Нехай val = значення i -го біту j -го виміру для p_i^j ,

$$a \ h = \sum_{q=1}^N \text{значення } i\text{-го біту } j\text{-го виміру для } p_q^j),$$

$$\text{Тоді } Pr_i^j = val * \frac{h}{N} + (1 - val) \left(1 - \frac{h}{N}\right)$$

```

6: Обчислимо значення кількості клонів для кожного елементу з популяції. Кількість клонів прямо пропорціональна якості функції  $f$  від цього елементу та унікальності комбінації нулів та одиниць відносно інших елементів популяції:

```

$$clones_i = \min \left(\frac{k_{\text{унікальність}}}{0.001 + u_i}, max_{\text{вклад унікальності}} \right) + \frac{k_{\text{якість}}}{f_{\text{якість}}(p_i^t)}$$

7. Побудуємо P_{temp} – множина, де кожен елемент p_i^j популяції P_i зустрічається $clones_i$ разів

8: **for** $d_{now} = 1.. \frac{\text{кількість елементів в } P_{temp}}{2}$ **do**

9: Візьмемо з рівною ймовірністю два елемента з множини P_{temp} два вектори з P_i r_0, r_1

10: Отримаємо r'_0, r'_1 після використання оператора кросингвера до r_0, r_1 .

11: Застосуємо оператор мутації з ймовірністю δ до r'_0 та r'_1

12: Додамо r'_0, r'_1 у множину дітей

13: **end for**

14: Обчислимо значення f від для потомків та батьків

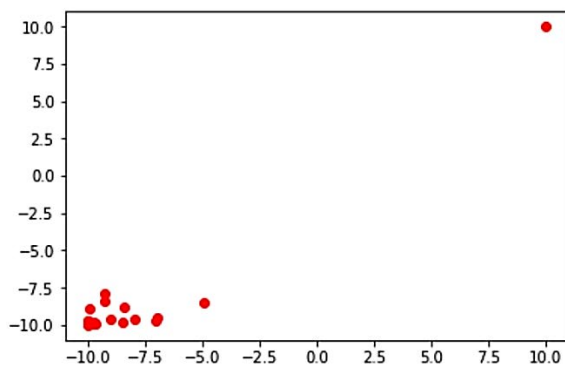
15: P_{t+1} = множина N найкращих з батьків та дітей

16: **end for**

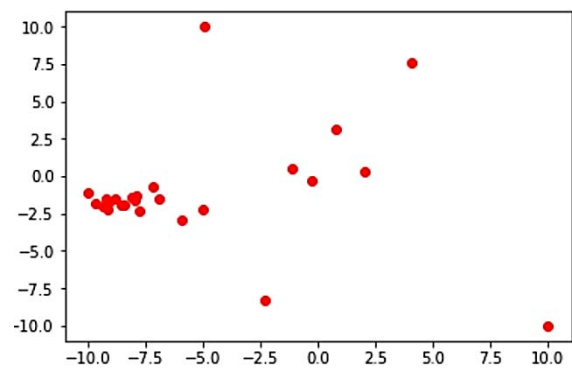
Зауваження: Для використання операторів мутації та кросингвера до p_i^j завжди застосовується двійковий запис числа.

K-means. Для цього алгоритму був використаний стандартний метод із бібліотеки SciPy для мови програмування Python [8]. Згідно з цим алгоритмом на його початку обираються випадковим чином стільки точок у просторі, скільки буде кластерів $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$. Далі для кожної точки початкової множини, знаходимо найближчу точку з множини C . Після цього початкову множину точок ділимо на k підмножин, кластерів, за найближчою точкою з множини C . Далі кожну точку з множини C замінюємо на центроїд точок відповідного кластеру. Такі дії виконуємо доки точки в множині C не будуть змінюватися, або майже не будуть [9].

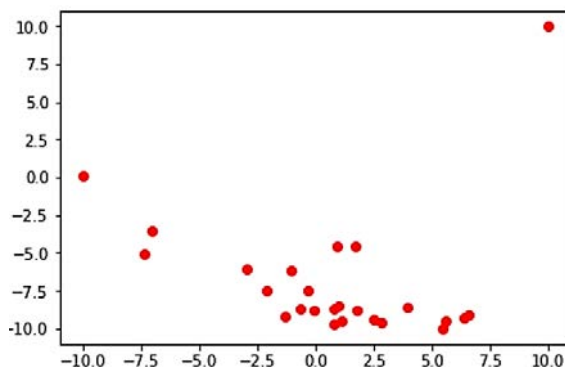
Метод найближчого сусіда або метод одиначного зв'язку. Тут використано стандартний метод



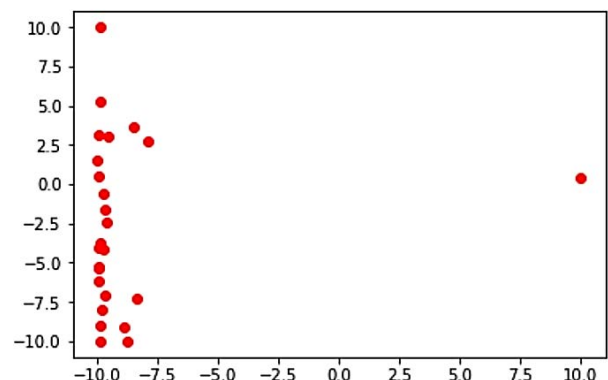
По осі X – Експорт (тис. доларів США)
По осі Y – Імпорт (тис. доларів США)



По осі X – Середня чисельність населення (осіб)
По осі Y – Міграційний приріст (осіб)



По осі X – Природний приріст (осіб)
По осі Y – Доходи (млн. грн.)



По осі X – Імпорт (тис. доларів США)
По осі Y – Кількість неформально зайнятого населення (тис. осіб)

Рис. 1. Двовимірні проекції набору даних

із бібліотеки SciPy для мови програмування Python [10]. За цим алгоритмом на його початку кожна точка являє собою окремий кластер. Далі на кожному кроці, кластери з найменшою відстанню між ними поєднуються в один кластер. Такі дії виконуються доки не буде досягнуто бажаної кількості кластерів [11].

Гіперпараметри для експерименту

Гіперпараметри для алгоритмів кластеризації. Для всіх алгоритмів було виконано 2000 ітерацій, тобто $T = 2000$. Кількість кластерів k змінювалось від 2 до 9. Розмірність простору $d = 10$. Розмір популяції $N = 100$.

Гіперпараметри для еволюційної стратегії: кількість батьків $\mu = N$; кількість дітей $\lambda = 7 * N$.

Гіперпараметри для алгоритму диференціальної еволюції: $CR = 0,5$; $F = 0,04$.

Гіперпараметри для генетичного алгоритму: розмір популяції $N = 100$; точність використовується для знаходження кількості бітів, необхідних для кодування $\epsilon = 1e-3$; ймовірність мутації $\delta = 0,001$.

Гіперпараметри для імунного алгоритму. Точність використовується для знаходження кількості бітів, необхідних для кодування $\epsilon = 1e-3$. Ймовірність мутації $\delta = 0,001$; $max_{\text{вклад унікальності}} = 1$; $k_{\text{унікальність}} = 1$; $k_{\text{якість}} = 10$.

Зауваження: Значення гіперпараметрів було знайдено експериментальним шляхом.

Результати дослідження.

Формування набору даних. Для кожного регіону України було взято 10 політико-економічних показників: середня чисельність постійного населення у 2017 році (осіб); міграційний приріст, скорочення (осіб); природний приріст, скорочення (осіб); доходи населення по регіонах

України (млн грн.); наявний дохід у розрахунку на одну особу (грн.); заборгованість із виплати заробітної плати станом на початок 2018 року (млн грн.); капітальні інвестиції (млн грн); експорт (тис. доларів США); імпорт (тис. доларів США); кількість неформально зайнятого населення віком 15–70 років (тис. осіб). Після нормалізації значення кожного з них стало в інтервалі $[-10; 10]$.

З метою проведення розрахунків у роботі використано набір даних, побудований за даними з веб-сайту Державної служби статистики України за 2017 рік [1]. Оскільки цей набір даних багатовимірний, то розглянемо декілька двовимірних його проєкцій, отриманих після нормалізації (рис. 1).

Окрім основного набору даних, наведеного вище, було згенеровано двовимірний набір даних з явно вираженими центроїдами. Для цього було випадково згенеровано 7 випадкових двовимірних векторів, причому кожна з координат цих векторів знаходиться в інтервалі $[-30; 30]$. Потім кожен з цих 7 векторів використовується як математичне сподівання для нормального розподілу з $\sigma = 4,5$. Генеруємо по 50 точок на кожен з них. Отриманий набір даних є допоміжним, і будемо його використовувати для порівняння властивостей алгоритмів. На рис. 2 й зображено цей допоміжний набір даних.

На рис. 3 показані залежності мінімального значення функції f_{min} від кількості ітерацій для алгоритму диференціальної еволюції (3а) і генетичного алгоритму (3б). З цього рисунка ми бачимо, що при ітераціях, більших 250 для алгоритму диференціальної еволюції і більших 80

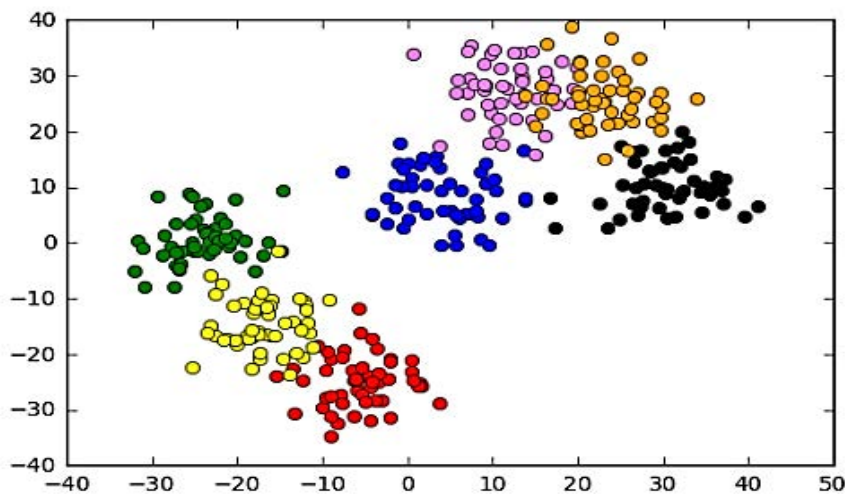


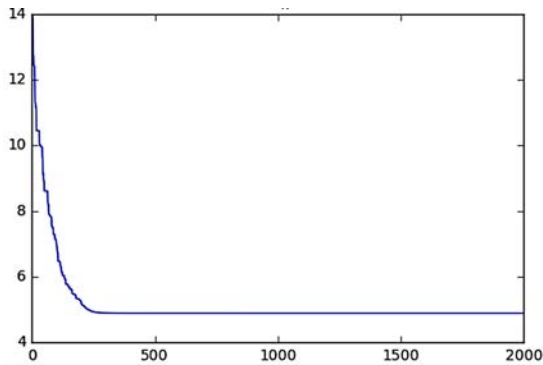
Рис. 2. Допоміжний набір даних

для генетичного алгоритму, мінімальне значення функції f_{min} стабілізується.

На рис. 4 наведено залежності відношення приросту

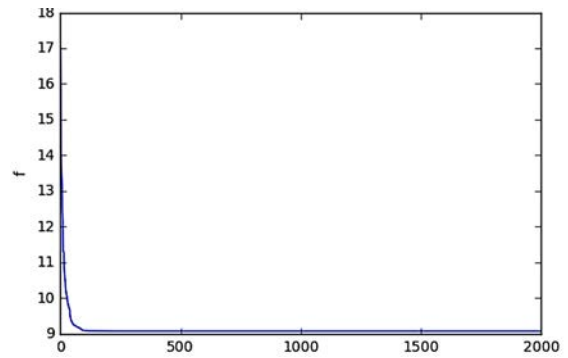
$$\left(\frac{f_{min}(num_clusters+1)}{f_{min}(num_clusters)} \right)$$

від кількості кластерів, отримане 6 різними алгоритмами. Коли приріст менше за 1, то f_{min} зменшується зі збільшеннями кількості кластерів, тобто розв'язок покращується. Коли приріст більше за 1, то розв'язок погіршується. Коли він рівний 1, то зі збільшенням кількості кластерів розв'язок не покращується, зазвичай це проявляється, коли є кластери без елементів.



По осі X – кількість ітерацій
По осі Y – f_{min}

Рис. 3а. Алгоритм диференціальної еволюції, $k=9$



По осі X – кількість ітерацій
По осі Y – f_{min}

Рис. 3б. Генетичний алгоритм, $k=2$

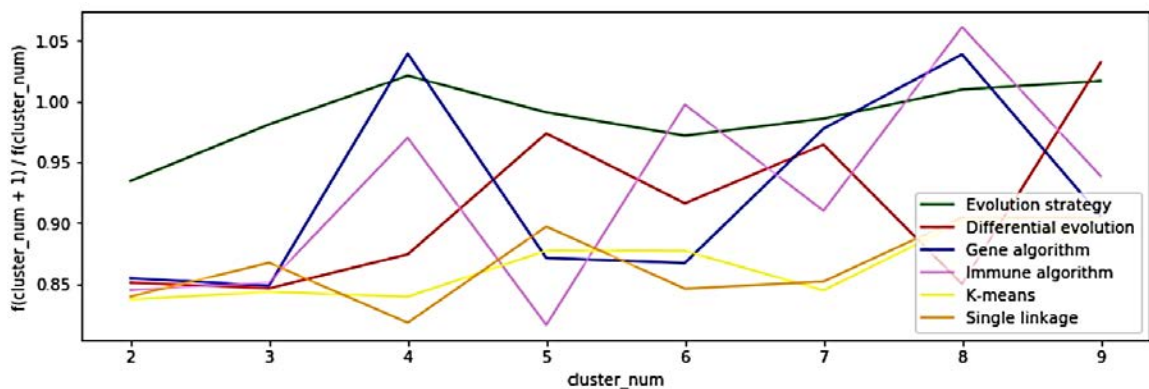


Рис. 4. Відношення приросту від кількості кластерів

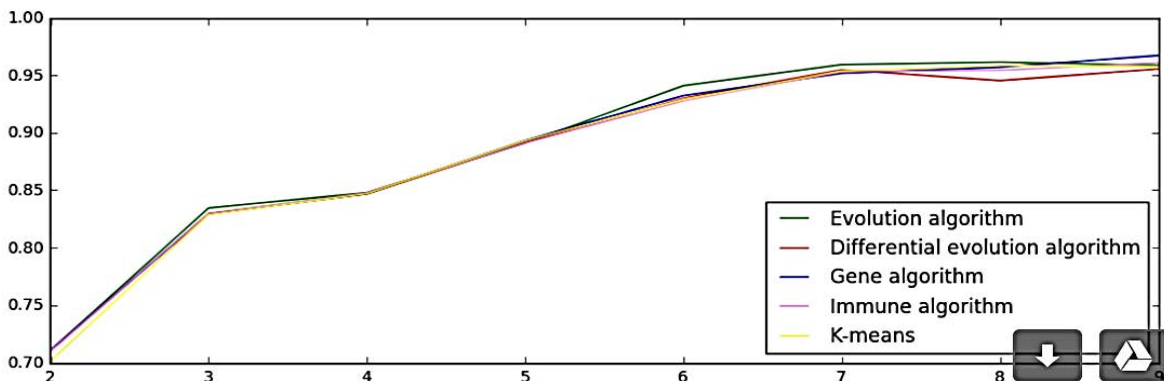


Рис. 5. Приріст на допоміжному наборі даних

Приріст на рис. 4 «стрибає» через те, що набір даних складний для алгоритмів кластеризації з відносно великою кількістю вимірів і невеликою кількістю даних. Розглянемо залежності приросту

$$\left(\frac{f_{\min(\text{num_clusters}+1)}}{f_{\min(\text{num_clusters})}} \right)$$

від кількості кластерів на допоміжному наборі даних для декількох алгоритмів (рис. 5).

На рис. 6 наведено залежності f_{\min} від кількості кластерів, отримані 6 різними алгоритмами.

Як можна бачити з рис. 5–6, еволюційні методи не встигають знайти максимум. Також про це свідчить те, що з якогось моменту з'являються кластери без елементів. Але для невеликих k ($k < 5$) результати еволюційних алгоритмів дають досить пристойні результати. Особливо добре себе показав метод диференціальної еволюції. Він є швидким та дає хороші результати.

Загалом розподіли на кластери були хороші, бо регіони, які потрапили в один кластер, і справді були подібні за економічною ситуацією, а ще часто навіть знаходяться поряд. Також це свідчить про те, що датасет, сформований на початку, є якісним. Наприклад, один з розподілів, сформований імуниним алгоритмом для кількості кластерів $k = 5$, виглядатиме таким чином:

1. {Донецька, Луганська}
2. {Дніпропетровська, Київська, Харківська}
3. {Волинська, Житомирська, Закарпатська, Кіровоградська, Миколаївська, Полтавська, Сумська, Тернопільська, Херсонська, Хмельницька, Черкаська, Чернівецька, Чернігівська}
4. {Вінницька, Запорізька, Івано-Франківська, Львівська, Одеська, Рівненська}
5. {м. Київ}

Розглянемо ще декілька двовимірних проекцій отриманих кластеризацій (рис. 7).

Відмітимо, що візуально важко оцінювати якість кластеризації в багатовимірному просторі, тому розглянемо один з результатів на допоміжному наборі даних для $k=4$ та використаємо генетичний алгоритм (рис. 8).

З рис. 7–8 видно, що генетичний алгоритм показав хороші результати як на основному наборі даних, так і на допоміжному. Причому на допоміжному вже можна оцінити якість і візуально.

При розрахунках було здійснено 2 000 ітерацій, що є, наскільки нам відомо, достатньо багато. Це було зроблено, щоб оцінити можливість алгоритмів на такому специфічному датасеті, коли мало даних та багато вимірів. У протилежному випадку, на інших датасетах, де вимірів було, наприклад, лише 2, але точок більше 1000, еволюційні алгоритми зійшлися за 100 ітерацій. Саме тому одне з покращень результатів, що пропонується в роботі, це використовувати алгоритм лише для одного вектору центрів на одній ітерації, а інші координати вважати фіксованими. На наступній ітерації зафіксувати наступний вектор центрів. Ще одне покращення – це зменшення розмірності простору та використання алгоритмів для отриманих векторів меншої розмірності. Слід звернути увагу, що результати при великій кількості кластерів погані, бо еволюційні алгоритми намагаються відійти від розв'язку при великій кількості напрямків. Але результати хороші вже майже для всіх точок, що вказує на те, що алгоритм рідко може «вгадати» правильний напрямок та покращити результат. Саме тому вектор результатів рідко змінюється, хоча деякі кластери все ще порожні.

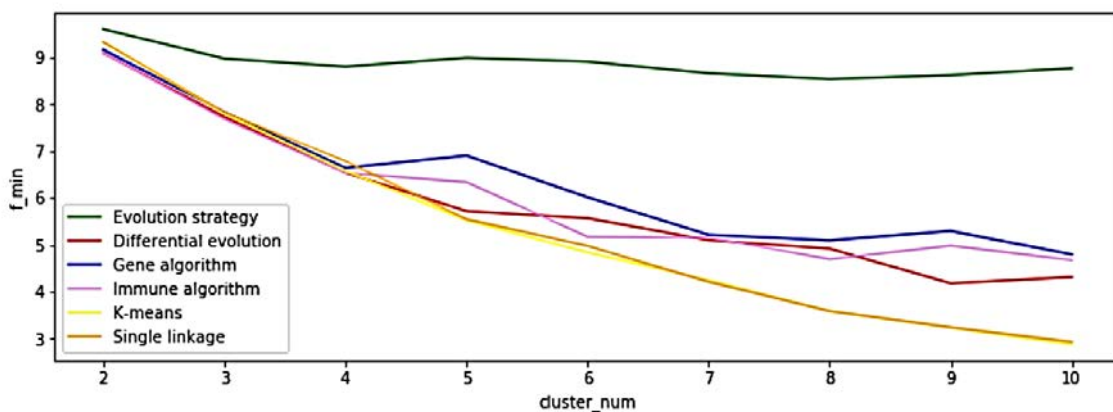
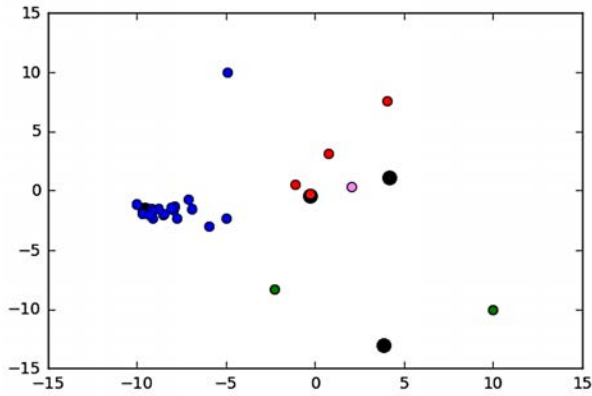
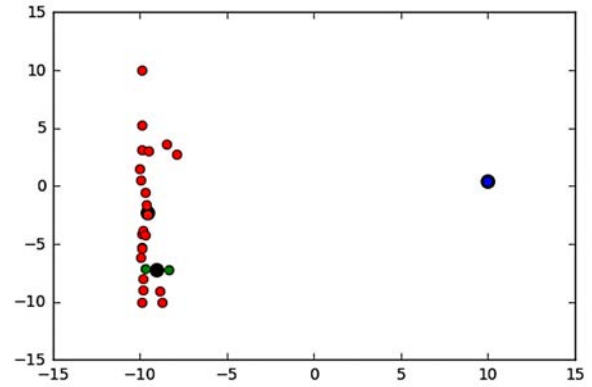


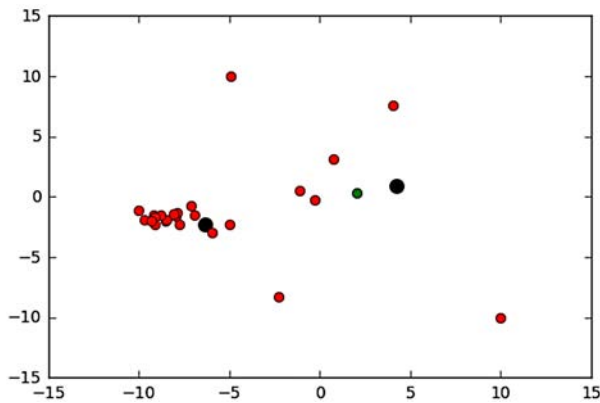
Рис. 6. Зменшення цільової функції



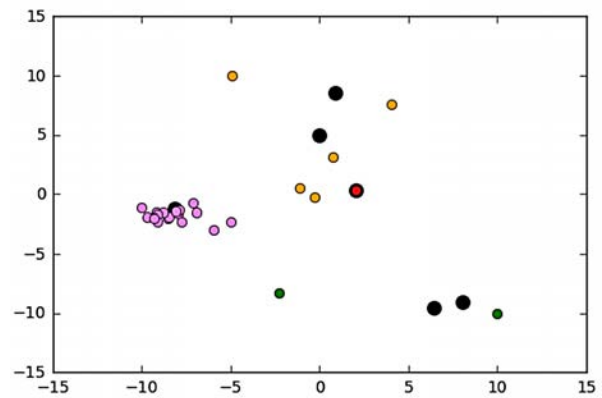
Алгоритм диференціальної еволюції, $k=4$
 По осі X – Середня чисельність населення (осіб)
 По осі Y – Міграційний приріст (осіб)



Імунний алгоритм, $k=3$
 По осі X – Імпорт(тис. доларів США)
 По осі Y – Кількість неформально зайнятого насе-
 лення (тис. осіб)



Еволюційний алгоритм, $k=2$
 По осі X – Середня чисельність населення (осіб)
 По осі Y – Міграційний приріст (осіб)



Генетичний алгоритм, $k=6$
 По осі X – Середня чисельність населення (осіб)
 По осі Y – Міграційний приріст (осіб)

Рис. 7. Результати кластеризації

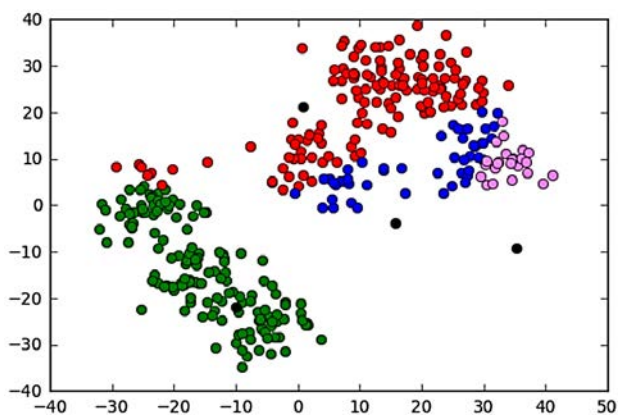


Рис. 8. Результати кластеризації
 на допоміжному наборі даних

Висновки. В статті розглянута задача кластеризації регіонів України з метою проведення ефективної регіонально орієнтованої економічної політики. Зроблена математична постановка задачі. Наведено опис декількох алгоритмів кластеризації для розбиття регіонів України на групи за соціально-економічними показниками та використано їх при розв'язанні задачі. У статті для експерименту було взято 10 показників для кожного із регіонів. Побудовано графіки залежності результатів від ітерації. Зроблено порівняння та аналіз результатів, одержаних різними алгоритмами, залежно від числа кластерів. Результати досліджень свідчать про те, що датасет, сформований на початку експерименту, є якісним.

Список літератури:

1. Веб-сайт Державної служби статистики України. 2017. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
2. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы / В.Е. Снитюк. Киев, 2008. 367 с. ISBN 978-966-2200-09-6
3. Multi-Objective Optimization using Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art / [Efr'én Mezura-Montes, Margarita Reyes-Sierra, Carlos A. Coello Coello] 28 с.
4. Искусственные иммунные системы и их применение / Под ред. Д. Дасгупты. Пер. с англ. под ред. А.А. Романюхи. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 344 с. ISBN 5-9221-0706-2.
5. Implementation of Immunological Algorithms in Solving Optimization Problems / [Petar Čisar, Cara Dušana, Sanja Maravić Čisar, Branko Markoski] – Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 11, No. 4, 2014 P: 225-239. URL: https://www.uni-obuda.hu/journal/Cisar_Maravic-Cisar_Markoski_50.pdf.
6. Using Genetic Algorithms to Explore Pattern Recognition in the Immune System / [Stephanie Forrest, Brenda Javornik, Robert E. Smith, Alan S. Perelson]. 1993 P. 31. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/f392/c26fd80a321d773eff40437fcec0edbf5982.pdf>.
7. Immune Network: An Example of Complex Adaptive Systems, Debashish Chowdhury. 1998. P. 20. URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9803033.pdf>.
8. Веб-сайт з документацією до використання sklearn.cluster. K-Means. URL: <http://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>.
9. Clustering using K-means algorithm, Firdaouss Doukkali. URL: <https://towardsdatascience.com/clustering-using-k-means-algorithm-81da00f156f6>.
10. Веб-сайт з документацією до використання scipy.cluster.hierarchy.linkage. URL : <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.cluster.hierarchy.linkage.html#scipy.cluster.hierarchy.linkage>.
11. Метод ближайшего соседа или метод одиночной связи. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/autoclassification/single-link.html>.

Snytyuk V.Ye., Soroka P.M., Tkachenko O.V. THE DISTRIBUTION PROBLEM OF REGIONS OF UKRAINE INTO CLUSTERS FOR THE PURPOSE OF CONDUCTING REGIONALLY ORIENTED ECONOMIC POLICY

The problem of clustering is one of the most popular tasks of machine learning today. It is a task to divide objects into groups so that the objects in the same group are as similar as possible and the objects from different clusters differ significantly. This task facilitates data processing and has many applications in real life.

The article deals with the problem of the partitioning of regions of Ukraine into clusters for the purpose of conducting regionally oriented economic policy. A mathematical statement of the problem is made in which each vector describes a specific region of Ukraine according to certain characteristics. The paper considers that all the features are equilibrium, so before starting the solution, the data is normalized using linear transformation. A function that is minimized in the clustering problem using a normalized dataset is presented.

The article deals with the following clustering algorithms: evolutionary strategy, differential evolution algorithm, genetic algorithm, immune algorithm, K-means, nearest neighbor method. They were used to solve the problem for the distribution of the regions of Ukraine into groups by social and economic indicators. For the experiment, 10 indicators for each region were taken. The calculations used a normalized dataset, based on data from the website of the State Statistics Service of Ukraine for 2017. The studies use two-dimensional projections of this multidimensional data set and ancillary dataset generated.

Graphs of the results of the minimum value of the function f_{\min} on the number of iterations for the differential evolution algorithm and the genetic algorithm are constructed. It is shown that at iterations greater than 250 for the differential evolution algorithm and greater than 80 for the genetic algorithm, the minimum value of the function f_{\min} stabilizes. Comparison and analysis of the results of studies by the number of clusters obtained by different algorithms are made. It is shown that for the number of clusters equal to 5 evolutionary algorithms give quite decent results.

Key words: region, cluster, clustering, economic policy, algorithm, iteration.

Струзік В.А.

«Інженер-програміст ТОВ «ПЕРША УКРАЇНСЬКА ЛІЗИНГОВА КОМПАНІЯ»»

Грибков С.В.

Національний університет харчових технологій

Чобану В.В.

Національний університет харчових технологій

СПЕЦИФІКАЦІЯ СЕМАНТИЧНОГО ВЕРСІОНУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ

У статті проаналізовано необхідність використання версіонування під час розробки та підтримки програмного забезпечення. Описані наявні схеми версіонування та особливості кожної з них. Окремо виділено семантичне версіонування, тому що ця схема є найпопулярнішою серед компаній, що займаються розробкою програмного забезпечення. У статті розглянуто основні правила зміни версії програмного продукту відповідно до специфікації семантичного версіонування.

У статті проведено класифікацію баз даних за способом доступу до даних, а саме: файл-серверні, клієнт-серверні та вбудовані. Так само як програмний код, база даних в процесі розробки та підтримки зазнає змін. Для можливості контролювати ці зміни важливим є впровадження версіонування бази даних. Проте сьогодні не існує загальновідомої специфікації версіонування баз даних, зазвичай правила версіонування встановлюються на рівні компанії або команди розробників у вигляді маніфесту. Тому автори статті запропонували специфікацію версіонування баз даних, побудовану на базі семантичного версіонування. У статті наведені основні рекомендації щодо зміни версії бази даних відповідно до специфікації семантичного версіонування баз даних, а також показано вплив тих чи інших змін елементів бази даних на стан версії.

Детально проаналізовано наявні схеми версіонування, а саме: послідовність номеру, десятковий дріб, послідовність чисел, буква як молодша версія, вказівка стадії розробки, алфавітно-цифрова назва, дата, внутрішні версії. Також проаналізовано доцільність використання схеми версіонування та наведено інформацію щодо проблем, з якими може стикнутись команда розробників у разі відмови від використання версіонування. Детально описана найпопулярніша специфікація версіонування програмного коду – специфікація семантичного версіонування, та подано її основні положення.

Ключові слова: версіонування, база даних, специфікація семантичного версіонування, семантичне версіонування бази даних, система управління базою даних.

Постановка проблеми. Під час розробки програмне забезпечення постійно еволюціонує, адже додаються нові функції та виправляються знайдені помилки. Щоб полегшити оновлення програмного продукту всі зміни найчастіше об'єднують та випускають єдиним пакетом. Проте сьогодні практикується впровадження декількох релізів одного й того самого програмного забезпечення, тому важливо розуміти, яка функціональність та які помилки присутні в кожному конкретному випуску. Щоб відрізнити ці випуски, команди розробників використовують схеми версіонування для їх маркування. Варто зазначити, що важливим є версіонування не лише програмного коду, а й версіонування схеми бази даних. Найпопулярнішою схемою версіонування програмного коду сьогодні є семантичне версіонування, проте не існує специфікації версіонування баз даних, у

зв'язку з чим кожній компанії, що займається розробкою програмного забезпечення, доводиться вводити власний регламент версіонування баз даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автором роботи [1] створено специфікацію семантичного версіонування, яка описує набір правил та вимог, що визначають те, як саме призначається та збільшується значення версії програмного продукту. Автором зазначено, що відповідно до специфікації семантичного версіонування, номери версій і спосіб їх зміни передають інформацію про вихідний код і про те, що змінено від попередньої до нової версії. Проте інформація щодо версіонування баз даних у даній специфікації відсутня.

Постановка завдання. Основною ціллю статті є створення специфікації «семантичне

версіонування бази даних» для ефективного контролю зміни схеми бази даних.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Необхідність використання версіонування

Версіонування є невіддільним інструментом протягом всього процесу розробки програмного забезпечення. Всі сучасні компанії, які займаються розробкою програмного забезпечення, впроваджують схеми версіонування, які націлені не лише на визначення та організацію роботи команди розробників, а й на встановлення взаємозв'язку між компанією та користувачами. Шляхом використання маркування версії програмного продукту розробники можуть легко донести до користувачів, чого саме очікувати в будь-якому конкретному випуску. Правильно обрана схема версіонування повинна надати користувачам можливість зрозуміти, які функції та помилки присутні в тому випуску, який використовується. Коли користувач стикається з певною помилкою у відповідній версії програмного продукту, він може:

- оновити програмний продукт до новішої версії, в якій ця помилка виправлена;
- у разі відсутності виправлень, звернутися до компанії розробника з чітким формулюванням помилки та дочекатися нової версії.

У багатьох різних схемах версіонування є свої особливості, але найчастіше основною метою є надання інформації про різницю між двома різними версіями.

Є багато підходів до версіонування: послідовність номеру, десятковий дріб, послідовність чисел, буква в ролі молодшої версії, вказівка стадії розробки, алфавітно-цифрова назва, дата, внутрішні версії тощо.

Використання схеми «послідовність номеру» передбачає нумерацію програмних додатків числами 1, 2, 3 тощо. Послідовність цих номерів можуть відповідати якому-небудь технічному лічильнику, наприклад, номеру версії в системі управління версіями (англ. Version Control System, VCS або Revision Control System). На цей час таким чином позначають лише ті програмні продукти, що оновлюються достатньо рідко, проте стабільно. В таких програмах зазвичай невеликі технічні зміни не описуються наявно, лише під час перегляду через, наприклад, меню «Про програму». У разі випуску версії з новою функціональністю, що недостатньо значна для нової версії, можуть використовувати позначення десятковим дробом.

Першим способом нумерації версій, що розділяв невеликі та серйозні зміни, стала схема

«десятковий дріб». Номер версії в такому разі – це десятковий дріб в американському форматі, тобто розділений крапкою. Нумерація йде таким чином:

- перша версія має номер 1.0;
- наступна версія – 1.1;
- версія, що зазнала незначних змін – 1.11, у разі внесення нової функціональності – 2.0;
- час від часу розробники можуть «перескочити», наприклад, з версії 2.0 відразу до версії 2.5, щоб вказати на додавання декількох значних змін у програмі, що недостатньо значні для переходу до версії 3.0;
- для версій, що виходять до офіційного релізу, використовуються значення менше 1, наприклад, 0.1 або 0.5.

Версія в схемі «послідовність чисел» має складатися з декількох чисел (найчастіше трьох), розділених крапкою, де перше значення – старша версія, друге – молодша, третє – дрібні зміни. У разі збільшення одного із значень всі числа, що йдуть після збільшеного, обнулюються. Подібна схема використовується в специфікації семантичного версіонування. Крім того, іноді четвертим числом додають номер пакету з наскрізною нумерацією – це значення може збільшуватись на одиницю з кожним випуском або обирається за певним технічним лічильником. Так само як і у варіанті версіонування десятковим дробом, попередні випуски мають нуль як перше значення версії (0.1 або 0.5).

Іноді під час використання схеми «буква в ролі молодшої версії» замість третього числа використовується буква. Це може вказувати, наприклад, на те, що програма не змінила функціональності, проте було виправлено певні помилки.

У разі варіанту версіонування «вказівка стадії розробки» до номеру версії додається стадія розробки: альфа-версія (alpha), бета-версія (beta), випуск-кандидат (release candidate), кінцевий випуск (general available), виправлення помилок (service pack) тощо. Є різні види схеми позначення стадії розробки, наприклад третє число може означати:

- 0 – альфа;
- 1 – бета;
- 2 – випуск-кандидат;
- 3 – кінцевий випуск.

Всередині компанії також може додаватись стадія розробки. Проте при офіційному випуску, що отримує кінцевий користувач, цього немає з метою виключити плутанину серед тестувальників.

Найчастіше «алфавітно-цифрова назва» використовується для програмного забезпечення

з довгою історією та версіями, що рідко виходять. Наприклад, коли рахунок версій зайшов надто далеко та потрібно його обнулити: Adobe Photoshop 7.0 < CS < CS2 < ... < CS6 < CC < CC 2014. Іноді на доповнення до звичайної версії використовуються алфавітно-цифрова підназва: Ubuntu 9.04 Jaunty Jackalope, Embarcadero Delphi 10.2 Tokyo.

Варіант версіонування «дата» зазвичай використовується для версіонування програмного забезпечення, що рідко оновлюються. У разі використання дати в нумерації версії варто користуватись схемою ISO «рік-місяць-день» (дефіс можна викинути), щоб полегшити порівняння версій.

Часто програмний продукт має і публічну (маркетингову) назву, і так звану «внутрішню версію». Внутрішня версія складається за правилами. Зазвичай внутрішню версію використовують у випадках, коли виникає помилка і необхідно вказати розробникам, у якій саме версії виникла помилка.

Підхід використаний у системі комп'ютерної верстки TeX, що був запропонований Дональдом Кнутом, полягає у вказівці версії відповідно до значень наближеними до числа π : $3.0 < 3.1 < 3.14$ тощо. Номер останнього стабільного випуску – 3.141592653.

При виборі варіанту версіонування важливо враховувати таке [2]:

- версія повинна мати сенс;
- версія повинна відображати сумісність;
- версії мають бути легко порівнюваними;
- версії мають бути зрозумілими для користувачів.

Специфікація семантичного версіонування

Найпопулярнішою специфікацією версіонування є семантичне версіонування. Автором специфікації семантичного версіонування є Том Престон-Вернер, засновник Gravatars та співзасновник GitHub. Відповідно до неї, версія програмного продукту містить у собі три числа, розділених крапкою, де кожне з чисел (X.Y.Z) має відповідну назву – мажорна, мінорна, патч.

Патч-версія повинна збільшуватись, якщо в програмний продукт були внесені зворотно сумісні баг-фікси. Відповідно до [1] баг-фікс означає внутрішні зміни, які виправляють певну помилку поведінки системи.

Мінорна версія повинна збільшуватись, якщо в систему була внесена певна зворотно сумісна функціональність, а також якщо деяка функціональність відмічена як застарівша. Мінорна версія також може збільшуватись у разі реалізації

нової функціональності або удосконалення в приватному коді. У разі збільшення мінорної версії патч-версія повинна обнулитися.

Мажорна версія збільшується у разі внесення зворотно несумісної функціональності. Вона також може включати в себе зміни, які характерні для мінорної версії та патч-версії. У разі збільшення мажорної версії мінорна версія та патч-версія повинні обнулятися.

Також можливо позначити передрелізню версію, додаючи безпосередньо після патч-версії дефіс та ідентифікатор передрелізної версії, наприклад: 1.0.0-alpha, 1.0.0-0.3.7. Крім того, можна також позначити метадані у версії – необхідно поставити знак плюс після номеру патч-версії або передрелізної версії та додати ідентифікатор метаданих. В обох випадках ідентифікатори можуть містити лише алфавітно-цифрові символи ASCII та дефіс і можуть бути розділені крапкою.

Класифікація баз даних за типом їх розміщення

Важливою частиною інформаційної системи є база даних, але вона не може існувати без СУБД (системи управління базами даних). Едгар Ф. Кодд запропонував такі функції та сервіси, які повинні мати СУБД загального призначення [3]:

- зберігання, пошук та оновлення даних;
- доступний для користувачів каталог або словник даних, що описують метадані;
- підтримка транзакцій та конкурентного доступу;
- засоби для відновлення бази даних у разі її пошкодження;
- підтримка авторизації для надання доступу на читання та запис;
- можливість віддаленого доступу;
- підтримка обмежень для забезпечення відповідності даних, що зберігаються, до певних правил.

Класифікувати СУБД можна за різними критеріями, але доцільно виділити класифікацію за способом доступу до бази даних, а саме вони розділяються на файл-серверні, клієнт-серверні та вбудовані.

Файл-серверні СУБД. В цьому разі база даних знаходиться централізовано на файл-сервері. Доступ СУБД до даних виконується через локальну мережу. Зчитування та оновлення виконується з використанням блокування файлів. Такі СУБД застосовуються зазвичай у локальних додатках, що використовують функції управління базами даних, а також у системах з низькою інтенсивністю обробки даних і низьким піковим навантаженням на базу даних.

Перевагою цієї архітектури є низьке навантаження на процесор файлового серверу.

Проте файл-серверні СУБД мають велику кількість недоліків:

- низька ефективність роботи в рамках комп'ютерної мережі;
- складність або неможливість централізованого управління;
- складність або неможливість таких важливих характеристик, як висока надійність, висока доступність та висока безпека.

На цей час використання файл-серверної технології недоцільно, адже така технологія вважається застарілою.

Клієнт-серверні СУБД розміщуються на сервері разом з базою даних і виконують доступ до бази даних безпосередньо, в монопольному режимі. Всі клієнтські запити на обробку даних виконуються клієнт-серверною СУБД централізовано. Недоліком таких СУБД є високі вимоги до серверу. Натомість клієнт-серверні СУБД мають достатньо переваг:

- висока ефективність у рамках комп'ютерної мережі;
- зручність централізованого управління;
- зручність забезпечення високої надійності, високої доступності та високої безпеки.

Вбудована СУБД. Така система управління базами даних може постачатися як частина якогонебудь програмного продукту та не потребує процедури самостійного встановлення. Вбудовані СУБД призначені для локального збереження даних своєї системи та не розраховані на колективне використання в мережі.

Фізично вбудована СУБД зазвичай реалізується у вигляді бібліотеки. Доступ до даних з боку додатка може відбуватися через SQL або через спеціальні програмні інтерфейси. Прикладом використання вбудованих СУБД є поштові клієнти та сервіси обміну повідомленнями, медіапрогравачі тощо. Зазвичай у таких СУБД відсутні функції авторизації, адже більше ніж одного користувача бази даних для роботи не потрібно. Для ізоляції транзакції використовується блокування файлів через стандартні механізми операційної системи. Надійність бази даних залежить від надійності бібліотеки СУБД та файлової системи, на якій база даних знаходиться. Популярні вбудовані СУБД зазвичай добре протестовані, а сучасні файлові системи достатньо надійні, проте є багато способів втратити дані, тому такі рішення поступаються за надійністю клієнт-серверним СУБД.

Специфікація семантичного версіонування баз даних

Авторами статті запропоновано перелік правил та рекомендацій, керуючись якими можна легко здійснювати версіонування бази даних. Для цього переліку правил, в основі яких є специфікація семантичного версіонування, авторами запропоновано назву «семантичне версіонування баз даних».

Зміни в схемі бази даних доцільно розподілити на групи операцій, що виконуються на переліку елементів схеми, таблицях, полях таблиць, представленнях, збережуваних процедурах (функціях), тригерах.

На переліку елементів схеми можливі тільки дві операції: додавання нового або видалення наявного елементу. Додавання нового елементу є зворотно сумісною операцією, що відповідно до специфікації семантичного версіонування призводить до інкременту мінорної версії. Видалення елементу є зворотно несумісною операцією, що, відповідно, призведе до інкременту мажорної версії.

Над полями таблиць виконуються операції додавання, видалення, зміни. Попередньо варто зазначити, що визначення поля таблиці складається з назви поля, його типу даних, можливості збереження NULL-значення та наявності значення за замовчуванням. У разі додавання нового поля до таблиці виникає зворотно несумісна зміна структури, тому відбувається інкремент мажорної версії, і тільки якщо додане поле має значення за замовчуванням, інкремент відбудеться за мінорною версією. Видалення стовпця в будь-якому разі є зворотно несумісною операцією, тому інкремент відбудеться у мажорній версії схеми бази даних. Під час редагування зміну кожного зі складників визначення поля таблиці варто виконувати окремим DDL-запитом. Зміну назви поля таблиці можна представити у вигляді додавання нового поля та видалення старого, а у разі видалення інкремент виконується за мажорною версією, тому і перейменування поля призводить до зміни за мажорною версією. У разі зміни типу даних необхідно враховувати, що початковий та кінцевий типи повинні бути сумісними. Сумісність типів описано в стандарті ISO/IEC 9075, останньою редакцією якого на момент написання статті є ISO/IEC 9075:2016 Information technology – Database languages – SQL, а саме у пункті 6.13 <cast specification> частини 2 Foundation (SQL/Foundation). Якщо типи є сумісними, то дану зміну можна виконувати з інкрементом мінорної версії, або патч-версії,

якщо виправляється помилка вибору типу даних для поля. Додаючи NULL-значення, виникає розширення множини інваріантів збережуваних типів полем таблиці і, як наслідок, цю операцію необхідно виконувати з інкрементом мінорної версії у разі додавання нової функціональності, або патч-версії у разі виправлення помилки проектування бази даних. Відповідно, у разі видалення NULL-значення інваріанти збережуваних типів даних колонки звужуються, що призводить до втрати зворотної сумісності, тому ця зміна схеми бази даних має виконуватись із інкрементом мажорної версії. Найчастіше розробники наявні NULL-значення прирівнюють до значення за замовчуванням. Аналогічним чином виконується додавання або видалення значення за замовчуванням. У разі видалення втрата зворотної сумісності викликана необхідністю явно вказувати значення поля у INSERT-запитах.

Операції додавання або видалення обмежень виконуються над полями та таблицями. У разі додавання обмежень виникає звуження множини варіантів значень даних, що можуть бути збережені у таблиці чи полі, тому зміни виконуються з інкрементом мажорної версії. А у разі видалення обмежень, розширюється набір варіантів значень, що зберігаються, тому зміни вносяться з інкрементом мінорної версії, або патч-версії, у разі виправлення помилки.

Вплив на версію бази даних змін в представленнях проходить аналогічно до змін полів таблиці. Тобто будь-яке додавання поля, розширення можливих значень поля, зворотно сумісна зміна типу даних поля – всі операції, що не порушують зворотної сумісності, – виконуються з інкрементом мінорної версії, або патч-версії. А своєю чергою операції, що призводять до порушення сумісності, мають бути виконані з інкрементом мажорної версії.

Розглядаючи вплив операцій над збережуваними процедурами на версію схеми бази даних, можна застосувати один із SOLID-принципів об'єктно-орієнтованого програмування, а саме принцип підстановки Барбара Ліскова. Цей принцип декларує поняття заміщення: якщо S підтип T, тоді об'єкти типу T у програмі можуть бути заміщені об'єктами типу S без будь-яких змін бажаних властивостей цієї програми. Принцип підстановки Барбара Ліскова близько стосується методології проектування за контрактом і веде до

деяких обмежень на те, як контракти можуть взаємодіяти з наслідуванням [4]:

- передумови не можуть бути посилені в підтипі;
- післяумови не можуть бути послаблені в підтипі;
- інваріанти базового типу повинні виконуватись у підтипі;
- «історичне обмеження»: заборона модифікації стану об'єкта методами підтипу, які відсутні в базовому типі.

Екстраполюючи цей принцип на збережувані процедури, уявляючи, що змінена збережувана процедура є дочірньою до початкової, можна зазначити таке:

- передумовами є перелік, порядок та вимоги до вхідних параметрів;
- післяумовами є перелік, порядок та вимоги до вихідних параметрів;
- збереження поведінки є виконанням «історичного обмеження».

Якщо всі вимоги виконані, то збережена зворотна сумісність при внесенні змін, тому вони вплинуть на версію схеми бази даних інкрементом мінорної або патч-версії. У разі втрати зворотної сумісності зміни необхідно вносити з інкрементом мажорної версії.

Зміна тригерів не впливає на версію бази даних або може позначатися інкрементом мінорної версії у разі автоматичного виконання обов'язкових каскадних операцій.

Загальноприйнята розробниками стратегія видалення будь-яких елементів схеми бази даних відбувається через оголошення елемента застарілим (англ. deprecated) з інкрементом мінорної версії та наступним його видаленням з інкрементом мажорної версії.

Висновки. Авторами статті було запропоновано специфікацію семантичного версіонування баз даних, що включає в себе ряд правил щодо зміни версії схеми бази даних. Дотримання запропонованих правил забезпечує можливість:

- розробникам контролювати зміни у базі даних та порівнювати різні її версії;
- користувачам пересвідчитись в тому, що у разі оновлення бази даних програмні додатки, що її використовують, не втраять своєї працездатності;
- автоматично переходити за змінами в мінорному та патчевому сегменті версій.

Список літератури:

1. Том Престон-Вернер Семантичне Версіонування 2.0.0. URL: <https://semver.org/>.
2. Назаров К. Экстремально предвзятый взгляд на версионирование программных продуктов. URL: <https://www.slideshare.net/racktear/semver>.
3. Connolly T., Begg C. Database Systems – A Practical Approach to Design Implementation and Management. Pearson, 2015, pp. 97–102.
4. Janssen T. SOLID Design Principles Explained: The Liskov Substitution Principle with Code Examples. URL: <https://stackify.com/solid-design-liskov-substitution-principle/>.

Struzik V.A., Hrybkov S.V., Chobanu V.V. SEMANTIC VERSIONING OF DATABASE SCHEMA

Need for versioning in software development and software support is analyzed in the article. Existing versioning schemes and features of each are described here. Semantic versioning is highlighted separately because this scheme is the most popular among software development companies. This article describes the basic rules for changing a software version according to the semantic versioning specification.

The article describes the classification of databases by the access type, namely: file server, client server and embedded. Not only program code has changes in the process of development and support. Database has changes too. It is important to implement database versioning for changes control. However, there are no well-known database versioning specification. Usually versioning rules are applied by the development team as a manifest. Therefore, authors of the article propose the versioning specification of database which is based on semantic versioning. The article provides basic guidelines for changing a database version according the semantic versioning of database schema. There are shown the effect of some changes in a database schemes on the version value of the database.

Existing versioning schemes are analyzed in detail, namely: number of sequences, decimal numbers, incrementing sequences, letter as the lowest part in the version, designating development stage, alphanumeric name, date, internal versions. The article analyzes the appropriateness of using versions and describe the benefits of its usage. In addition, the article provides information about issues that the development team may encounter if they refuse usage of versioning. The most popular software version specification, semantic versioning, is described in detail and main points from its specification are outlined.

Key words: *versioning, database, semantic versioning specification, semantic versioning of database, database management system.*

Терещенко Д.О.

Одеський національний політехнічний університет

Пелих С.М.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ПРОТЯГОМ КАМΠΑНІЇ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Об'єктом дослідження є умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань у контур ВВЕР за нормальних умов експлуатації шляхом оптимізації режимів навантаження реактора та перестановок тепловиділяючих збірок. Запропоновано автоматизовану систему керування властивостями ядерного палива реактора ВВЕР-1000 з урахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ядерного палива і аксіального офсету. Мета роботи – розробка підґрунтя для поліпшення балансу ефективності безпеки експлуатації реакторів типу ВВЕР, запропоновано новий підхід до мінімізації витоків радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР при нормальних умовах роботи, заснований на мінімізації параметру деформаційного пошкодження оболонок твелів; розробка фундаменту автоматизованої системи контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000 з метою забезпечення балансу безпеки та ефективності роботи палива. Роз'яснено синергічну природу методу СЕТ, розробленого для контролю властивостей ядерного палива. Описано два основні методи забезпечення балансу ефективності під час роботи палива реактора ВВЕР-1000 та надано відповідні цільові функції. Запропоновано технологію контролю герметичності оболонок твелів реактору типу ВВЕР, що включає контроль параметрів, які визначають дозу радіоактивного витоку через оболонки твелів у ланцюг реактора за нормальних робочих умов; запропоновано новий метод управління параметрами, що визначають об'єм радіоактивних протікань у перший контур крізь мікротріщини оболонок твелів, за нормальних умов експлуатації реактора, оптимізація режимів навантаження і перестановок ТВЗ реактора на основі цільової функції, що враховує одночасно параметр пошкодження оболонок, глибину вигорання ядерного палива і аксіальний офсет. Показано умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЕР за нормальних робочих умов шляхом оптимізації режиму навантаження реактора та перестановок тепловиділяючих збірок. Запропоновані склад і структура автоматизованої системи керування властивостями палива реактора ВВЕР-1000, що забезпечує баланс між безпекою та економічністю експлуатації ядерного палива.

Ключові слова: автоматизована система керування, реактор ВВЕР-1000, програмний засіб, оболонка твела, мінімізація радіоактивних протікань, параметр пошкодження.

Постановка проблеми. Поточний та передбачуваний стан економіки України передбачає, що суворі вимоги щодо безпеки та ефективності ядерної енергетики будуть постійно актуальними. Ця проблема безпеки та ефективності ядерної енергетики тісно пов'язана з проблемою безпеки та ефективності експлуатації ядерного палива, оскільки оболонка палива насамперед є ключовим бар'єром безпеки під час роботи ядерних реакторів. Беручи до уваги, що досі достеменно невідома причина відмови оболонок твелів у ВВЕР, щоб гарантувати безпеку та ефективність роботи палива, слід розробити складні методи контролю

ймовірності відмови облицювання, враховуючи різні фізичні механізми, що призводять до відмови оболонок твелів, включаючи накопичення пошкоджень [1, с. 30].

Оскільки для нормальних умов експлуатації, включаючи змінні режими завантаження, синергічний метод контролю властивостей ядерного палива (метод СЕТ) дозволяє мінімізувати витік радіоактивних речовин через оболонки палива в ланцюг ВВЕР одночасно з оптимізацією параметрів роботи палива, автоматизована система для контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000, що забезпечить збалансованість

ефективності роботи палива, може бути розроблена на основі методу СЕТ. Хоча деякі проблеми в застосуванні методу СЕТ все ще залишаються невирішеними, наприклад, граничне значення параметра пошкодження оболонок твелів, що відповідає будь-якому виду несправності оболонок, повинно бути обґрунтованим, було зрозуміло, що витік радіоактивних речовин у ланцюг реактору типу ВВЕР може бути мінімізованим у звичайних умовах експлуатації за допомогою автоматизованої системи управління, що оптимізує режими завантаження ВВЕР та перестановки основних вузлів палива, застосовуючи об'єктивну функцію, включаючи параметр деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ЯП і аксіального офсету [2, с. 10–11; 3, с. 219].

Таким чином, для планування та оцінки дослідницького проекту, присвяченого вдосконаленню балансу ефективності ВВЕР за допомогою поліпшення контролю руйнування оболонки палива за рахунок накопичення пошкоджень, виникає наступне питання: яким має бути склад та структура такої перспективної автоматизованої системи для контролю властивостей палива, якщо потрібно реалізувати його на стандартному ядерному енергоблоці з реактором ВВЕР-1000, який зараз використовується в Україні. [6, с. 109]

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка підґрунтя автоматизованої системи контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000 з метою забезпечення балансу безпеки та ефективності роботи палива. Буде роз'яснено синергічну природу методу СЕТ, розробленого для контролю властивостей ядерного палива. Описано два основні методи забезпечення балансу ефективності під час роботи палива реактора ВВЕР-1000 та надано відповідні цільові функції. Нарешті, буде запропоновано склад та структуру перспективної автоматизованої системи контролю властивостей палива ВВЕР-1000.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оскільки параметр пошкодження оболонок твелів є невіддільною характеристикою зростання мікротріщин, ми можемо мінімізувати витік радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР за нормальних умов роботи, включаючи змінні режими завантаження, шляхом мінімізації. Таким чином, ідея полягає у використанні методу СЕТ для мінімізації руйнування оболонок твелів через накопичення пошкоджень за змінного навантаження реактора і, як результат внутрішніх особливостей способу, враховувати історію завантаження будь-якого пального,

а також розподіл параметра пошкодження серед паливних елементів будь-якого пального. Метод СЕТ, розроблений з використанням експериментально перевіреної теорії повзучості, має такі особливості:

1. Універсальність, оскільки це дозволяє нам оптимізувати конструкцію та параметри роботи палива одночасно з оптимізацією параметрів реактора, для різних матеріалів та конструкцій ядра реактора типу ВВЕР, а також для різних режимів завантаження реактора;

2. Значно знижена невизначеність оцінок параметрів пошкодження оболонок твелів;

3. Зниження проектних витрат на пальне, підвищення безпеки / ефективності роботи палива.

Критерій СЕТ та критерій ефективності дозволили нам розробити критерій для мінімізації ймовірності відмови оболонок твелів за рахунок накопичення параметру пошкодження, що описує зростання мікротріщин у оболонках паливних елементів. Важливість параметра пошкодження оболонок твелів, використовуваного в критерії СЕТ, полягає у його сукупному характері, що описує еволюцію мікротріщин, через які витікають радіоактивні речовини. Структура критерію СЕТ дозволила запропонувати узагальнений метод контролю поведінки паливного стрижня. Використовуючи цей узагальнений метод, ймовірність виходу з ладу оболонок твелів у всьому ядрі може бути значно знижена.

Беручи до уваги, що максимальна лінійна швидкість тепла (ЛШТ) паливних елементів є головним фактором, що визначає $\omega(t)$, величиною $\omega(t)$ можна керувати насамперед шляхом оптимізації:

- режиму навантаження реактору типу ВВЕР;
- перестановки паливних збірок в ядрі.

Таким чином, на основі методу СЕТ можна запропонувати інноваційну технологію контролю герметичності оболонок твелів реактору типу ВВЕР, що включає контроль параметрів, які визначають дозу радіоактивного витоку через оболонки твелів у ланцюг реактора за нормальних робочих умов (дивись Рисунок 1).

Метод СЕТ для контролю властивостей ядерного палива на основі використання теорії повзучості дозволяє поліпшити баланс ефективності під час експлуатації реакторів ВВЕР за допомогою мінімізації максимальних і середніх значень параметра пошкодження для оболонок паливних елементів (ПЕ). Цей метод СЕТ є синергічним за своєю природою, оскільки він враховує точну історію завантаження як для паливних збірок

(ПЗ), так і для реактора. Процеси різної природи (нейтронно-фізичні, вироблення та передача тепла, теплогідравлічні, корозійні, повзучі тощо) в ядрі реактора розглядаються одночасно і вивчаються на різних рівнях ієрархії системи.

Як було зазначено в [4, с. 41–42], слід встановити деяку додаткову експериментальну програму для виявлення точної залежності витoku радіоактивних речовин через мікротріщини в оболонці палива від $\omega(t)$, а також для перевірки відомих лабораторних результатів у реальних умовах ядра реактору типу ВВЕР-1000. Але основна ідея покращення балансу безпеки та ефективності роботи палива за рахунок мінімізації $\omega(t)$ для оболонок твелів за методом СЕТ здається цілком обґрунтованою, беручи до уваги і той факт, що метод СЕТ був перевірений на неопромінених тонких трубках, виготовлених з різних сплавів, у термічних та механічних умовах, близьких до реальних умов ядра, а також на основні переваги моделі СЕТ порівняно з розрахунковою моделлю для оцінки $\omega(t)$ з використанням нормативного критерію SC4.

Розглянемо процедуру оптимізації продуктивності палива ВВЕР-1000 за допомогою цільової функції Eff : [7, с. 101]

Крок 1. Слід визначити перелік керованих параметрів $\{c_i\}$, а також скориговані коефіцієнти $\{d_j\}$, що визначають керовані параметри.

Оскільки оптимізація режимів завантаження реакторів та режимів перестановки паливних збірок повинна здійснюватися з урахуванням безпеки та економічних вимог одночасно, цілком зрозуміло, що цільова функція включає параметри деформаційного пошкодження оболонок

твелів (ω), глибину вигорання ЯП (B) і аксіальний офсет (АО). Отже, враховуючи (1) завантаження реактора та (2) оптимізацію перестановки паливних збірок, набір керованих параметрів, що входять до цільової функції, становить: (1) $\{c_1 = \omega, c_2 = B, c_3 = AO\}$ та (2) $\{c_1 = \omega, c_2 = B\}$.

Оскільки максимальна лінійна швидкість теплової енергії паливних елементів є головним фактором, що визначає значення параметра пошкодження оболонок твелів, ключовим змінним коефіцієнтом, який слід скорегувати для покращення балансу ефективності експлуатації палива та оптимізації продуктивності палива, є q_i^{max} , тобто $d \equiv q_i^{max}$.

Крок 2. Враховуючи безпеку палива та економічні вимоги, для кожного c_i визначаються оптимальні коефіцієнти c_i^{opt} та граничні значення c_i^{lim} , так що допустимі значення для c_i лежать в інтервалах:

$$c_i^{lim} \leq c_i \leq c_i^{opt} \text{ або } c_i^{opt} \leq c_i \leq c_i^{lim} \quad (1)$$

Переписавши $c_i, c_i^{opt}, c_i^{lim}$ в безрозмірному вигляді:

$$c_i^{lim,*} \leq c_i^* \leq c_i^{opt,*} = 1 \quad (2)$$

Цільова функція Eff для контролю властивостей паливного реактора записана у формі:

$$Eff = 1 - L / L^{lim}, \quad (3)$$

де

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - c_i^*)^2}; \quad L^{lim} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - c_i^{lim,*})^2}, \quad (4)$$

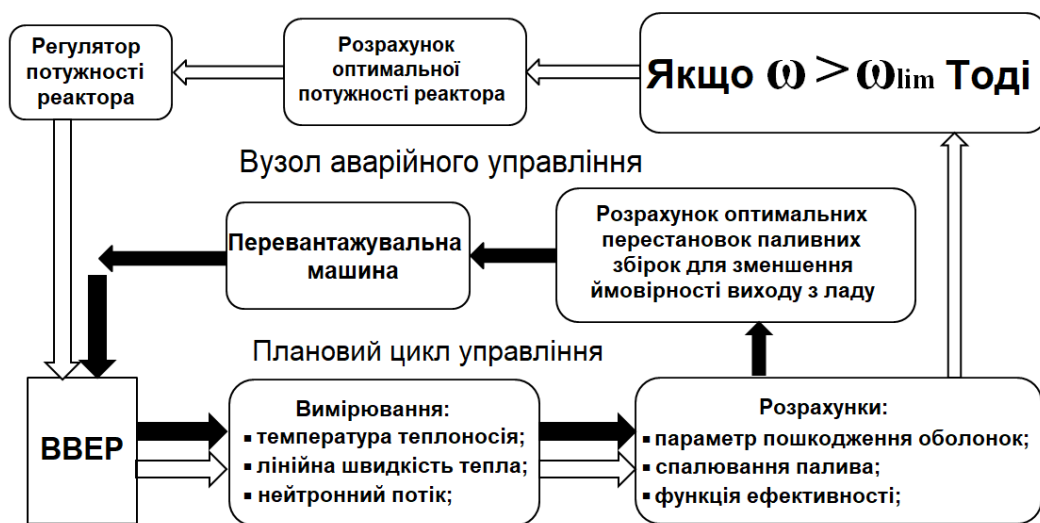


Рис. 1. Принципова схема контролю герметичності оболонок твелів у ВВЕР

коли $n_i = 3$ та 2 для завантаження реактора та оптимізації перестановки паливних елементів відповідно.

Метод побудови рівнянь для c_i , c_i^{opt} , c_i^{lim} ґрунтується на таких вимогах:

– якщо параметри проектування / експлуатації реактора та палива такі, що виконується умова:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i = c_i^{opt} \text{ для будь-яких } i, \\ \text{тобто } \omega = \omega^{opt}, B = B^{opt} \text{ та } AO = AO^{opt}, \end{array} \right. \quad (5)$$

тоді умова керованих параметрів, переписаних у безрозмірному вигляді, також виконується:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i^* = c_i^{opt,*} = 1 \text{ для будь-яких } i, \\ \text{тобто } \omega^* = \omega^{opt,*} = 1, B^* = B^{opt,*} \\ = 1 \text{ та } AO^* = AO^{opt,*} = 1, \\ Eff = Eff^{max} = 1. \end{array} \right. \quad (6)$$

Отже, Eff максимальний, тому задача оптимізації вирішена;

– якщо для керованого параметра c_i умова $c_i^* < c_i^{lim,*}$ виконується, то цей керований параметр дає негативний внесок у загальну ефективність Eff ;

– перевага одного набору параметрів проектування / експлуатації палива перед іншим визначається шляхом узагальнення переваг, заданих контрольованими параметрами c_i .

Крок 3. Оптимізація продуктивності палива за допомогою прийнятої цільової функції Eff .

Результати: Такі методи контролю потужності ВВЕР-1000 були розглянуті далі:

– середня температура теплоносія в ядрі є постійною: $\langle tW \rangle = \text{const}$ (метод I);

– тиск пари на вході другого контуру є постійним: $p_2 = \text{const}$ (метод II);

– температура теплоносія на вході в ядро є постійною: $tW_0 = \text{const}$ (метод III).

Враховуючи 4-річну паливну кампанію, стабільність основного нейтронного потоку була вивчена для добового циклу навантаження: $\{N = 100\%; 80\%; 100\%\}$, де N – теплова потужність реактора. Приймаючи обмежувальну умову $AO^{lim} = 0,05$, допустиму тривалість маневрування основної потужності вивчали для трьох методів управління потужністю за допомогою програми «Реакторний симулятор» [8, с. 560–561]. Було встановлено, що для методів I, II та III АО залишався стабільним протягом 7, 1 та 6 місяців відповідно. Це означає, що при $N = 100\%$ та 80% величина зміни АО залишалася у допустимих межах $[-5; 2.5]$ та $[-5; 4]$ відповідно.

Інші компоненти цільової функції (ω) та (B) для методів I, II та III були знайдені за допомо-

гою програми “Femaxi”. Тоді завдання оптимізації способу управління потужністю реактора було вирішено для 4-річної паливної кампанії шляхом пошуку екстремуму цільової функції (3), написаного у спрощеному вигляді, описаному в [3, с. 122–123]. Враховуючи добовий цикл навантаження $\{N = 100\%; 80\%; \text{На } 100\%\}$, були досліджені такі алгоритми навантаження реактора під час 4-річної кампанії:

Алгоритм 1. $N = \text{var}$ за 2 місяці, $N = \text{const}$ за 10 місяців.

Алгоритм 2. $N = \text{var}$ за 3 місяці, $N = \text{const}$ за 9 місяців.

Алгоритм 3. $N = \text{var}$ за 4 місяці, $N = \text{const}$ за 8 місяців.

Алгоритм 4. $N = \text{var}$ за 5 місяці, $N = \text{const}$ за 7 місяців.

Алгоритм 5. $N = \text{var}$ за 6 місяці, $N = \text{const}$ за 6 місяців.

Оптимальна кількість перевантажень між методами управління потужністю I та III становила 38, 65, 69, 75 та 107 для алгоритмів навантаження 1, 2, 3, 4 і 5 відповідно [3, с. 130–132].

Автоматизована система контролю властивостей паливного реактора включатиме як елементи стандартного обладнання блоку ВВЕР-1000, так і деякі додаткові елементи, необхідні для автоматизованих перемикачів між режимами завантаження реактора та режимами перестановки паливних збірок – дивись Рисунок 2.

Перспективна автоматизована система контролю властивостей палива ВВЕР-1000 матиме такі елементи та об’єкти управління:

– активне зона реактора ВВЕР, вона містить 163 тепловиділяючі збірки (ТВЗ), кожна ТВЗ включає 312 тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів). Отже, загальна кількість твелів у ядрі вище 50 000. Згідно з правилами безпеки ядро в нормальних умовах експлуатації може містити не більше 500 оболонки тепловиділяючих елементів, що мають витік радіоактивних речовин, тоді як прямий контакт паливо-теплоносія допускається лише для 50 оболонки [5, с. 5–6].

– датчики ядра (ДЯ) використовуються в автоматизованій системі, що контролює властивості палива для вимірювання температури теплоносія та значення нейтронного потоку, необхідних для імітаційної моделі.

– Шафа керування (ШК) використовуються для перетворення значень фізичних параметрів, отриманих від датчиків ядра, в електричні сигнали, що надсилаються на низькорівневі та високорівневі апарати системи основних приладів.

– обладнання низького та високого рівня вбудованої системи приладів (ОСП) призначене для обробки інформації, отриманої від ШК, та відправлення її в основний пульти управління, для використання її операторами реакторів. ОСП включає інформаційно-вимірювальне обладнання та програмне забезпечення спеціального призначення.

– імітаційна модель для оптимізації продуктивності палива (ІМ) включає в себе модель СЕТ для розрахунку параметрів пошкодження оболонок твєлів на основі синергічного методу СЕТ, а також критерійну модель, яка одночасно враховує вимоги безпеки та економічності. Оптимізаційні розрахунки проводяться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (“Reactor Simulator”, “Femaxi” тощо).

– компаратор даних (КД) призначений для періодичного аналізу поточних значень параметрів пошкодження обшивки $\omega(\tau)$ та порівняння їх з відповідними заздалегідь визначеними граничними значеннями $\omega^{lim}(\tau)$. Якщо значення $\omega(\tau)$ занадто близьке до $\omega^{lim}(\tau)$, тоді починається процедура оптимізації завантаження реактора.

– блок оптимізації завантаження реактора (ОЗР) – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації завантаження реактора, щоб значення параметрів пошкодження оболонок твєлів не могли перевищувати їх граничних значень. Потужність реактора змінюється, впливаючи борну

кислоту в активне зону. Об’єм борної кислоти, необхідний для зміни потужності реактора, також розраховується в ОЗР.

– пункт керування (ПК) – це місце, де оператори забезпечують нормальну експлуатацію реакторного блоку на основі поточної інформації про технологічні параметри.

– виконавчий механізм (ВМ), що використовується для зміни потужності реактора, є електромагнітним клапаном.

– блок оптимізації перестановки палива (ОПП) – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації перестановки ТВЗ, щоб значення параметрів пошкодження оболонок не могли перевищувати їх граничних значень.

– блок оптимізації роботи перевантажувальної машини (ОРМ) – це блок, що обчислює алгоритм роботи перевантажувальної машини.

– панель управління перевантажувальної машини (ПУМП) призначена для надання інформації про алгоритми перестановки ТВЗ та алгоритмів роботи автомата на перевантажувальній машині.

– перевантажувальна машина (МП) здійснює перестановку паливних елементів у ядрі.

Висновки. Для покращення балансу безпеки та ефективності під час експлуатації реакторів ВВЕР запропоновано новий підхід до мінімізації витоку радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР при нормальних робочих умовах, заснований на мінімізації параметра пошкодження оболонок

паливних елементів та використанні методу СЕТ. Пояснено процедуру оптимізації продуктивності палива ВВЕР-1000 з використанням цільової функції, що забезпечує збалансованість безпеки та ефективності роботи палива. Запропонована автоматизована система контролю властивостей паливного реактора з урахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твєлів, глибини вигорання ЯП і аксіального офсету. Обговорювались склад та структура цієї перспективної автоматизованої системи, що мінімізує витік радіоактивних речовин у ланцюг реактора за нормальних робочих умов, заснованих на мінімізації параметра пошкодження оболонок твєлів та використанні синергічного методу СЕТ.

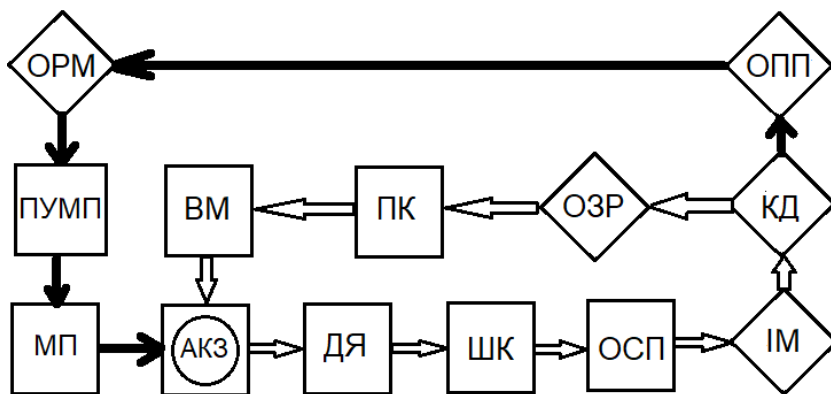


Рис. 2. Структурна схема автоматизованої системи контролю властивостей палива ВВЕР-1000: АКЗ – це активна зона ядерного реактору; ДЯ – це датчики ядра; ШК – це шафа керування; ОСП – це обладнання низького та високого рівня вбудованої системи приладів; ІМ – імітаційна модель для оптимізації продуктивності палива; КД – це компаратор даних для аналізу значень параметрів пошкодження оболонок твєлів; ОЗР – це блок, що обчислює цільову функцію для оптимізації завантаження реактора; ПК – це пункт керування; ВМ – це виконавчий механізм для зміни потужності реактора; ОПП – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації перестановки палива; ОРМ – це блок для оптимізації роботи перевантажувальної машини; ПУМП – це панель управління перевантажувальною машиною; МП – це перевантажувальна машина

Список літератури:

1. Pelykh S.N., Zhou H., Maksimov M.V. Minimizing the radioactive leakage into the reactor circuit under extreme conditions of normal operation. European Commission funded International Workshop Materials resistant to extreme conditions for future energy systems 12-14 June 2017. Kyiv : Ukraine, Book of Abstracts, 2017. P. 83
2. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1. Vienna : International Atomic Energy Agency. 2010. P. 191
3. Zhou H., Pelykh S.N., Odrekhovska I.O., Maksymova O.B. Optimization of power control program switching for a VVER-1000 under transient operating conditions. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Vacuum, Pure Materials and Super-conductors. 2018. № 1(113). P. 218–222.
4. Pelykh S.N., Frolov M.A., Nalyvayko A.V., Zhou H. The problem of minimizing the radioactive leakage into the VVER circuit under normal conditions Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. 2017. №2(52). P. 39–44.
5. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07. М. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. С. 21
6. Pelykh S.N, Maksimov M.V., Nikolsky M.V. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. 2014. № 4. P. 108–116.
7. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса : Астропринт, 2010. С. 248.
8. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000. *Атомная энергия*. 1998. № 6. С. 560–563.
9. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. 2012. №1(38). P. 99–106.

**Tereshchenko D.O., Pelykh S.N. RESEARCH NUCLEAR FUEL PROPERTIES
IN A VVER-1000 REACTOR DURING A CAMPAIGN
AND A COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM CONTROLLING THE FUEL PROPERTIES**

The object of the study is the conditions for the development of an automated control system to minimize radioactive leaks into the VVER circuit under normal operating conditions, by optimizing the modes of reactor loading and permutations of the fuel assemblies. An automated system for controlling the properties of the nuclear fuel of the VVER-1000 reactor is offered, taking into account the fuel cladding damage parameter, burnup and axial offset. Aim: development of bases for improvement of balance of efficiency of safety of operation of reactors of type VVER, new approach to minimization of leakage of radioactive substances in the VVER circuit under normal operating conditions, based on minimization of the damage parameter of fuel claddings is proposed; development of the foundation of the automated system of control of fuel properties of the VVER-1000 reactor in order to ensure the balance of safety and fuel efficiency. **Presenting main material:** The synergistic nature of the SET method developed to control the properties of nuclear fuel will be explained. We describe two main methods for maintaining the balance of fuel efficiency of the VVER-1000 reactor and provide the corresponding objective functions. The technology of control of the tightness of fuel cladding of the reactor type VVER is proposed, which includes the control of parameters that determine the dose of radioactive leakage through microcracks of fuel claddings into the reactor circuit under normal operating conditions; a new method of parameter control that determines the volume of radioactive leakage into the first circuit through the microcracks of fuel claddings, under normal conditions of reactor operation, optimization of modes of loading and permutations fuel assembly of the reactor based on the objective function, taking into account the fuel cladding damage parameter, burnup and axial offset. **Results:** the conditions for the development of an automated control system for minimizing radioactive leaks into the VVER circuit under normal operating conditions are shown by optimizing the reactor loading mode and permutations of the fuel assemblies. The composition and structure of the automated system for controlling the fuel properties of the VVER-1000 reactor which provides a balance between the safety and the cost-effectiveness of nuclear fuel operation is proposed.

Key words: *automated control system, VVER-1000 reactor, software tool, fuel cladding, damage parameter, radioactive leakage minimization, damage parameter.*

Тіменко А.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Шкарупило В.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Скрупський С.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Смолій В.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПІДСИСТЕМИ ПАМ'ЯТІ СУЧАСНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Сучасний стан розвитку персональних обчислювальних систем можна охарактеризувати як такий, коли має місце широке використання мультіядерних платформ. Швидкодія таких систем під час вирішення як повсякденних, так і вузькоспеціалізованих обчислювальних задач безпосередньо залежить від пропускної спроможності підсистеми пам'яті центрального процесора, для якого на актуальних платформах характерна інтеграція із контролером оперативної пам'яті.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування підсистеми пам'яті актуальної мультіядерної обчислювальної системи, що дозволить пришвидшити вирішення ряду науково-технічних задач. Для досягнення сформульованої мети в роботі вирішуються такі завдання: підвищення пропускної спроможності підсистеми пам'яті сучасної мультіядерної обчислювальної системи шляхом маніпулювання частотою і затримками; оцінювання впливу реалізації технології мультиточності на результуючу продуктивність мультіядерної обчислювальної системи.

Для одержання кількісних оцінок показників ефективності функціонування системи використано поширені загальнодоступні програмні засоби, зокрема такі, як AIDA64, wPrime. Як апаратний складник тестової платформи застосовано платформу Advanced Micro Devices на базі актуальної мікроархітектури Zen. Маніпулювання характеристиками підсистеми пам'яті проведено засобами інтерфейсу Unified Extensible Firmware Interface.

Результати проведених експериментальних досліджень показали, що оперування налаштуваннями підсистеми пам'яті сучасної мультіядерної обчислювальної системи є дієвим засобом підвищення ефективності її функціонування. Окрім того, було одержано кількісну оцінку корисного ефекту від застосування технології мультиточності. Одержаний результат охарактеризовано як суттєвий. При цьому зазначено, що він може варіюватися залежно від обраної програмно-апаратної платформи.

Ключові слова: мультіядерна система, центральний процесор, ефективність, підсистема пам'яті, частота, затримка.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток сучасних інформаційних технологій характеризується значними вимогами до обчислювальних ресурсів, необхідних для вирішення ряду науково-технічних задач, зокрема таких, що передбачають застосування чисельних методів, здійснення формальної верифікації тощо [1]. В актуальних мікроархітектурах обчислювальних систем, наприклад, Zen [2], істотний вплив на результуючу продуктивність обчислювальної системи чинить швидкодія підсистеми пам'яті (ПП). Відповідні рішення при

цьому є мультіядерними, що, зокрема, дозволяє не втрачати сподівань у слідуванні закону Мура і у наш час [3]. Під ПП розумітимемо таку пару: контролер оперативної пам'яті (ОП), інтегрований до складу центрального обчислювального вузла мультіядерної обчислювальної системи (МОС); модулі ОП, інсталювані до складу материнської плати як апаратної платформи МОС. Ретельне налаштування характеристик ПП при цьому є запорукою успішного чисельного розв'язання поставленої задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Демонстративним прикладом важливості високої пропускної спроможності ПП МОС є вирішення задачі перевірки сумісності компонентів системи Інтернету речей методом перевірки на моделі, що передбачає побудову граф-моделі системи переходів із заданої формальної специфікації [4]. Верифікація такої специфікації характеризується експоненційним зростанням простору станів системи переходів.

Існує чимало засобів налаштування характеристик ПП, один з яких – інтерфейс UEFI (Unified Extensible Firmware Interface) [5], що надає широкий спектр шляхів маніпуляцій, прийшовши на заміну застарілій системи BIOS (Basic Input-output System). Саме на його застосуванні і базується представлена робота. Навіть більше, засоби інтерфейсу UEFI дозволяють активувати дієву актуальну технологію мультипоточності – SMT (Simultaneous Multithreading), що знайшла застосування у складі сучасних програмно-апаратних платформ компанії AMD (Advanced Micro Devices). Технологія SMT призначена підвищити продуктивність роботи сучасної МОС за рахунок паралельного виконання незалежних програмних потоків [6].

Підсумовуючи вищесказане, у роботі ставиться мета – підвищити ефективність роботи ПП актуальної МОС, що дозволить пришвидшити вирішення ряду науково-технічних задач.

Постановка завдання. Для досягнення сформульованої мети в роботі ставляться і вирішуються такі завдання:

- підвищити пропускну спроможність ПП сучасної МОС – шляхом маніпулювання частотою і затримками;

- оцінити вплив застосування технології SMT (Simultaneous Multithreading) на продуктивність МОС.

Як показник ефективності обрано пропускну спроможність ПП МОС.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Попередні дослідження демонструють, що обмежена продуктивність ПП процесора може стати стримуючим фактором, зокрема, під час вирішення задачі формальної верифікації методом перевірки на моделі [7].

Проведення експериментальних досліджень базувалось на програмно-апаратній платформі такої конфігурації: операційна система – 64-розрядна модифікація Microsoft Windows 10 версії 10.0.17763.615; центральний процесор – AMD Ryzen 2400G – 4 фізичні ядра з підтримкою

мультипоточності (8 потоків), що функціонують на частоті 3,8 ГГц; чипсет – AMD B450; материнська плата – B450M BAZOOKA v2; версія BIOS – P.40 – AMD AGESA Combo-AM4 0.0.7.2; обсяг встановленої ОП – 16 ГБ стандарту DDR4, згідно з яким рекомендована напруга живлення ОП становить 1,2 В [8]; серія модулів ОП – BLS2K8G4D30AESEK [9]. Варто зазначити, що названий процесор створено на основі актуальної мікроархітектури Zen, що передбачає реалізацію вищезазваної технології SMT, призначеної забезпечити паралельне виконання незалежних потоків. При цьому ПП функціонує у двоканальному режимі. Навіть більше, для залученої мікроархітектури характерна така особливість: частота роботи контролера ОП визначається частотою ОП – становить половину частоти ОП. Це, зокрема, означає, що у разі застосування МОС з альтернативною мікроархітектурою одержувані експериментальні дані можуть суттєво різнитися.

Для проведення експериментальних досліджень залучено такі актуальні програмні засоби:

- AIDA64 версії 6.10.52.00 – для одержання значень показників пропускної спроможності ПП під час виконання операцій зчитування, запису, копіювання у ОП, а також значення показника затримки доступу до ОП [10]. Саме названі показники застосовуватимемо як індикатори підвищення продуктивності ПП залежно від маніпуляцій із характеристиками частоти і затримок ОП;

- wPrime версії 2.10 – інструментальний засіб, що рекурсивно обчислює квадратні корені на основі методу Ньютона [11]; є репрезентативним індикатором мультипоточної продуктивності мультиядерної системи, особливо у контексті вирішення науково-технічних задач чисельними методами; експериментальні дослідження будуватимемо на основі проходження відповідного тесту wPrime-32m.

Під час проведення експериментальних досліджень застосовано такий підхід. Варіювались такі характеристики МОС: частота, затримки і напруга живлення ОП. Характеристики ОП для заданих частот подано у табл. 1. Для зчитування значень характеристик ОП і встановлення напруги живлення використано вбудовані засоби інтерфейсу UEFI.

У табл. 1 напруга живлення ОП і затримки виставлені таким чином, щоб успішно проходити набір тестів утиліти TestMem5 – перевіреного засобу підтвердження стабільності функціонування ПП [12]. Подані у табл. 1 умовні позначення затримок є типовими: *CL* – CAS Latency; *tRCD* – Row Address

to Column Address Delay; tRP – Row Precharge Time; $tRAS$ – Row Active Time; $tRC \geq tRP + tRAS$; CR – Command Rate [13]. Значення напруги, подані у табл. 1, є допустимим. Варто зазначити, що багато сучасних високочастотних наборів ОП розраховано на базову напругу 1,35 В [9]. При цьому не рекомендується перевищувати значення напруги у 1,40 В. Допустимі значення напруги і затримок, які вдасться досягти, залежать також і від виробника мікросхем ОП. Значення табл. 1 одержані для мікросхем виробництва Micron.

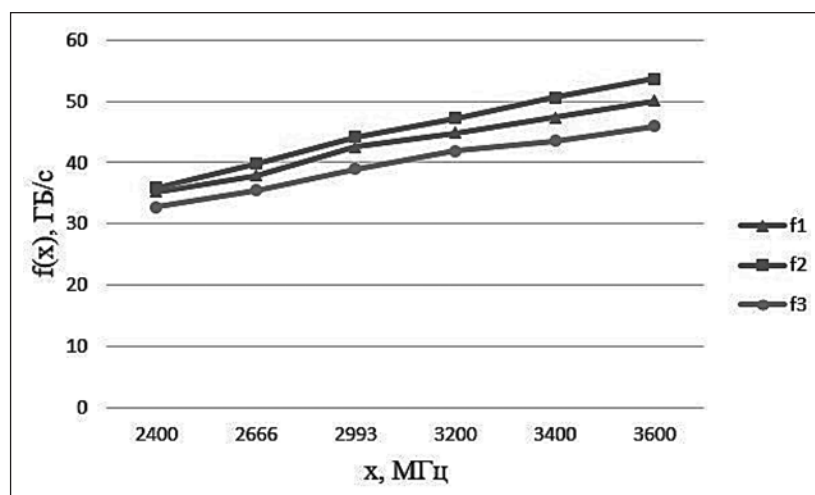


Рис. 1. Графік залежності пропускної спроможності ППІ від частоти ОП

Варто зазначити, що наведені у табл. 1 затримки належать до основної групи затримок. Для одержання кращих значень показників продуктивності ППІ необхідно оперувати також і вторинними затримками ($tRRDs$ та ін.). Цей аспект виходить за межі цієї роботи і підлягає подальшому опрацюванню.

Значення показників продуктивності ППІ подано у табл. 2.

У табл. 2 показники $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ означають, відповідно, пропускну спроможність ППІ при зчитуванні, записі та копіюванні даних. Показник $f_4(x)$ при цьому відображає затримку доступу до ОП, нс. Кожне табличне значення є середнім арифметичним 10 замірів.

Дані табл. 2 стосовно пропускну спроможності ППІ подано на рис. 1.

З рис. 1 видно, що значення показників $f_1(x) - f_3(x)$ пропускну спроможності ППІ прямопропорційні частоті ОП. Підвищення частоти ОП на 50 % сприяло такому результату: показник $f_1(x)$ поліпшився на 42%, $f_2(x)$ – на 50%, а $f_3(x)$ – на 40%. Отже, зростання пропускну спромож-

Таблиця 1

Затримки ОП залежно від частоти

№ з/п	Затримки, такти	Частоти (МГц); напруги (В) ОП					
		2400; 1,2	2666; 1,2	2993; 1,35	3200; 1,35	3400; 1,36	3600; 1,38
1	CL	16	16	16	16	16	16
2	$tRCD$	16	16	16	16	18	18
3	tRP	16	16	16	16	18	18
4	$tRAS$	39	35	35	35	38	38
5	tRC	55	61	67	74	78	82
6	CR	1T	1T	1T	1T	1T	1T

Таблиця 2

Залежність продуктивності ППІ від частоти

№ з/п	Показники	Частоти ОП (x), МГц					
		2400	2666	2993	3200	3400	3600
1	$f_1(x)$, ГБ/с	35,28	37,85	42,57	44,79	47,31	50,06
2	$f_2(x)$, ГБ/с	35,83	39,81	44,15	47,23	50,61	53,70
3	$f_3(x)$, ГБ/с	32,74	35,49	38,94	41,87	43,56	45,98
4	$f_4(x)$, нс	94,54	82,36	74,60	73,34	71,16	68,44

ності ПП шляхом підвищення частоти ОП є обґрунтованим кроком – за умови використання сучасної мультядерної мікроархітектури AMD Zen, коли частота контролера ОП безпосередньо визначається частотою ОП. При цьому варто зазначити, що одержані результати можуть бути покращені шляхом більш ретельного налаштування затримок ОП (табл. 1).

Функцію $f_4(x)$ табл. 2 представлено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що підвищення частоти ОП на 50% призвело до зниження затримки доступу

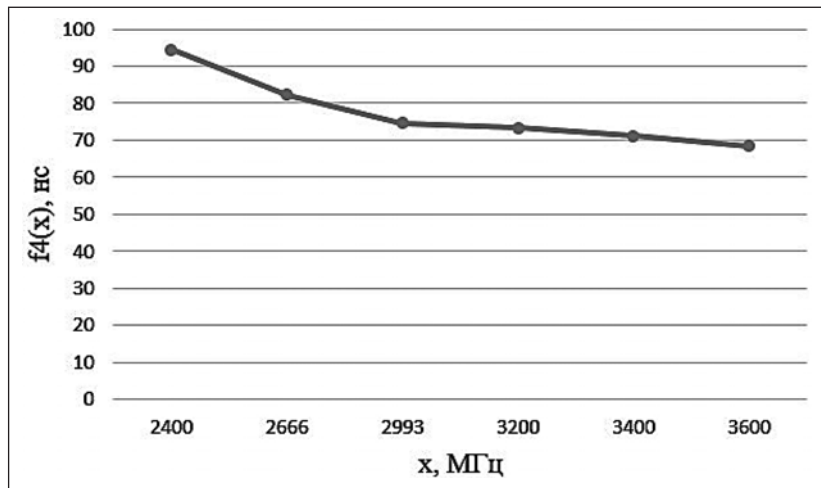


Рис. 2. Графік залежності затримки доступу до ОП від частоти ОП

Таблиця 3

Час проходження тесту wPrime-32m

№ з/п	Показники	Значення показників проходження тесту для заданої частоти ОП (МГц)					
		2400	2666	2993	3200	3400	3600
1	X, с	10,19	10,21	10,53	10,20	10,28	10,18
2	Y, с	6,63	6,61	6,74	6,59	6,62	6,61
3	Z	0,35	0,35	0,36	0,35	0,36	0,35

на 28%. Більш ретельні налаштування затримок ОП (табл. 1) потенційно можуть призвести до кращих результатів.

Результати дослідження впливу застосування технології SMT на продуктивність МОС подано у табл. 3. Для оцінювання відповідного ефекту залучено програмний засіб wPrime [11].

У табл. 3 показник X – час проходження тесту для 4 потоків – без залучення технології SMT, с; Y – для 8 потоків – із залученням технології SMT, с; $Z = (X - Y) / X$.

Результати, подані у табл. 3, дають змогу оцінити корисний ефект від застосування технології SMT – одержуване прискорення від активізації 8 потоків замість 4 становить 35–36%. Такий показник можна охарактеризувати як вагомий, тобто такий, що істотним чином впливає на швидкість вирішення обчислювальної задачі. При цьому варто зазначити, що цей результат може варіюватися залежно від обраної програмно-апаратної платформи.

Висновки. Таким чином, у роботі було успішно вирішено усі поставлені задачі:

1. Показано шлях підвищення пропускної спроможності ПП сучасної МОС шляхом маніпулювання частотою і затримками ОП. Екс-

периментальним шляхом було одержано такі результати: підвищення частоти ОП на 50% сприяло покращенню таких показників продуктивності функціонування ПП: пропускна спроможність під час операцій зчитування даних зросла на 42%, запису – 50%, копіювання – 40%. При цьому затримки доступу до ОП скоротилися на 28%. Такі результати можна охарактеризувати як задовільні, тобто такі, що потенційно можуть суттєво підвищити ефективність роботи МОС під час вирішення обчислювальних задач, якщо показником ефективності виступає час.

2. Визначено вплив застосування технології SMT на ефективність роботи МОС. На усьому діапазоні вхідних даних – для частот ОП від 2,4 ГГц до 3,6 ГГц – зростання ефективності склало 35–36%. Таке значення охарактеризовано як вагоме. Для його обчислення було залучено поширений програмний засіб wPrime.

Подальша робота планується у наступних напрямках: покращення показників продуктивності ПП МОС шляхом більш ретельного налаштування затримок ОП; оцінювання ефекту від підвищення продуктивності ПП у ряді прикладних сценаріїв.

Список літератури:

1. Shkarupylo V.V., Tomicic I., Kasian K.M. The investigation of TLC model checker properties. *Journal of Information and Organizational Sciences*. 2016. Vol. 40, No. 1. P. 145–152.
2. Oi H. Energy efficiency study of Ryzen microprocessor. *SoutheastCon 2018, IEEE* (St. Petersburg, FL, USA, 19-22 April 2018). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2018.8478962>
3. Schaller R. R. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum*. 1997. Vol. 34, No. 6. P. 52–59.
4. Timenko A.V. On the aspects of IoT protocols specification and checking. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2019. No. 2(12). P. 35–41.
5. Liu R., Delgado-Frias J. G., Boyce D., Khanna R. A real-time UEFI functional validation tool with behavior Colored Petri Net model. *Circuits and Systems, MWSCAS : 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium* (Abu Dhabi, United Arab Emirates, 16–19 Oct. 2016). 2016. P. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2017.8052942>
6. Zhang Y., Lin W.-M. Efficient resource sharing algorithm for physical register file in simultaneous multi-threading processors. *Microprocessors and Microsystems*. 2016. Vol. 45, Part B. P. 270–282.
7. Shkarupylo V.V., Tomicic I., Kasian K.M., Alsayaydeh J.A.J. An Approach to increase the Effectiveness of TLC Verification with Respect to the Concurrent Structure of TLA+ Specification. *International Journal of Software Engineering and Computer Systems*. 2018. Vol. 4, No. 1. P. 48–60.
8. Mukundan J., Hunter H., Kim K., Stuecheli J., Martinez J.F. Understanding and mitigating refresh overheads in high-density DDR4 DRAM systems. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*. 2013. Vol. 41, No. 3. P. 48–59.
9. Ballistix Sport LT DDR4 Memory. URL: <https://content.crucial.com/content/dam/ballistix/dram-products/sport-series/ddr4/sport-lt-2016/flyer/ballistix-sport-lt-ddr4-productflyer.pdf> (дата звернення: 14.02.2020).
10. AIDA64. URL: <https://www.aida64.com/downloads> (дата звернення: 14.02.2020).
11. wPrime Multi-threaded Benchmark. URL: <http://www.wprime.net/> (дата звернення: 14.02.2020).
12. TestMem5. URL: <https://iowin.net/testmem5> (дата звернення: 14.02.2020).
13. Гук М.Ю. Аппаратные средства IBM PC: энциклопедия, 3-е изд. Санкт-Петербург : Питер, 2006. 1072 с.

Timenko A.V., Shkarupylo V.V., Skrupsky S.Yu., Smolii V.V. A RESEARCH ON THE WAYS OF MODERN COMPUTING SYSTEM'S MEMORY SUBSYSTEM THROUGHPUT INCREASE

Modern level of personal computing systems development can be characterized as follows: ubiquitous utilization of multicore platforms takes place. The performance of such systems while resolving typical and specialized computational tasks depends on memory subsystem throughput directly. Not to mention that memory controller of modern multicore systems is integrated into central processing unit.

The goal of work proposed is to increase the effectiveness of modern multicore computing system's memory subsystem functioning to foster the quickness of scientific and technical tasks resolving. To achieve that, the following tasks are approached in given paper: increase the throughput of multicore computing system's memory subsystem – by way of frequency and latencies manipulation; estimate the effect on the resulting productivity of multicore computing system from multithreading technology implementation.

To get the quantitative estimations of multicore system functioning effectiveness, the broadly known and proven utilities have been brought to use, e.g., AIDA64, wPrime. The Advanced Micro Devices' platform with contemporary Zen microarchitecture has been utilized as a hardware constituent of the test bench. Memory subsystem's characteristics tweaking has been conducted through the Unified Extensible Firmware Interface.

The results obtained have proved the assumption concerning the expediency of modern multicore computing system's memory subsystem tweaking in order to increase the effectiveness of its functioning. Moreover, the quantitative estimation of the outcome from multithreading technology implementation has been made. The result obtained has been characterized as a significant one. At the same time, it has been stated that the result can vary, depending on the software and hardware platform chosen.

Key words: multicore system, central processing unit, effectiveness, memory subsystem, frequency, latency.

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/33>**Токайчук Т.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Сьомкіна О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Смирнова О.Л.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Панчева Г.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Пилипенко О.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ОКСИДНИХ ПЛІВОК НА СПЛАВІ Тi6Al4V У ЕЛЕКТРОЛІТАХ НА ОСНОВІ ЕТИЛЕНГЛІКОЛЮ

Наведені результати дослідження утворення оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V у електролітах, що складаються з етиленгліколю, води (5 об. %) і NH₄F. Показано, що за $c(\text{NH}_4\text{F}) = 0,5\text{--}2,0 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ формувальні залежності, що відображають динаміку утворення оксидних плівок на металі при електрохімічному окисленні, є лінійними залежностями напруги на комірці від часу електролізу. Отримані дані вказують на те, що анодне окислення сплаву за цих умов приводить до утворення оксидних плівок діелектричного типу, для яких максимальна товщина визначається величиною напруги. Забарвлення отриманих плівок не залишається постійним і не відповідає кольору плівок, отриманих у разі оксидування сплаву в електролітах, що не містять іонів-активаторів. Кут нахилу формувальних залежностей збільшується зі зростанням густини анодного струму, що узгоджується з пропорційним збільшенням швидкості окислення металу під час підвищення заданого значення густини струму j_a . У електролітах, що містять NH₄F у кількості $2,5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ і вище, вид формувальних залежностей визначається j_a . За високих j_a лінійний хід залежностей вказує на те, що швидкість утворення плівки перевищує швидкість її хімічного розчинення. За $j_a = 1\text{--}2 \text{ А}\cdot\text{дм}^{-2}$ залежності втрачають лінійний характер, і відбувається утворення пористих оксидних плівок. Отримані дані дозволяють зробити висновок про можливість формування плівок бар'єрного та пористого типів шляхом зміни параметрів електролізу при електрохімічному окисленні сплаву Ti6Al4V у розчинах на основі етиленгліколю. Вони є передумовою для розробки технологічних основ отримання оксидних плівок з функціональними властивостями з можливістю використання як біоінертних і біосумісних покриттів основи для отримання каталізаторів, корозійностійких покриттів.

Ключові слова: анодна поляризація, оксидна плівка, електрохімічне осадження, поляризаційна залежність, діоксид титану.

Постановка проблеми. Хімічна стійкість титану зумовлена наявністю тонкою (5–6 нм) оксидною плівкою, яка утворюється під час контакту металу з кисневмісними реагентами. Шар з непровідного TiO₂ майже не має пор і сприяє глибокій пасивації титану. Оксидні плівки не тільки пасивують титан. Титан використовується для виготовлення зубних протезів, елементів суглобів, ниток, сіток, пластин, виробів для щелепно-лицевої хірургії [1]. Біоінертність плівки зумовлює відсутність алергічних реакцій і швидке формування

кістково-м'язової тканини, яка не змінюється протягом життя пацієнта [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Недоліком титанових сплавів є зниження хімічної стійкості за збільшення легуючих елементів. Поверхнева корозія імплантатів приводить до викришування часток металу і утворення сполук V і Al з протіканням запальних процесів [3]. Для більшої надійності поверхню титану модифікують шляхом формування керамічних, фосфатних або оксидних покриттів [4–7]. Оксидні плівки

отримують переважно електрохімічним окисленням (ЕО), оскільки метод дозволяє отримувати однорідні плівки на складних виробках. Структура і товщина плівки визначається робочим електролітом [8; 9]. Якщо він не взаємодіє з плівкою, утворюється бар'єрна плівка з діелектричними властивостями. Введення до електроліту активаторів сприяє утворенню пористих плівок неоднорідної структури. У змішаних електролітах можна одержати впорядковані пористі плівки з порами визначеного діаметру. З огляду на це **мета статті** полягає у дослідженні процесів ЕО сплаву Тi6Al4V у етиленгліколь-водних розчинах.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Методика.* Для дослідження використовували зразки сплаву, виготовлені з прутка діаметром 4 мм. Зразки шліфували пелюстковим кругом, промивали бензином, знежирювали водною суспензією карбонату натрію, травили у суміші $\text{HNO}_3:\text{HF}$ (3:1) та промивали водою. Електроліз проводили у гальваностатичному режимі, використовуючи джерело живлення Б5-49 до досягнення напруги на комірці 100 В. Зміну напруги на комірці відстежували мультиметром Keithley-2000. Як допоміжний електрод використовували свинець. Для приготування розчинів використовували хімічні реактиви кваліфікації «ч.д.а.».

Результати досліджень. Найбільш інформативним для дослідження процесів ЕО є аналіз формувальних залежностей типу $U-f(\tau)$, які одержують шляхом реєстрації зміни напруги на комірці у часі під час гальваностатичного електролізу. $U-f(\tau)$ залежності дозволяють не тільки відстежити динаміку росту плівки, але й зробити висновки щодо структури одержаного шару. Одержані експериментальні дані вказують, що

визначальний вплив на утворення плівки має склад електроліту, а саме – вміст у ньому фториду амонію. Формувальні залежності, одержані при $c(\text{NH}_4\text{F}) = 0,5\text{--}2 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, мають лінійний хід, що свідчить про формування оксидних плівок з незначною пористістю (рис. 1, а).

Кут нахилу залежностей у цьому діапазоні $c(\text{NH}_4\text{F})$ зменшується з підвищення густини струму (рис. 1, б), що пояснюється збільшенням швидкості електрохімічного окислення сплаву у гальваностатичному режимі за 100%-го виходу за струму окислення титану.

Підвищення $c(\text{NH}_4\text{F}) > 2,5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ зумовлює зміну ходу формувальних залежностей (рис. 2), які втрачають лінійність і демонструють складну зміну напруги на комірці. Цей ефект більш чітко проявляється під час електролізу за низьких j_a (рис. 2, а). При ЕО за $j_a > 0,6 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ ефект зникає, що вказує на більшу швидкість електрохімічного утворення плівки, порівняно з швидкістю її хімічного розчинення у електроліті. Вид формувальних залежностей, одержаних при $j_a > 1,39 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ (рис. 2, б), зумовлюється вмістом фториду амонію у електроліті.

Формувальні залежності, одержані за цих умов, характеризуються наявністю декількох ділянок, що відповідають утворенню оксидного шару бар'єрного типу, появи пор і ЕО з поступовим наростанням пористої частини оксиду. З підвищенням концентрації іонів фтору швидкість хімічного розчинення плівки зростає, що видно з пологого ходу одержаних кривих.

Отримані результати пояснюються, якщо прийняти до уваги положення теорії утворення оксидних шарів бар'єрного типу. За незначного вмісту іонів F^- швидкість формування плівки

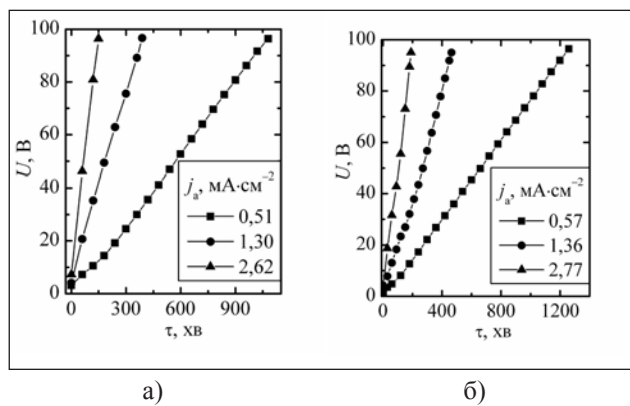


Рис. 1. Формувальні залежності, одержані при електрохімічному окисдуванні титанового сплаву Тi6Al4V у розчині складу 95 об. % $(\text{CH}_2)_2(\text{OH})_2$ + 5 об. % H_2O . $c(\text{NH}_4\text{F})$, $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$: а – 1,5; б – 2,0

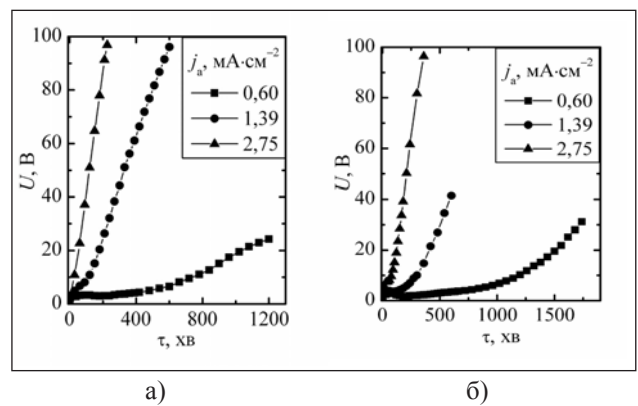


Рис. 2. Формувальні залежності, одержані під час електрохімічного окисдування титанового сплаву Тi6Al4V у розчині складу 95 об. % $(\text{CH}_2)_2(\text{OH})_2$ + 5 об. % H_2O . $c(\text{NH}_4\text{F})$, $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$: а – 5; б – 10

значно перевищує швидкість її хімічного розчинення у електроліті. Наявної кількості фторид-іонів недостатньо для забезпечення активації поверхні сплаву. Це приводить до лінійного росту напруги на комірці (рис. 1, а), зумовленого омичним опором оксидного шару з діоксиду титану. Швидкість утворення такого шару зростає зі збільшенням кількості окисленого металу, що в умовах постійної швидкості хімічного розчинення викликає прискорене досягнення заданої напруги (рис. 1, б). Такий вплив проявляється навіть у розчинах, що містять $10 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1} \text{ NH}_4\text{F}$ (рис. 2, а). За низьких значень густини струму формування плівки відбувається в умовах більшого впливу хімічної взаємодії з електролітом і зумовлює складний процес залежностей. Зміна умов електролізу дозволяє проводити формування як малопористих плівок діелектричного типу, так і двошарових плівок з бар'єрною і пористою частинами.

Висновки. Досліджена динаміка електрохімічного окислення титанового сплаву Ti6Al4V у етиленгліколь-водних розчинах з додаванням NH_4F . Формувальні залежності дозволили встановити, що залежно від умов проведення процесу можливе утворення плівок різного типу. Проведення окислення за $c(\text{NH}_4\text{F}) = 0,5\text{--}2,0 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ зумовлює лінійний хід, що вказує на утворення малопористих плівок діелектричного типу. Під час підвищення $c(\text{NH}_4\text{F}) > 2,5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ визначальний вплив на структуру оксидної плівки має густина струму. За $j_a = 0,6 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ спостерігається лінійний хід залежностей. При $j_a > 1,39 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ утворюються двошарові оксидні плівки з бар'єрною і пористою частинами. Одержані результати встановлюють зв'язок між умовами проведення окислення і структурою плівки, що є передумовою для розробки технології електрохімічного окисдування сплаву Ti6Al4V.

Список літератури:

1. Khorasani A.M., Goldberg M., Doeven E.H. [et al.]. Titanium in biomedical applications – properties and fabrication: a review. *J. Biomater. Tiss. Engin.* 2015. Vol. 5. P. 593–619.
2. Li Y., Yang C., Zhao H. [et al.]. New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Mater.* 2014. Vol. 7. P. 1709–1800.
3. Adya N., Alam M., Ravindranath T. [et al.]. Corrosion in titanium dental implants: literature review. *J. Indian Prosthodont. Soc.* 2005. Vol. 5. P. 126–131.
4. John A.A., Jaganathan S.K., Supriyanto E. [et al.]. Surface modification of titanium and its alloys for the enhancement of osseointegration in orthopaedics. *Curr. Sci.* 2016. Vol. 111. P. 1003–1015.
5. Diefenbeck M., Mückley T., Schrader C. [et al.]. The effect of plasma chemical oxidation of titanium alloy on bone-implant contact in rats. *Biomaterials.* 2011. Vol. 32. P. 8041–8047.
6. Park E.J., Song Y.H., Hwang M.J. [et al.]. Surface characterization and osteoconductivity evaluation of micro/nano surface formed on titanium using anodic oxidation combined with H_2O_2 etching and hydrothermal treatment. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2015. Vol. 15. P. 6133–6136.
7. Lubas M., Sitarz M., Jasinski J.J. [et al.]. Fabrication and characterization of oxygen-diffused titanium using spectroscopy method. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2014. Vol. 133. P. 883–886.
8. Pilipenko A., Pancheva H., Deineka V. [et al.]. Formation of oxide films on VT6 alloy in the conditions of anodical polarization in solutions H_2SO_4 . *EEJET.* 2018, Vol. 3. P. 33–38.
9. Ivashchenko M., Smirnova O., Kyselova S. [et al.]. Establishing the patterns in the formation of films on the alloy Ti6Al4V in carbonic acid solutions. *EEJET.* 2018. Vol. 5. P. 21–26.

Tokaichuk T.M., Semkina O.V., Smirnova O.L., Pancheva H.M., Pilipenko O.I. **STUDY OF THE DYNAMICS OF FORMATION OXIDE FILMS ON Ti6Al4V ALLOY** **IN ETHYLENE GLYCOL BASED ELECTROLYTES**

The data obtained during the studies of the peculiarities of the formation of oxide films on the Ti6Al4V alloy in the electrolytes consisting of ethylene glycol, a small quantity of water (5 vol. %) and ammonia fluoride have been given. It was shown that the forming dependences that reflect the formation dynamics of oxide films on the alloy during the electrochemical oxidation in the electrolytes with ammonia fluorides concentrations varying in the range of 0.5 to $2 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ represent a linear dependence of the cell voltage on the electrolysis time. The obtained data are indicative of that the anode oxidation in the alloys under these conditions results in the formation of the oxide films of a dielectric type and in this case a maximum thickness is defined by the voltage value. The color of obtained films is not permanent and it is not corresponding to the color of the films obtained during the oxidation of alloy in the electrolytes that contain no activating ions. The slope angle of forming dependences is increased with an increase in the anode current density and it agrees with a proportional increase in the metal oxidation rate with an increase in the preset value of j_a . For the electrolytes

with the ammonia fluoride concentration of $2.5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ and higher the type of forming dependences is defined by the used current density. At high current densities, a linear behavior of the dependences is indicative of that the film formation rate exceeds that of its chemical dissolution. At the current densities of 1 to $2 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ the dependences lose their linear behavior and porous oxide films are formed. The obtained data allow us to draw a conclusion on the possibility of the formation of the films of barrier and porous types by way of a change in electrolysis parameters during the electrochemical oxidation of the Ti6Al4V alloy in ethylene glycol-based solutions. These serve as a prerequisite for the development of technological bases for the formation of oxide films with the functional properties that would allow them to be used as bioinert and biocompatible coatings and serve as a base for the formation of photocatalysts and corrosion-resistant coatings

Key words: *anode polarization, electrochemical oxidation, oxide film, forming dependence.*

Чорнофостова К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ В ТЕПЛОНОСІЇ ПЕРШОГО КОНТУРУ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000

У статті розглянуто математичну модель концентрації борної кислоти у першому контурі енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000. Особливістю моделі є нелінійна залежність динамічних властивостей об'єкта від витрати розчину кислоти або чистого конденсату. Розроблена імітаційна модель дозволяє дослідити реакцію об'єкта керування під час безперервної зміни керувального впливу від позитивного, тобто витрати борної кислоти, до негативного, тобто витрати конденсату. Зроблено висновки щодо зміни концентрації борної кислоти, яка у разі введення концентрованої борної кислоти та у разі підживлення чистим конденсатом відбувається за різними залежностями (під час використання безперервного способу керування).

Вагомою задачею на атомних електростанціях з реакторами типу ВВЕР є контроль певних параметрів теплоносія. Контроль вмісту борної кислоти в технологічних розчинах енергоблоків виступає одним із них (параметрів). Як результат, знаним методом регулювання є зміна концентрації БК у теплоносії першого контуру АЕС.

Борне регулювання – управління інтенсивністю ланцюгової реакції поділу (реактивністю) в дво-контурних водо-водяних ядерних реакторах. Призначено для компенсації повільних змін реактивності під час експлуатації реактора. Борне регулювання здійснюється зміною концентрації борної кислоти у першому контурі шляхом введення концентрованої борної кислоти (КБК) або чистого конденсату (ЧК) із системи підживлення-продувки. За збільшення концентрації борної кислоти у першому контурі відбувається зниження швидкості ядерної реакції і рівня потужності, а за зниження концентрації – збільшення потужності. Застосування борного регулювання дозволяє знизити нерівномірність енерговиділення в активній зоні реактора і збільшити час роботи реактора на номінальному рівні потужності. Тому виникає задача синтезу імітаційної моделі для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру енергоблоку АЕС, що дозволяє відстежити зміну концентрації БК.

Ключові слова: енергоблок АЕС, маневрування, борне регулювання, концентрація борної кислоти, нелінійна модель.

Постановка проблеми. У нинішній час ситуація на енергоринку України склалася така, що енергоблоки АЕС залучають до компенсації добових коливань споживання електричної енергії. Конструкція енергетичної установки з реакторами типу ВВЕР-1000 не передбачає її використання у маневрових режимах. Але дослідження [1–4] показують, що під час виконання деяких умов та обмежень це можливо.

Одною з таких умов є використання борного регулювання для оперативної зміни потужності реактора за обмеження діапазону регулювання від 100 до 85%.

Зараз змінення потужності виконується оперативним персоналом у ручному режимі. Це приводить до великого психофізичного навантаження

на персонал АЕС та врешті-решт може спричинити помилкові дії, що приведе до аварійної ситуації. Тому необхідно синтезувати автоматизовану систему регулювання потужності енергоблоку за допомогою використання борного регулювання. Перша задача, яку необхідно вирішити при цьому, – це побудувати адекватну математичну модель, що враховує вплив витрати кислоти або чистого конденсату на статичні та динамічні властивості об'єкта керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичні моделі концентрації борної кислоти від витрати кислоти чи конденсату розглянуті в роботах [5, с. 22] і [6, с. 18–24].

У роботі [5, с. 22] розглянута залежність концентрації в АЗ за введення БК та за

введення чистого конденсату в теплоносій першого контуру. Наведено криві розгону по вказаних каналах та обґрунтовано використання безперервного способу керування замість ступінчастого.

У роботі [6, с. 18–24] побудована математична модель, яка враховує різницю статичних та динамічних властивостей за зміни знаку керувального впливу. Ця модель побудована у припущенні, що витрати кислоти та конденсату максимальні.

Але в процесі регулювання витрати технологічних потоків змінюються в широких межах. Тому синтезовані раніше моделі є адекватними лише в обмеженому діапазоні витрат.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є моделювання зміни концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Отримати залежність постійної часу від зміни витрати борної кислоти $G_{bor/bor}$ та постійної часу від зміни витрати чистого конденсату $G_{bor/kon}$.

2. Синтезувати імітаційну модель для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за безперервної зміни витрат технологічних потоків.

На практиці борне регулювання (БР) полягає в дискретному введенні певної кількості концентрованої борної кислоти (КБК) або чистого конденсату (ЧК) до отримання бажаного результату, а оцінку своїх дій по БР оперативний персонал здійснює зазвичай за зміною рівня потужності, аксіального офсету і значенням коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення, а не за значенням концентрації борної кислоти. Якщо необхідну кількість концентрованої борної кислоти або чистого конденсату вводити монотонно, то кількість рідких радіоактивних відходів знижується [7, с. 3021–3026].

Зміна концентрації борної кислоти в теплоносій у випадку підживлення концентрованою борною кислотою при номінальній витраті борної кислоти (Рисунок 1(а)):

1. $\Delta G_{bor/bor} = 60 \text{ м/год};$
2. $\Delta G_{bor/bor} = 50 \text{ м/год};$
3. $\Delta G_{bor/bor} = 40 \text{ м/год};$
4. $\Delta G_{bor/bor} = 30 \text{ м/год};$
5. $\Delta G_{bor/bor} = 20 \text{ м/год};$
6. $\Delta G_{bor/bor} = 10 \text{ м/год}.$

Зміна концентрації борної кислоти в теплоносій у випадку підживлення чистим конденса-

том при номінальній витраті чистого конденсату (Рисунок 1(б)):

1. $\Delta G_{bor/kon} = 50 \text{ м/год};$
2. $\Delta G_{bor/kon} = 40 \text{ м/год};$
3. $\Delta G_{bor/kon} = 30 \text{ м/год};$
4. $\Delta G_{bor/kon} = 20 \text{ м/год};$
5. $\Delta G_{bor/kon} = 10 \text{ м/год}.$

Для моделювання цієї залежності були ідентифіковані та описані такими диференціальними рівняннями:

– за введення розчину борної кислоти:

$$T_1 * \frac{dC_{bor}}{dt} + \Delta C_{bor} = k_1 * \Delta G_{bor}$$

– за введення чистого конденсату:

$$T_2 * \frac{dC_{bor}}{dt} + \Delta C_{bor} = k_2 * \Delta G_{H_2O}$$

де C_{bor} – концентрація борної кислоти, $\frac{г}{кг}$; k_1, k_2 – коефіцієнти передачі, $\frac{г/кг}{м/год}$; T_1, T_2 – постійні часу, с;

ΔG_{bor} – зміна витрати розчину борної кислоти, $\frac{т}{год}$;

ΔG_{H_2O} – зміна витрати чистого конденсату, $\frac{т}{год}$.

У рамках дослідження було прийнято, що номінальна витрата борної кислоти $\Delta G_{bor} = 40 \frac{т}{год}$, номінальна витрата чистого конденсату $\Delta G_{H_2O} = 40 \frac{т}{год}$ [5, с. 22]

Для таких витрат коефіцієнти передачі об'єкта регулювання незмінні і дорівнюють:

$$k_1 = 40 \frac{г/кг}{м/год}, k_2 = 16 \frac{г/кг}{м/год};$$

Оскільки введення борної кислоти вважаємо монотонним, то постійна часу T для кожного з випадків буде різною. Отримаємо її, опрацювавши графіки (використовуючи метод найменших квадратів), зображені на Рисунку 1.

Побудуємо графіки залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти G_{bor} :

За графіками можна зробити висновок, що зміна витрати борної кислоти G_{bor} відбувається за степеневу залежністю (Рисунок 2) та за експоненційною залежністю (Рисунок 3).

Далі синтезуємо імітаційну модель для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру.

Для цього в середовищі імітаційного моделювання Simulink пакету MATLAB було розроблено схему зміни концентрації борної кислоти. Схема представлена на рисунку 4.

У результаті було отримано графіки:

З графіків видно, як змінюється концентрація БК в теплоносії у разі введення концентрованої борної кислоти (Рисунок 5) та у разі підживлення чистим конденсатом (Рисунок 6) за використання безперервного способу керування.

Висновки. У роботі було отримано залежність постійної часу від зміни витрати борної кислоти $G_{bor/bor}$ та залежність постійної часу від зміни витрати чистого конденсату $G_{bor/kon}$. Можна зробити висновки, що зміна витрати борної кислоти

G_{bor} відбувається за степеневою залежністю та за експоненційною залежністю.

Також було проведено синтез імітаційної моделі для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за безперервної зміни витрат технологічних потоків. Це дало змогу отримати графіки часових залежностей, де видно, як змінюється концентрація борної кислоти в теплоносії у разі введення концентрованої борної кислоти та у разі підживлення чистим конденсатом за використання безперервного способу керування.

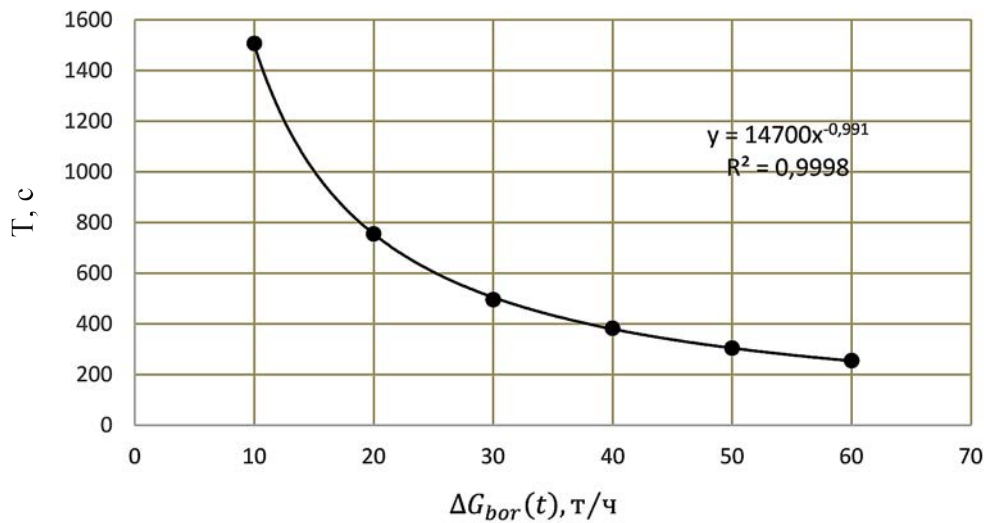


Рис. 2. Графік залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти у разі підживлення концентрованою борною кислотою $G_{bor/bor}$

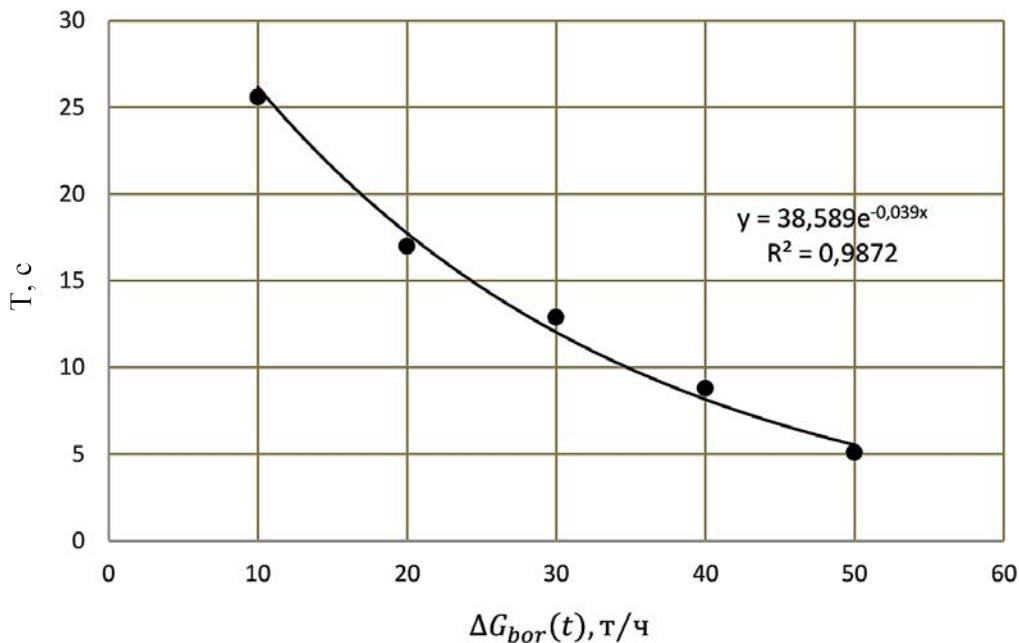


Рис. 3. Графік залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти у випадку підживлення чистим конденсатом $G_{bor/kon}$

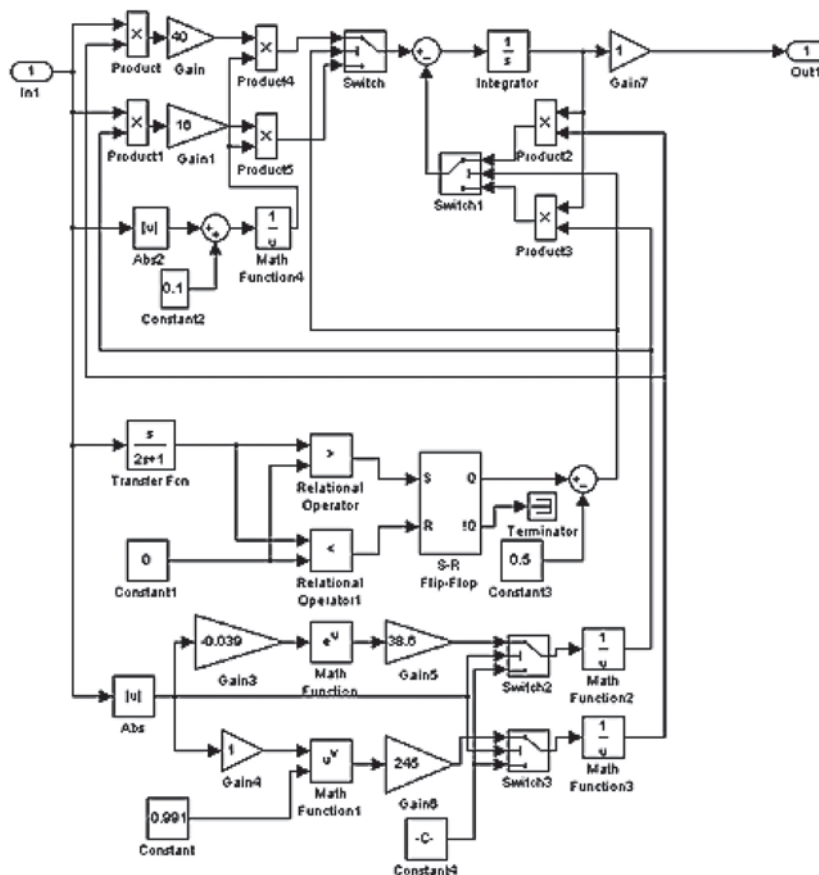


Рис. 4. Схема моделювання зміни концентрації борної кислоти

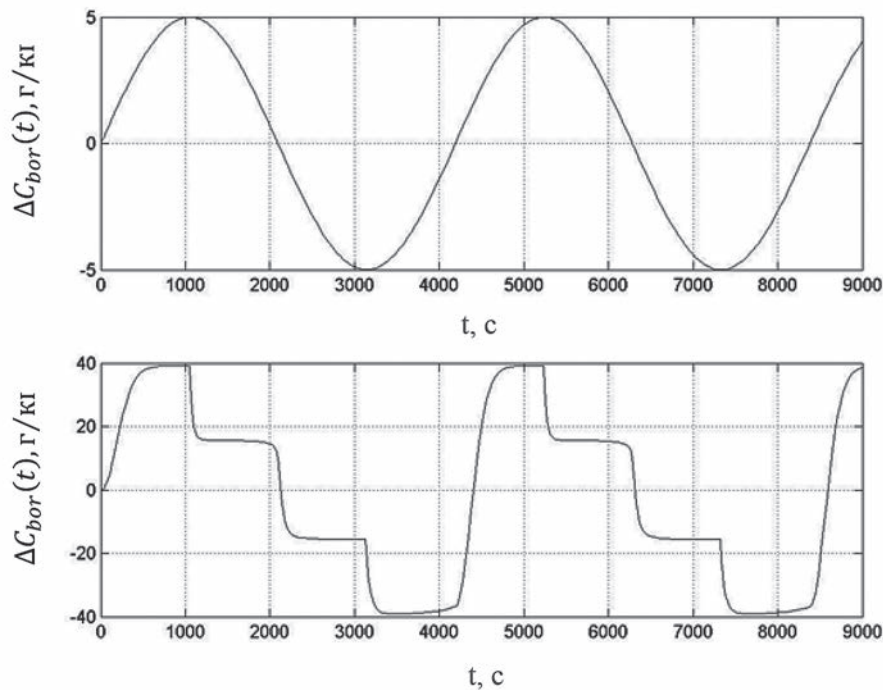
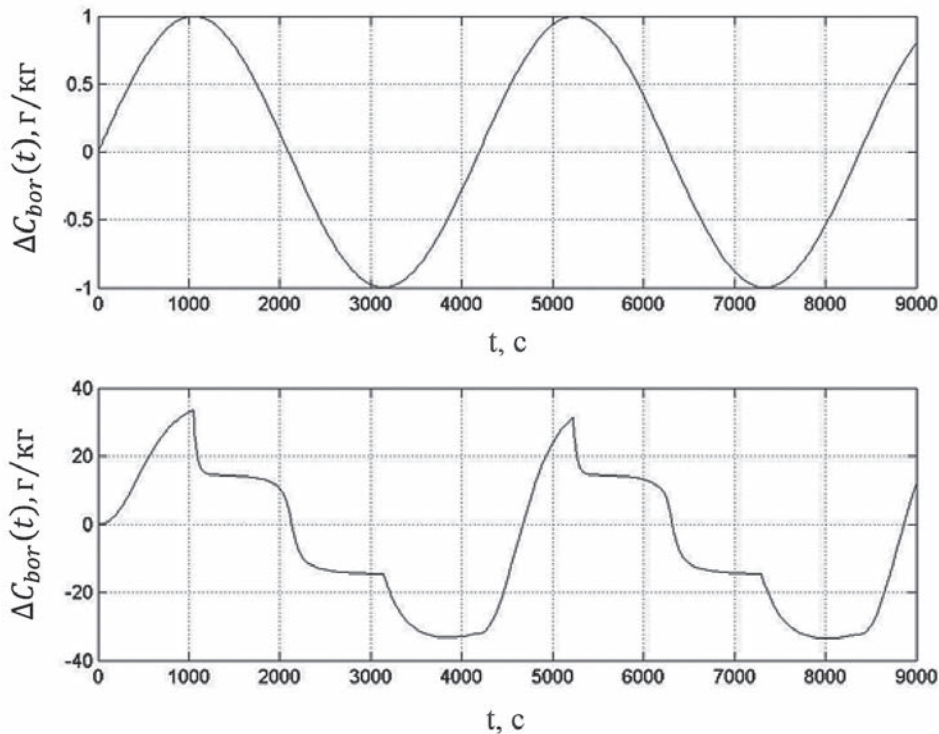


Рис. 5. Часові залежності-вхідний і вихідний сигнали. Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення концентрованою борною кислотою за монотонного введення в теплоносії



**Рис. 6. Часові залежності-вхідний і вихідний сигнали.
Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення
чистим конденсатом за монотонного введення в теплоносії**

Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Игнатенко Е.И., Пыткин Ю.Н. Маневренность реакторов типа ВВЭР. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 83 с.
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2007. Вып. 2(28). С. 56–59.
4. Pelykh S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N.Pelykh, M.V. Maksimov. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241, № 8. P. 2956–2963.
5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2002. № 2 (22). С. 22.
6. Волошкіна О.О., Беглов К.В. Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–24.
7. Maksimov M.V. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov; *Nuclear Engineering and Design*, 2009. Vol. 239, № 12. P. 3021–3026.
8. Харабет О.М. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера : навч. посіб. Одеса : Бахва, 2014. 188 с.
9. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко ; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
10. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. №2(8). С.19–27.
11. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. *Атомная энергия*. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.

12. Чмелев Е.И. Давидченко Д.В., Беглов К.В. Исследование каскадной автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока атомной электростанции. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 29. № 1. С. 137–142

13. Кокол Е.А. Оптимальное управление мощностью ВВЭР-1000 за счет целевого выбора программы регулирования. *Автоматика 2015: XXII Междунар. конф. по автоматическому управлению*. (Одесса, 10–11 сентября 2015 г.). Одесса, 2015. С. 119–120.

Chornofostova K.V., Behlov K.V. MODELING OF CHANGE OF BORIC ACID CONCENTRATION IN THE FIRST CIRCUIT OF THE POWER PLANT OF WWER-1000 POWER PLANT

The article describes mathematical model of boric acid concentration in the first circuit of a WWER-1000. The peculiarity of the model is the nonlinear dependence of the dynamic properties of the object on the flow of acid solution or pure condensate. Developed model allows us to investigate the reaction of control object with continuous change of control influence from positive, that is consumption of boric acid, to negative, that is consumption of condensate. Conclusions were made regarding the change in the concentration of boric acid, which in the case of the introduction of concentrated boric acid and in the case of feeding with pure condensate has different depending (using a continuous control method).

An important task at nuclear power plants with WWER reactors is to control certain coolant parameters. Control of boric acid content in technological solutions of power units is one of them (parameters). As a result, a known method of regulation is to change the concentration of BA in the coolant of the first circuit of the NPP.

Boron control is the control of the intensity of the fission chain reaction (reactivity) in double-circuit water-water nuclear reactors. Assigned to compensate for slow changes in reactivity during the operation of the reactor, it is carried out by changing the concentration of boron (boric acid) in the water of the first circuit. Boron regulation is carried out by changing the concentration of boric acid in the first circuit by introducing concentrated boric acid or pure condensate from the feed-purge system. Increasing the concentration of boric acid in the first circuit reduces the rate of nuclear reaction and the level of power, and with a decrease in concentration – an increase in power. The use of boron control allows to reduce the irregularity of energy release in the reactor core and to increase the reactor operating time at the rated power level. Therefore, there is a problem synthesis of a simulation model to study the concentration of boric acid in the coolant of the first circuit of the NPP unit, allowing us to track the change in the concentration of boric acid.

Key words: NPP unit, maneuvering, regulation of boric acid, boric acid concentration, nonlinear model.

Ячменьов Я.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Левківський В.Л.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кравченко С.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Гришкун Є.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНТЕГРАЦІЇ MAGENTO 2 У WORDPRESS ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАГІНУ

У цій роботі розглянуто розробку нового програмного забезпечення у вигляді плагіну на базі CMS “WordPress” (PHP/MySQL) та з використанням API Magento 2 (PHP/MySQL) для здійснення автоматичної інтеграції вмісту Magento 2 у WordPress та ліквідації усіх можливих конфліктів між обома системами. Система інтеграції Magento 2 у WordPress створюється з метою максимального збереження можливостей WordPress, інтегрування до даного блогowego рушія дизайну із Magento 2 (блоків, контейнерів, JS/CSS), вмісту Magento 2 (продуктів, категорій тощо), зменшення витрат на додаткові ресурси для розробки і підтримки блогу для наявного електронного магазину.

Проведений аналіз предметної області дозволив визначити основні аспекти інтеграції Magento 2 у WordPress. Огляд наявних аналогів та виявлення протиріч між наявними можливостями та потребами показав, що головними функціями майбутньої системи мають бути: повне збереження функціоналу WordPress, інтеграція із Magento версії 2.0–2.3 по дизайну та вмісту, наявність шорткодів та віджетів, наявність зручного GUI, наявність API для розширення та використання іншими системами. Для збереження масштабованості системи інтеграції було взято за основу подійно-орієнтовану архітектуру. Розглянуто алгоритми основних процесів системи та проаналізовано особливості функціонування ядра інтеграції. Наведено детальний розгляд деяких аспектів реалізації.

Розроблений плагін використовуватиметься для забезпечення електронних магазинів на Magento 2 сучасним та багатофункціональним блогом на системі керування вмістом “WordPress” без додаткових витрат на команду розробників і дизайнерів із боку клієнта, окрім того, даний продукт може бути розділений на дві версії – повну (платна) та неповну (безкоштовна, публічна), що також принесе неабиякий зиск. Система може бути використана для забезпечення електронного магазину повнофункціональним блогом із мінімальними витратами на розробку, або навпаки, для забезпечення блогу електронним магазином.

Ключові слова: Magento, Magento 2, інтеграція, WordPress, плагін, ядро, PHP.

Постановка проблеми. Із розвитком мережі інтернет та просуванням її до широкого загалу різкими темпами почала прогресувати електронна комерція (надалі ЕК), що торкнулася всіх куточків нашого життя в наступних своїх проявах: електронний обмін інформацією, електронний рух капіталу, електронна торгівля, електронні гроші, електронний маркетинг, електронний банкінг, електронні страхові послуги тощо. Досить цікавим складником ЕК є електронні магазини. Нині їхній розвиток та потреби сучасного споживача сприяють виникненню великих фреймворків, систем керування вмістом (далі – СКВ), що мають розви-

нену спільноту програмістів у всьому світі. Прикладом можуть бути такі системи: WooCommerce (у вигляді плагіну під СКВ “WordPress”), Shopify, Magento, PrestaShop та інші. Проаналізувавши перелік платформ для електронних магазинів і збудувавши їхній рейтинг за використанням в порядку спадання, з’ясується, що перші дві – WooCommerce та Magento [1]. WooCommerce має такий високий рейтинг завдяки дуже відомій і розповсюдженій СКВ для створення блогів – WordPress, але доцільність її використання для створення середнього чи великого магазину підлягає критиці. Щодо Magento, то ця платформа

розроблена саме для створення середньо-великих електронних магазинів.

Після створення достатньої кількості електронних магазинів на Magento 1 було виявлено потребу клієнтів у багатофункціональному блозі, який повинен розміщуватися на одному ж сервері із Magento і мати схожий чи подібний дизайн без залучення великих ресурсів. Варіанти із модулем під Magento 1 одразу не підходили, бо мали недостатньо функціоналу порівняно із WordPress блогом, погану пошукову оптимізацію сайту (далі ПОС) тощо. Для Magento 1 магазинів був доступний варіант із використанням вже готового плагіну інтеграції з WordPress блогом, що дозволяв перенести дизайн Magento 1 платформи і показувати продукти зі сторони WordPress блогу [2].

Після приходу на ринок електронної комерції нової Magento 2, де було перероблено архітектуру, систему кешування тощо, обране вище рішення із плагіном під WordPress перестало бути актуальним через неможливість роботи із оновленою Magento самого плагіну, а його розробник повідомив аудиторію, що не знає способів ефективного поєднання Magento 2 і WordPress [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті Івана Сергійовича Степури [4] викладено процес створення сайту Інтернет-медіа «Грінченко-інформ», призначеного для публікації творчих доробків студентів спеціальності «Журналістика». Визначено вимоги до цього ресурсу, порівняно системи керування контентом, описано особливості реалізації сайту та додаткових плагінів, проаналізовано статистику використання ресурсу. В роботі [5] було встановлено, що саме за допомогою плагіну iThemes Security можна подолати будь-які загрози безпеки сайту. Плагін iThemes Security створений для запобігання будь-яким спробам несанкціонованого доступу до WordPress за допомогою різноманітних методів. У статті Євгена Язвинського [6] визначено шляхи підвищення конверсії для будь-яких магазинів, що функціонують у сегменті B2C & B2B, на прикладі системи управління контентом Magento CMS. Наводяться рекомендації стосовно впливу окремих рішень на підвищення показника конверсії. Основними рекомендаціями є: постійний пошук інноваційних рішень; тестування та налаштований зворотній зв'язок з клієнтами, а також переймання передового досвіду західних колег, які є більш обізнаними у сфері електронної комерції; використання бенчмаркінгових заходів на шляху вдосконалення власного ресурсу.

У розглянутих працях авторами застосовано технології WordPress або Magento для розв'язання певних задач, але матеріалів, які б вирішували проблему здійснення автоматичної інтеграції вмісту Magento 2 у WordPress, не знайдено.

Постановка завдання. Після ретельного аналізу ситуації з відсутністю рішення для забезпечення електронного магазину на платформі Magento 2 багатофункціональним блогом було поставлене завдання розробки плагіну під WordPress. Він дозволить ефективно поєднати вміст системи Magento 2 у блозі, створеному на WordPress, що матиме подійно-орієнтовану архітектуру [7] для легшої інтеграції із плагінами інших WordPress розробників.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час проектування архітектури інтеграції обох систем та її програмування було виявлено конфлікт на базі суперглобальної PHP змінної “\$_SERVER” [8], без вирішення якого подальша інтеграція була б неможливою. Тому розглянемо ядро інтеграції, а саме два базових алгоритми, в одному з яких вирішується фундаментальний конфлікт систем.

Основною частиною системи є ядро інтеграції Magento 2 у WordPress у вигляді статичного класу “M2I_External”. Клас “M2I_External” виконує не тільки роль монолітного ядра інтеграції, він є своєрідним мостом між WordPress і Magento, що забезпечує вирішення конфліктів між даними системами. Також цей клас зберігає у собі найважливіші об'єкти Magento, за допомогою яких можливе подальше розширення функціоналу інтеграції. Це ядро вміщує в собі методи, що здійснюють:

- додавання елементів із різних сторінок Magento;
- переведення Magento помилок у WordPress помилки та попередження;
- ініціалізацію Magento;
- збір основних об'єктів для написання API інтеграції;
- оптимізацію середовища до запуску Magento;
- переклад тексту системою Magento;
- повний запуск Magento;
- вибір потрібної крамниці Magento;
- надання додаткової інформації про посилення Magento, версію цієї системи тощо.

Плагін інтеграції Magento 2 у WordPress повинен мати щонайкраще ядро, яке буде легке у використанні, що дозволить реалізувати увесь подальший функціонал плагіну відповідно до вимог користувача. Варто навести основні методи, що будуть використовуватися найбільше (табл. 1).

Під час реалізації системи інтеграції було найбільш точно відпрацьовано етапи ініціалізації та повного запуску Magento в середовищі WordPress, що дозволило надалі у масштабувати систему інтеграції.

Розглянемо алгоритм ініціалізації Magento в плагіні інтеграції (рис. 1).

Спершу створюється об'єкт для збору помилок, адже ініціалізація зазвичай робиться лише один раз, а під час наступної ініціалізації об'єкт для збору помилок має бути новим, щоб мати можливість проаналізувати різницю. Далі перевіряється функція перекладу в системі WordPress. Якщо клієнт змінив її на варіант, запропонований документацією плагіну інтеграції [9], то ця функція вважається оптимізованою для використання із системою Magento. Інакше генерується попередження, що функція перекладу неоптимізована, а ініціалізація завершується. Після успішної перевірки на функцію перекладу ініціалізу-

ється коренева директорія Magento: перевіряється правильність шляху, за умови AJAX виклику зі сторінки базових налаштувань береться директорія, передана із даними POST запиту. Далі ініціалізується Bootstrap об'єкт – один із головних об'єктів Magento, без якого неможливий жоден запуск системи, окрім того, він створює ObjectManager – об'єкт, що дозволяє створювати екземпляри будь-яких класів Magento. Своєю чергою ObjectManager є сховищем екземплярів вже створених об'єктів, а тому він реалізовує твірний шаблон [10] проектування “Object pool” і є дуже важливим для подальшої роботи Magento системи. Під час ініціалізації Bootstrap об'єкту також створюється об'єкт автозавантажувача усіх класів Magento. Якщо Bootstrap об'єкт було ініціалізовано успішно, то його екземпляр буде збережено, ось чому існує перевірка на наявність цього об'єкту. У разі відсутності цього об'єкту процес ініціалізації Magento завершується. За наявності цього

Таблиця 1

Основні методи ядра інтеграції

Метод	Опис та призначення
add_handle(handle, [pageUrl : string = '/']) : void	Додає симуляцію обраної сторінки в Magento по handle з можливістю задання pageUrl за потреби. Цей метод може бути використаний для довантаження ще неіснуючих блоків і контейнерів, адже ядро інтеграції усталено завантажує вміст головної сторінки.
can_launch() : bool	Перевіряє: чи може Magento бути повністю запущеною.
get_app() : \Magento\Framework\App\Http null	Віддає об'єкт \Magento\Framework\App\Http, якщо він ще не був проініціалізований, то null.
get_base_url([type : string = 'static']) : string	Віддає різні види базових посилань Magento. Використовується для інтеграції вмісту.
get_bootstrap() : \Magento\Framework\App\Bootstrap null	Віддає об'єкт \Magento\Framework\App\Bootstrap, що використовується для отримання ObjectManager, призначення якого було описано в розділі 2.3. Якщо Bootstrap непроініціалізований – метод віддає null.
get_error_helper() : M2I_Error_Helper null	Віддає контейнер, що може містити у собі помилки. Дозволяє перевірити: чи ядро зіткнулося із проблемами під час інтеграції.
get_layout() : \Magento\Framework\View/LayoutInterface null	Віддає об'єкт, що дозволяє вибрати усі блоки та контейнери. Дуже корисний об'єкт для інтеграції вмісту. Віддає null за відсутності повного запуску Magento.
get_response() : \Magento\Framework\App\ResponseInterface null	Віддає об'єкт, що містить у собі увесь вміст Magento, а саме HTML/CSS/JS код, дуже корисний об'єкт для подальшого розбору такого вмісту на окремі частини і комплексної інтеграції цих частин до вмісту WordPress. Повертає null за відсутності повного запуску Magento.
get_store() : \Magento\Store\Model\Store null	Віддає об'єкт крамниці Magento. Якщо сталася помилка, то генерує попередження в стилі WordPress та повертає null.
init([is_ajax : bool = false]) : void	Проводить ініціалізацію системи Magento. Без виклику цього методу використання будь-якого API Magento є неможливим.
is_mage_runs_from_root() : bool	Перевіряє налаштування запуску Magento в режимі “root”. Якщо Magento запущено в режимі “root”, то всі посилання будуть із префіксом “pub”.
launch() : void	Проводить повний запуск Magento.
was_launched() : bool	Перевіряє чи повний запуск Magento був проведений успішно.

об'єкту ініціалізація продовжується. Виконується модифікація середовища веб-серверу методом оптимізації суперглобальної змінної `$_SERVER` для безконфліктної роботи Magento, а попередній стан `$_SERVER` зберігається. Далі ініціалізується об'єкт `App` (повна назва `\Magento\Framework\App\Http`) через виклик `createApplication(...)` методу `Bootstrap` об'єкту. Відновлюється попередньо збережений стан `$_SERVER`. Наприкінці встановлюється інформація про можливе здійснення повного запуску Magento записом булевого значення `“true”` в поле класу `M2I_External` з назвою `“can_launch”`.

Розглянемо алгоритм повного запуску Magento в плагіні інтеграції (рис. 2).

В алгоритмі повного запуску Magento варто відзначити деякі моменти. Перевірка на те, чи був вже здійснений запуск, дозволяє зберегти час виконання завантаження системи WordPress, бо така перевірка може бути відсутня на якомусь етапі під час зовнішнього використання. Очищення `full_page` кешу є дієвим лише для Magento нижче 2.2.5 версії і повинно бути видалене в наступних версіях плагіну. Збереження об'єкту

`Layout` в ядрі потрібне для майбутнього отримання блоків і контейнерів при інтеграції вмісту Magento у WordPress. Збереження об'єкту `Store` потрібне для передачі правильних посилань та інших можливих перевірок. Встановлення потреби перекладу зі сторони Magento потрібне для ліквідації невідповідності параметрів між функцією перекладу WordPress та функцією перекладу Magento, що насправді міститься вже у функції перекладу WordPress, але перемикається параметром, ось чому ще під час ініціалізації Magento перевірка на оптимізацію внутрішньої функції WordPress для перекладів є найпершою умовою.

Розглянемо основні класи системи (табл. 2).

У процесі роботи системи відбувається базова інтеграція Magento 2 у WordPress, а тому є можливим написання прикладної інтеграції у процедурному стилі для забезпечення усіх вимог користувача і API плагіну інтеграції, а також для використання поза системою.

У головному файлі плагіну `“magento2-integration.php”` реалізовано ряд дій та фільтрів, а

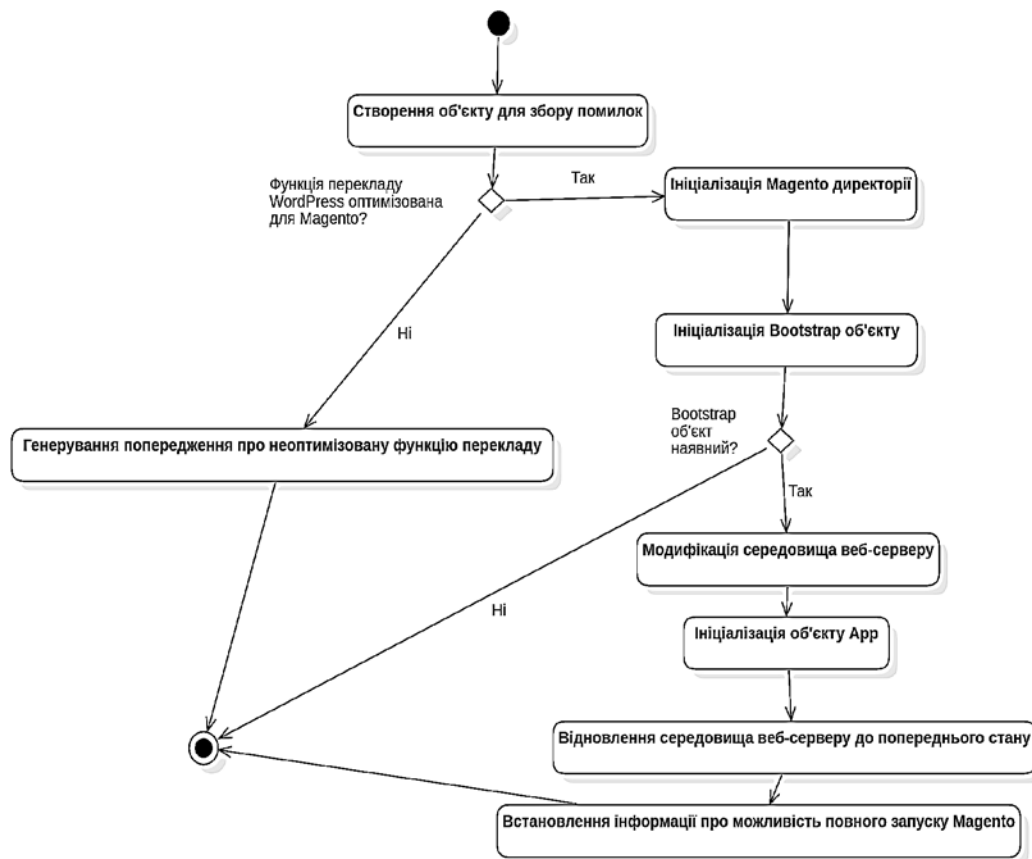


Рис. 1. Алгоритм ініціалізації Magento

також власні події, щоб забезпечити повноцінне функціонування інтеграції на всіх шаблонах системи WordPress. Для кращого розуміння функціоналу подійно-орієнтовної системи плагіну розглянемо головну функцію підключення “m2i_plugin_init”, що додається в ролі дії на подію WordPress “setup_theme”. Додавання на подію “setup_theme” дозволяє забезпечити теми WordPress потрібним API для реалізації ручного функціоналу із інтеграції вмісту. Програмний код функції “m2i_plugin_init” наведено на рисунку 3.

На рисунках 4 та 5 наведено кінцевий результат використання розробленого плагіну для інтеграції Magento 2 у WordPress. Як видно із рисунків, блог на рушії WordPress має такий же вигляд, як і на Magento 2, тому кінцевий користувач не помітить

різниця в користуванні. Те, що блог запущений на зовсім іншій системі, не завдасть незручностей для користувача, тобто відбудеться комфортний перехід сайту з однієї системи на іншу.

Висновки. Таким чином, було розглянуто алгоритми ініціалізації та повного запуску інтеграції Magento 2 у WordPress та основні класи системи. У роботі розроблено плагін, який використовується для забезпечення електронних магазинів на Magento 2 сучасним та багатофункціональним блогом на системі керування вмістом “WordPress” без додаткових витрат на команду розробників і дизайнерів із боку клієнта, окрім того, цей продукт розділений на дві версії повну (комерційна) та неповну (безкоштовна, “open source”). Протягом тривалого часу комерційна версія успішно

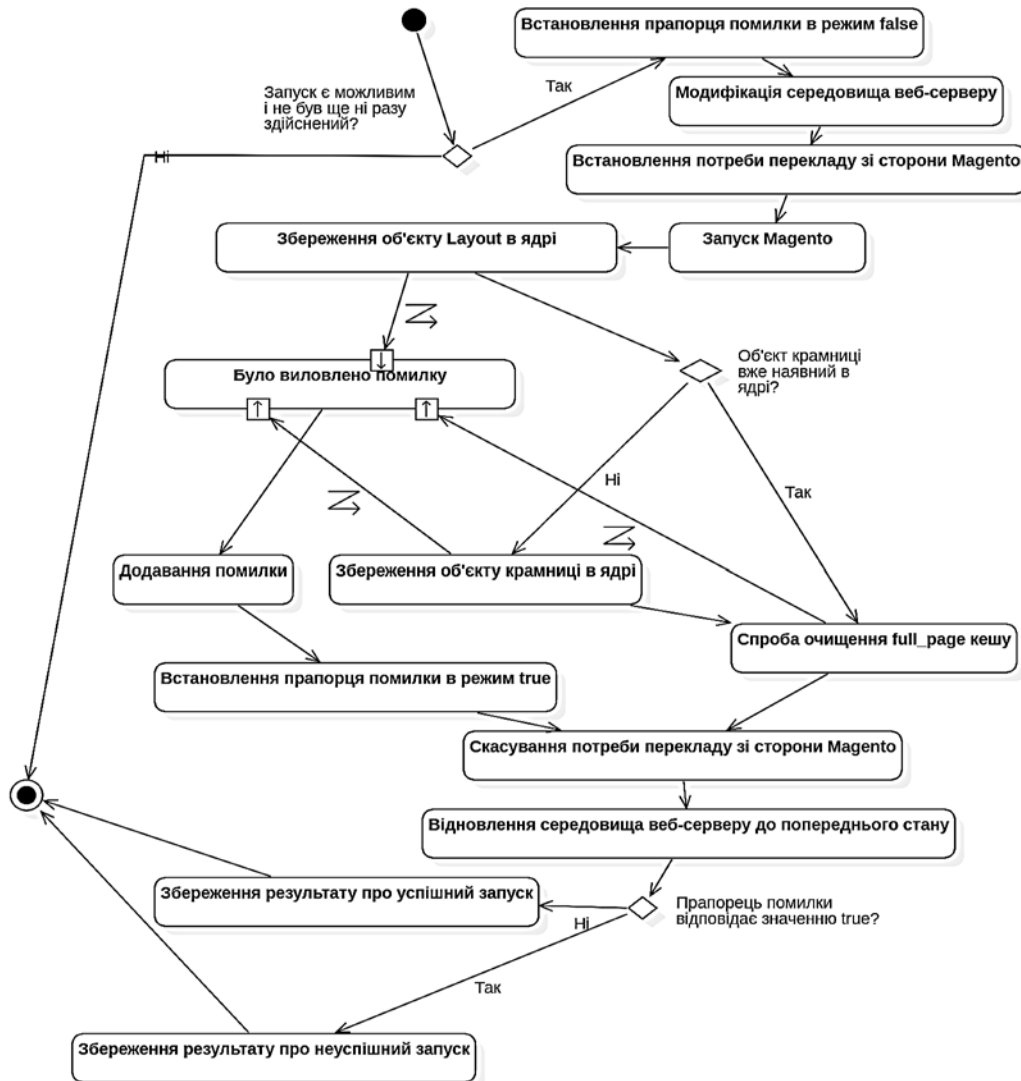


Рис. 2. Алгоритм повного запуску Magento

```

46  /** Entry point for the plugin */
47  function m2i_plugin_init() {
48
49      if ( ! m2i_is_php_version_compatible() ) {
50          add_action( 'admin_notices', 'm2i_admin_php_version_error' );
51          return;
52      }
53
54      /**
55       * @since 1.2.2 Added checking for xml extension loaded.
56       */
57      if ( ! extension_loaded( name: 'xml' ) ) {
58          add_action( 'admin_notices', 'm2i_admin_xml_required_error' );
59          return;
60      }
61
62      require_once M2I_PATH_CLASSES . '/M2I_Error_Helper.php';
63      require_once M2I_PATH_CLASSES . '/M2I_Settings.php';
64      require_once M2I_PATH_CLASSES . '/M2I_External.php';
65      require_once M2I_PATH_PHP . '/functions.php';
66
67      /**
68       * Action before Magento2 init
69       * @since 1.1
70       */
71      do_action( tag: 'm2i_before_init' );
72
73      M2I_External::init();
74
75      /**
76       * Action after Magento2 init
77       * @since 1.1
78       */
79      do_action( tag: 'm2i_after_init' );
80  }

```

Рис. 3. Головна функція підключення “m2i_plugin_init”

Таблиця 2

Опис основних класів системи

Клас	Опис
M2I_Content	Відповідає за додавання дій на події WordPress, що знаходяться у верхній та нижній частині сайту, а також після підключення основного темплейту. Допомогає навісити функціонал по автоматичній інтеграції (перехоплення верхньої та нижньої частини WordPress) та інтеграції CSS/JS вмісту Magento. Повна публічність цього класу дозволить розробникам використовувати його у своїх темах та плагінах за потреби.
M2I_Mage_Autoloader	Успадковує клас \Magento\Framework\Code\Generator\Autoloader із системи Magento, що відповідає за автоматичне завантаження інших класів Magento. M2I_Mage_Autoloader запобігає можливим конфліктам між автоматичними підвантажувачами PHP та логує усі фатальні помилки, що надходять від Magento, не дозволяючи їм зламати функціонування WordPress.
M2I_DOMDocument	Успадковує стандартний клас PHP, що відповідає за розбір XML/HTML вмісту, запобігає виникненню внутрішніх помилок, передає встановлене кодування вмісту відповідно до налаштування WordPress.
M2I_Editor_Button	Згідно з подійно-орієнтованою архітектурою збирає до купи усі пов’язані між собою дії по додаванню кнопки для швидкого вибору потрібного шорткоду. Містить у собі генерацію модального вікна для даних шорткодів, встановлює зв’язок із налаштуваннями віджетів для економії коду, тобто віджети використовуються для генерації потрібного шорткоду для подальшого вставлення до вмісту публікації цього шорткоду.
M2I_Widgets	Збирає до купи усі дії для подій у WordPress, що використовуються для віджетів. Запускає весь процес інтеграції із Magento для використання її у віджетах системи. В автоматичному режимі підвантажує та реєструє усі віджети з директорії widgets у системі інтеграції, оминаючи інтерфейси чи абстрактні класи для включення на реєстрацію.

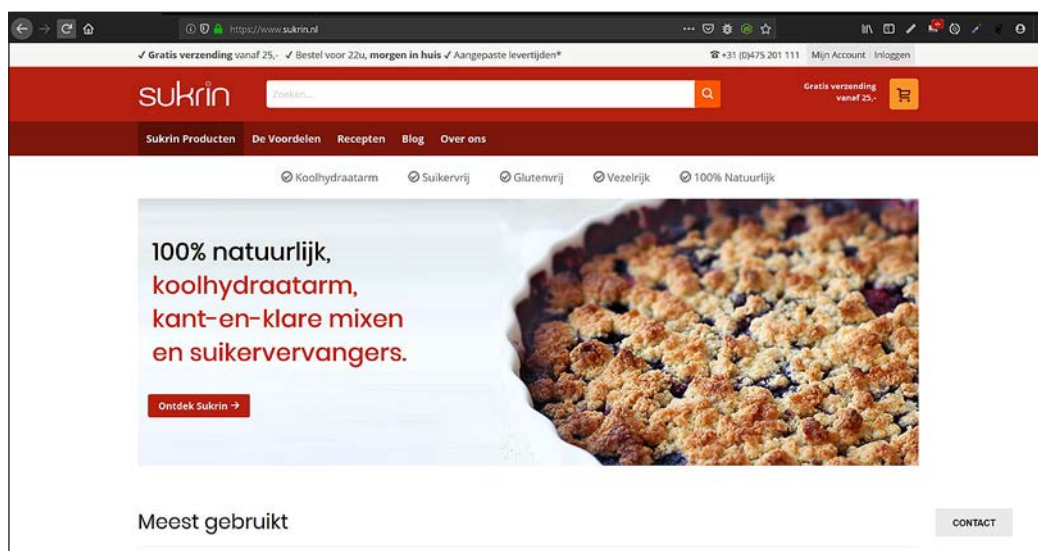


Рис. 4. Вигляд сайту в системі Magento 2

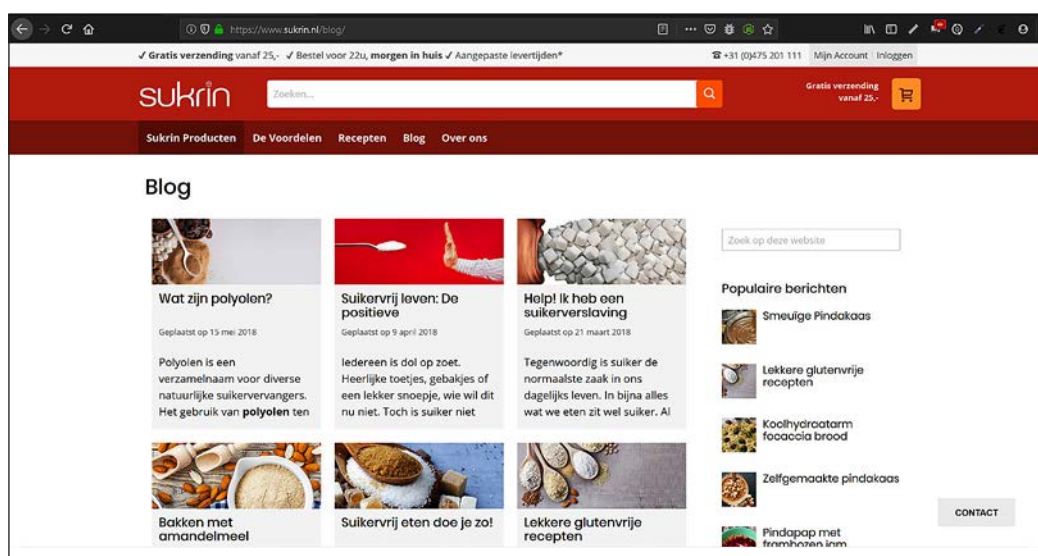


Рис. 5. Вигляд сайту в системі WordPress

продається на ринку WordPress плагінів та має більше 300 активних користувачів, що позначає неабиякий успіх продукту [11].

Реалізований плагін готовий до використання. Система може бути використана для забезпечення електронного магазину повнофункціональним бло-

гом із мінімальними витратами на розробку або навпаки, забезпечення блогу електронним магазином. Надалі ця система може бути розширена шляхом впровадження нового функціоналу та розширення наявного API. Завдяки обраній архітектурі масштабування системи відбудуватиметься значно швидше.

Список літератури.

1. News – One-third of the web! – WordPress.org. URL: <https://wordpress.org/news/2019/03/one-third-of-the-web>.
2. Magento WordPress Integration. URL: <https://uk.wordpress.org/plugins/magento-wordpress-integration/>.
3. Magento 2 compatibility. URL: <https://wordpress.org/support/topic/magento-2-compatibility/>.
4. Степура І. С. Особливості використання системи wordpress при реалізації сайту видання «Грінченко-інформ». Електронне наукове фахове видання «Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету». 2016. С. 240–243. URL: <https://openedu.kubg.edu.ua/journal/index.php/openedu/article/view/50>.
5. Мельник М.О. Організація захисту сайту, створеного на платформі WordPress за допомогою плагіна iThemes Security / М.О. Мельник, Р.В. Дудко, А.Д. Поліщук. Системи обробки інформації. 2017. № 2(148). С. 118–121. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.148.22>.

6. Язвинський Є. Шляхи підвищення конверсії в галузі e-commerce для вітчизняних підприємств. 2014. С. 224–231. URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis.
7. Event Processing: Designing IT Systems for Agile Companies / W. Roy Schulte, K. Mani Chandy. McGraw-Hill Education; 1 edition, 2009. 257 с.
8. \$_SERVER URL: <https://www.php.net/manual/en/reserved.variables.server.php>.
9. Magento 2 WordPress Integration. URL: <https://uk.wordpress.org/plugins/m2wp/#installation>.
10. Creational pattern. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Creational_pattern.
11. ZERO to ONE: NOTES ON STARTUPS, OR HOW TO BUILD THE FUTURE / Peter Thiel, Blake Masters – CROWN BUSINESS, New York, 2014 – 210 с.

Yachmenov Ya.O., Levkivskiy V.L., Kravchenko S.M., Grishkun E.O. AUTOMATIZATION OF THE INTEGRATION PROCESS MAGENTO 2 TO WORDPRESS WITH THE HELP OF A PLUGIN

In this work has been reviewed development of a new programming software as the plugin based on CMS “WordPress” (PHP/MySQL) and with the usage of Magento 2 API (PHP/MySQL) for making an automatic integration of Magento 2 content to WordPress and for resolving all possible conflicts between both systems. The system of integration Magento 2 to WordPress is building with the goal of maximum saving of WordPress possibilities, integration of Magento 2 design (blocks, containers, JS/CSS) to the blog engine, Magento 2 content (products, categories, etc.), reducing cost of additional resources for development and supporting blog for the requested e-commerce shop.

The done analysis of subject area has helped to determine the basic aspects of Magento 2 integration to WordPress. The review of existent alternatives and identifying of contradiction between available possibilities and needs has shown, that the list should include the next functions of the future system: full saving of WordPress functionality, an integration from Magento versions 2.0 – 2.3 in design and content, availability of handy GUI, availability of API for the further expanding and using with 3rd parties systems. The action oriented architecture has been selected for saving scalability of integration system. We’ve considered algorithms of the main system processes and analyzed features of integration engine functioning. We’ve given the detailed explanation of some realization aspects.

Developed plugin will be used for providing the modern and multifunctional blog based on the content management system “WordPress” to e-commerce shop based on Magento 2 without any additional costs for development team and designers from the client side, besides this, this product could be splitted up into two versions: the full one (paid) and limited one (free, public), which will make a good benefit too. This system might be used for providing the fully functional blog to the e-commerce store with minimal costs for development or vice-versa: providing e-commerce store to the blog.

Key words: *Magento, Magento 2, integration, WordPress, plugin, engine, PHP.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311:502.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/36>

Беднарська І.С.

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

Шелешей Т.В.

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

Риндюк Д.В.

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

Беднарська Я.С.

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

ОЦІНКА ВПЛИВУ МАРКИ МАЗУТУ НА ВИКИДИ СІРЧИСТОГО АНГІДРИДУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

У статті розглядається стан екологічної ситуації в країні й основні джерела забруднення навколишнього середовища. Незважаючи на впровадження «зеленого тарифу» й досліджень альтернативних джерел енергії, більшість екологічних проблем спричиняє саме енергетика, зокрема, теплова енергетика. Викладається аналіз впливу підприємств теплоенергетики на екологічний стан. Оскільки питання утилізації відходів не вирішено, механізми фінансування не передбачено, алгоритм енергооснащення не розроблено, а підзаконні акти не адаптовано, поставлено завдання вирішити й надати рекомендації, яке з видів палива, що використовується на великих енергетичних об'єктах, несе меншу загрозу для навколишнього середовища. До шкідливих викидів, що потрапляють в атмосферу під час спалювання мазуту, належать: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, оксид азоту NO , діоксид азоту NO_2 , оксиди сірки SO_2 та SO_3 , оксиди вуглецю CO , діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO_2), мазутна зола (в перерахунку на ванадій або п'ятиоксид ванадію), метан CH_4 . Одним із найбільш токсичних газоподібних викидів енергоустановок при спалюванні й вугілля, і мазуту є діоксид сірки SO_2 , що становить 98–99% викидів сірчистих сполук теплової електростанції. Основною метою дослідження є визначення впливу марки мазуту на показник емісії викидів сірчистого ангідриду. Проаналізовано вплив на навколишнє середовище сірчистого ангідриду, що виділяється разом із продуктами згоряння під час спалювання різних марок мазуту й потрапляє в атмосферу разом із відхідними шкідливими газами. Зроблені рекомендації щодо вибору марки мазуту для спалювання на енергетичних установках великої потужності. Було розраховано показники емісії при спалюванні різних марок мазуту з врахуванням відсутності сіркоочисної установки й однакових умов зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці. Встановлено, що найбільш доцільна з екологічного боку марка мазуту для спалювання на енергетичних установках – це малосірчистий мазут 40, оскільки показник емісії сірчистого ангідриду найменший. Отримані поліноміальні залежності показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої робочої теплоти згоряння палива й вмісту сірки в паливі на робочу масу.

Ключові слова: теплоенергетика, марка мазуту, спалювання, шкідливі викиди, екологія, показник емісії, сірчистий ангідрид, оксиди сірки.

Постановка проблеми. Бурхливий розвиток людства, що розпочався у XX столітті, як технологічної цивілізації привів до різкого збільшення

енергетичних потреб. У повітря кожного року потрапляє понад 6 млн тонн речовин, які забруднюють атмосферу, зокрема вуглекислого газу.

Головними забруднювачами є промислові підприємства й великі об'єкти теплоенергетики. Тому ще на початку XXI століття екологічні проблеми здобули статус глобальних [1].

На сучасному етапі розвитку суспільства екологія вирішує коло проблем і користується методами, матеріалами, принципами, які далеко виходять за межі суто біологічних наук, оскільки проблема стану навколишнього середовища постає все гостріше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на впровадження «зеленого тарифу» й дослідження альтернативних джерел енергії, більшість екологічних проблем спричиняє саме енергетика, а зокрема, тепла енергетика. І натепер головна мета науковців у сфері теплоенергетики – це зменшення викидів шкідливих речовин.

Коли згорає паливо, в повітря потрапляє велика кількість шкідливих речовин. Це газоподібні оксиди сірки й азоту, тверді частки золи й сполуки важких металів [2]. Не можна забувати й про величезну кількість вуглекислого газу, який створює парниковий ефект і змінює тепловий баланс Землі. Саме тому найактуальнішою темою найближчого десятиліття є розробки й дослідження задля владнання згубливого впливу теплоенергетики. І незважаючи на поставлені задачі країн Західної Європи швидше перейти на альтернативні джерела енергії, цього так швидко не досягти, й теплоенергетика ще довго слугуватиме одним із провідних джерел енергії.

Не дивлячись на те, що заявлена «Значна орієнтація на охорону навколишнього середовища з посиленням екологічних норм і розвитком генерації на базі нетрадиційних і поновлюваних джерел», реальної підтримки розвитку альтернативних джерел на світовому рівні не передбачено. Так само проігноровано екологічні складові розвитку електроенергетики, а саме проблеми теплового й газового забруднення атмосфери (викиди оксидів сірки, азоту тощо), нестачі водних ресурсів, пилового забруднення та забруднення поверхневих і підземних вод [1].

Для покращення екологічної ситуації країни Західної Європи створили Національний план скорочення викидів. Він створений задля поступового скорочення викидів діоксиду сірки й оксидів азоту. Національний план скорочення викидів встановлює обмеження на річні викиди обсягів SO_2 та NO_x .

Нещодавно Україна зобов'язалась дотримуватися положення Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. Згідно з ним, після

2017 року всі спалювальні установки мають бути виконані, дотримуючись вимог Директиви 2001/80/ЄС, в якій йдеться про зменшення шкідливих викидів в атмосферу з великих промислових установок. Але оскільки країна не змогла вчасно виконати умови директиви, за статтею 4 їй надано можливість на тимчасовий відступ.

Строк дії Національного плану скорочення викидів: з 2018 по 2033 рік. Часу залишилось обмаль, а директива вимагає в найближчі роки зменшити кількість викидів деяких речовин у повітря від установок. Для забезпечення своїх зобов'язань Україна має скористатися успішним досвідом скорочення викидів забруднювальних речовин низкою європейських країн, зокрема Німеччини й Польщі, впродовж останніх 20 років [3].

Зниження викидів планується здійснити за допомогою будівництва нових модернізованих енергоблоків (27 нових блоків теплових електростанцій (далі – ТЕС) і теплоенергоцентралей (далі – ТЕЦ)), обмеженої кількості годин роботи енергоблоків із подальшим їх виведенням з експлуатації (133 установок) й оснащення наявних блоків газочисними спорудами (90 установок) [4].

Постановка завдання. Оскільки питання утилізації відходів не розв'язано, механізми фінансування не передбачено, алгоритм енергооснащення не розроблено, а підзаконні акти не адаптовано, слід надати рекомендації, яке з видів палива, що використовується на великих енергетичних об'єктах, несе меншу загрозу для навколишнього середовища.

У теплоенергетиці спалюють тверде паливо (вугілля), рідке (мазут) і газоподібне (природний газ). Проведено низку досліджень про вибір найкращого палива задля уникнення великої кількості шкідливих викидів в атмосферу. В порівнянні з твердим паливом мазут вважається значно екологічно чистішим, але кращий у цьому плані – природний газ. Тому багато блоків ТЕС і ТЕЦ, згідно з вище вказаними дослідженнями, переведено на природний газ. У котлах теплових електростанцій мазут, зазвичай, використовується як резервне паливо. Тому йому теж варто приділити увагу.

До шкідливих викидів, що потрапляють в атмосферу під час спалювання мазуту, належать: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, оксид азоту NO , діоксид азоту NO_2 , оксиди сірки SO_2 та SO_3 , оксиди вуглецю CO , діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO_2), мазутна зола (в перерахунку на ванадій або п'ятиоксид ванадію), метан CH_4 . Одним із найбільш токсичних газопо-

дібних викидів енергоустановок під час спалювання і вугілля, і мазуту є діоксид сірки SO_2 , що становить 98–99% викидів сірчистих сполук ТЕС. Отже, основною метою дослідження є визначення впливу марки мазуту на показник емісії викидів сірчистого ангідриду.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Мазут, який використовується в енергетиці, представлений на ринку здебільшого трьох марок – 40, 100 і 200. У мазуті міститься 84–86% вуглецю та 11–12% водню, вміст вологи не перевищує 3–4%, а золи – 0,5% [7]. Сірка, яка міститься в мазуті, може бути поділена на горючу й негорючу. Вона входить до складу вуглеводневих палив як шкідлива домішка. Це зумовлене тим, що в камері згоряння, з'єднуючись з киснем, вона утворює двооксид сірки (сірчистий ангідрид), частина якого окислюється, утворюючи вищий оксид SO_3 . А також у продуктах згоряння завжди є пари води, які утворюють з парами SO_3 пари сірчаної кислоти H_2SO_4 . Наявність сірчаної кислоти в димових газах викликає низькотемпературну корозію поверхонь нагріву котла, газоходів і металевих конструкцій димової труби [5].

Також шкода сірчистого ангідриду полягає в тому, що кисень, який міститься в повітрі, разом зі світлом окислює сірчистий газ до отримання сірчистого ангідриду. Кінцевий продукт цієї реакції – аерозоль сірчаної кислоти в атмосфері. Це розчин кислоти в дощовій воді. Коли він випадає разом із дощем, то окислює ґрунт і негативно впливає на навколишнє середовище й людей. Учені вважають, що ці опади є однією з найважливіших причин деградації лісів. Від кислотних дощів страждають будівлі й споруди, кам'яні й металеві конструкції. Особливо страждають мармурові й вапнякові споруди. Через підвищену кислотність міського повітря останнім часом помітно прискорилося руйнування мармурових споруд і пам'ятників, що витримали натиск століть.

Як вказано вище, до основних марок мазуту, які використовуються в енергетиці [8], належать високосірчистий мазут марок 40, 100 й 200 і малосірчистий мазут 40 і 100. Вони відрізняються між собою енергетичним складом, а отже й кількістю викидів сірчистого ангідриду в результаті спалювання.

Валові викиди забруднювальних речовин і парникових газів визначаються за галузевим керуючим документом (далі – ГКД) 34.02.305–2002 шляхом постійних вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у димових газах енергетичних установок і розрахункових методів

за даними про витрати й склад використаного палива й характеристики енергетичних і газоочисних установок. Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базуються на використанні показника емісії, що характеризує масову кількість забруднювальної речовини, яка викидається енергетичною установкою в атмосферне повітря разом із димовими газами, віднесену до одиниці енергії, що виділяється під час згоряння палива. Викид залежить від багатьох чинників. Показник емісії k_{SO_2} , г/ГДж оксидів сірки SO_2 та SO_3 в перерахунку на діоксид сірки SO_2 , який надходить в атмосферу з димовими газами, специфічний і розраховується за формулою [6]:

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (1)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг; S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %; η_I – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці; η_{II} – ефективність очищення димових газів від оксидів сірки; β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Нижча робоча теплота згоряння палива (Q_i^r) – це кількість теплоти, виділеної під час повного згоряння палива за вирахуванням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в паливі.

Нижча теплота згоряння розраховується за формулою Менделєєва:

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r - 108,8(O^r - S^r) - 25W^r, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

де C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу; H^r – масовий вміст водню в паливі на робочу масу; O^r – масовий вміст кисню в паливі на робочу масу; S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу; W^r – масовий вміст вологи в паливі на робочу масу.

Масовий вміст сірки в робочій масі потрібно визначати під час технічного аналізу палива відповідно до Державного стандарту (ГОСТ) 27313–95 (ISO 1170–77).

Усереднені значення вмісту сірки для різних видів і марок палива наведено в таблиці 1.

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом в енергетичній установці η_I залежить від технології спалювання та хімічного складу палива, яке спалюється, і типу сорбенту. В розрахунках враховували однакові умови при спалюванні в одній і тій же енергетичній установці для всіх марок мазуту.

За відсутності даних для енергетичної установки про ефективність зв'язування сірки в топковому просторі значення η_t для різних технологій спалювання палива приймаються згідно з ГКД 34.02.305–2002.

За результатами розрахунків за формулою (1) в таблиці 2 наведено показники емісії сірчистого ангідриду під час спалювання різних марок мазуту.

Відповідно до таблиці 3 на рисунках 1 і 2 побудовані залежності показника емісії сірчистого ангідриду від вмісту сірки й нижчої теплоти згорання палива.

Як видно з рисунка 1, найбільш екологічно чистим є малосірчистий мазут марки 40. Під час його спалювання показник емісії сірчистого ангідриду найменший у порівнянні з марками високосірчистого мазуту. В дослідженнях участь брали

Таблиця 1

Склад енергетичних мазутів (ГКД 34.02.305–2002)

Показники	Марка мазуту				
	високосірчистий			малосірчистий	
	40	100	200	40	100
Середні:					
$S^{daf}, \%$	2,50	2,70	3,00	0,40	0,40
$C^{daf}, \%$	85,50	85,70	85,90	87,50	87,50
$H^{daf}, \%$	11,20	10,60	10,20	11,50	11,10
$(O + N)^{daf}, \%$	0,80	1,00	0,90	0,60	1,00
$Q^{daf}, \text{МДж/кг}$	40,40	40,03	39,77	41,24	40,82
Граничні:					
$A^d, \%$	0,15	0,15	0,30	0,15	0,15
Мазутна зола (V_2O_5), мг/кг	600	600	1200	600	600
$W^r, \%$	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00

Таблиця 2

Результати розрахунків

Марка мазуту	$S(daf), \%$	$Q_i^r, \text{МДж/кг}$	$k(SO_2), \text{г/ГДж}$
високосірчистий мазут 100	2,7	39,11936	475,2507
високосірчистий мазут 200	3	39,22799	478,0515
малосірчистий мазут 100	0,4	39,89237	466,0415
малосірчистий мазут 40	0,4	40,30334	461,2893

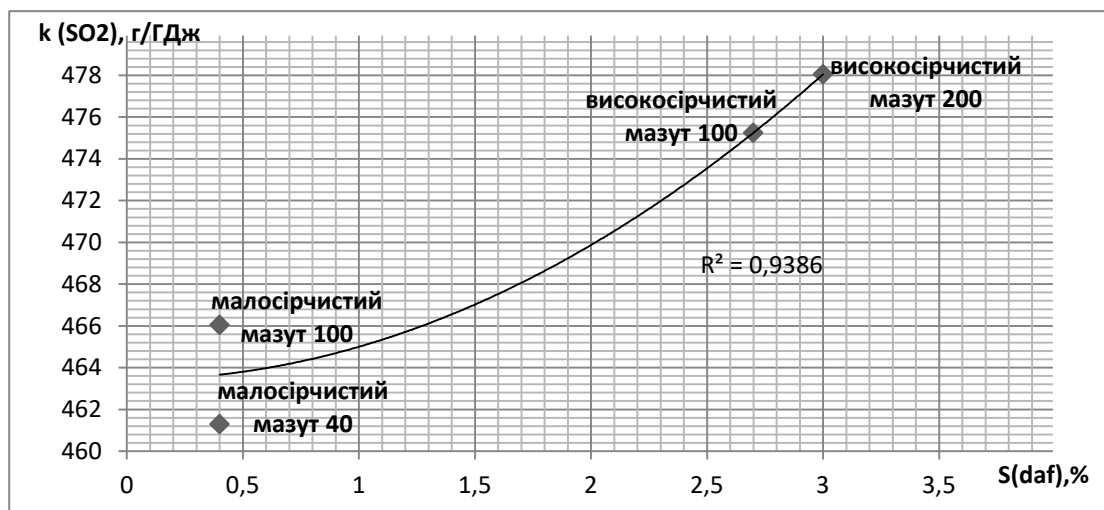


Рис. 1. Залежність показника емісії сірчистого ангідриду під час спалювання мазуту від марки мазуту

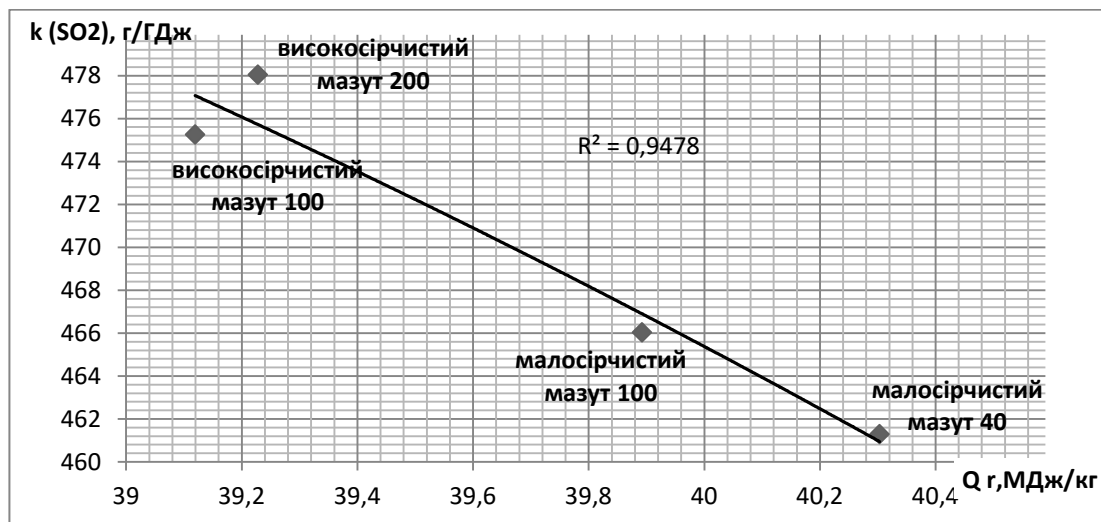


Рис. 2. Залежність показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої теплоти згорання палива

також високосірчистий мазут 100, високосірчистий 200, малосірчистий 100 й, власне, малосірчистий мазут 40.

У результаті проведених розрахунків отримана функціональна поліноміальна залежність показника емісії сірчистого ангідриду:

$$k_{SO_2} = 1,6534 (S^{daf})^2 - 0,0885(S^{daf}) + 463,44, \quad (3)$$

На графіку 2 наведено залежність показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої теплоти згорання палива:

З рисунка 2 також видно, що під час спалювання малосірчистого мазуту марки 40 в атмосфері потрапляє менша кількість оксидів сірки, ніж під час спалювання високосірчистих мазутів.

У результаті проведених розрахунків отримали функціональну поліноміальну залежність показника емісії сірчистого ангідриду:

$$k_{SO_2} = -1,1245 (Q_i^r)^2 + 75,691(Q_i^r) - 763,06, \quad (4)$$

Із залежностей 3 та 4 видно, що показник емісії сірчистого ангідриду залежить від вмісту сірки в елементарному складі палива й нижчої теплоти згорання палива.

Висновки. Одним із найбільш токсичних газоподібних викидів енергоустановок при спалюванні вугілля та мазуту є діоксид сірки SO₂, що становить 98–99% викидів сірчистих сполук ТЕС.

До основних марок мазуту, які використовуються в енергетиці належать високосірчистий й малосірчисті мазути трьох марок – 40, 100 і 200. Вони відрізняються між собою енергетичним складом, а отже й кількістю викидів сірчистого ангідриду в результаті спалювання.

Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базуються на використанні показника емісії. Було розраховано показники емісії під час спалювання різних марок мазуту з врахуванням відсутності сіркоочисної установки й однакових умов зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці. Встановлено, що найбільш доцільна з екологічного боку марка мазуту для спалювання на енергетичних установках – це малосірчистий мазут 40, оскільки його показник емісії сірчистого ангідриду найменший. Отримані поліноміальні залежності показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої робочої теплоти згорання палива й вмісту сірки в паливі на робочу масу.

Список літератури:

1. Критичні зауваження щодо планів уряду України щодо розбудови енергетичної галузі. *Національний екологічний центр України*. Київ, 2011. 14 с.
2. Сердюк О.С. Сучасний стан та перспективи розвитку українських ТЕС. *Економічний вісник Донбасу*. 2016. С. 4–10.
3. Газизуллін І., Лозовий Л., Івахно О., Вільямс В., Петренко І., Зайка Р. Зменшення викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства : зелена книга / літ. редак. Н. Цісик. Київ : ТОВ Видавництво «Оптіма», 2011. 48 с.

4. Вербіцька І.Ю. Перспективи роботи ТЕС в умовах сучасних екологічних вимог. *Вугільний форум*. Дніпро, 12 квітня 2018 р. 17 с.
5. Нечаєва Т.П., Шульженко С.В., Сас Д.П., Парасюк М.В. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля. *Проблеми загальної енергетики. Серія «Екологічні аспекти енергетики та захист довкілля»*. 2008. Вип. 19. С.54–60.
6. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. Київ, 2002 .
7. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ) : справочник / под ред. Т.А. Зикеева. Москва : Энергия, 1968. 111 с.
8. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. Москва : Энергия, 1973. 295 с.
9. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. Київ : Мінекоресурсів України, 2001.

Bednarska I.S., Sheleshei T.V., Ryndiuk D.V., Bednarska Ya.S. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE FUEL OIL BRAND ON THE SULFUR ANGRIDES EMISSIONS IN ENERGY SITES

The article deals with the state of the environmental situation in the country and the main sources of environmental pollution. Despite the introduction of green tariffs and research into alternative energy sources, most environmental problems are caused by energy itself, and in particular by thermal energy. The analysis of influence of heat power companies on the ecological status is covered. Since the issue of waste management is not resolved, financing mechanisms are not provided, the power supply algorithm is not developed and the by-laws are not adapted, the task is to solve and make a recommendation which of the types of fuel used in large energy objects poses a lower threat to the environment. Solid fuel (coal), liquid (fuel oil) and gaseous (natural gas) are burned in the power industry. Fuel oil is considered to be much more environmentally friendly compared to solid fuels, but the clear leader in this regard is natural gas. Therefore, many TPPs and CHP units have been converted to natural gas. In boilers of thermal power plants, fuel oil is usually used as a backup fuel. So we should also pay attention. Emissions into the atmosphere during combustion of fuel oil include: substances in the form of suspended solids, nitric oxide NO, nitrogen dioxide NO₂, sulfur oxides SO₂ and SO₃, carbon monoxide CO, carbon dioxide (CO₂ carbon dioxide) (in terms of vanadium or vanadium pentoxide), methane CH₄. One of the most toxic gaseous emissions of power plants from combustion and coal and fuel oil is SO₂ sulfur dioxide, which makes up 98–99% of the emissions of sulfur compounds of TPPs. The main purpose of the study is to determine the effect of the brand of fuel oil on the emission index of sulfur dioxide. The environmental impact of sulfur dioxide, which is released along with combustion products during the combustion of different grades of fuel oil and enters the atmosphere with flue gases, is analyzed. Recommendations were made regarding the choice of the brand of fuel oil for high-power power plants.

Key words: thermal power engineering, fuel oil brand, combustion, harmful emissions, ecology, emission index, sulfuric anhydride, sulfur oxides.

УДК 620.9

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/37>**Денисюк С.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Рибій М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕДУР В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ З ГНУЧКОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА АКТИВНИМИ СПОЖИВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

У статті сформовано основні напрямки модернізації локальних енергосистем із використанням в їхньому складі активних споживачів (просюмерів) і віртуальних електростанцій. Розглянуто особливості побудови моделей взаємодії між основним обладнанням активного споживача, гнучкою розосередженою генерацією, а також моделі оптимізації взаємодії між активним споживачем і мережею енергопостачання. Детально представлено середовище функціонування активного агента й агента-координатора з формуванням відповідних оптимізаційних процедур, які передбачають мінімізацію витрат обсягів енергії в системах енергопостачання в умовах обмеження ресурсів. Визначені проблеми використання розосередженої генерації в локальних системах можуть бути розв'язані завдяки створенню системи проблемно орієнтованого мультиагентного керування, яка має дозволяти на агентному рівні розподілити обов'язки споживачів (просюмерів) і генераторів на ринку енергії, оптимізувати їхню взаємодію. Проаналізовано досвід використання мультиагентного підходу до розв'язання різного роду проблем електроенергетики. Показано, що мультиагентні технології отримують все більше розповсюдження в електроенергетичних системах, зокрема в рамках двох аспектів: як методичний апарат для моделювання електроенергетичних систем під час розв'язання різних задач і як платформа для побудови систем керування різного призначення. Оскільки гнучка генерація в електроенергетичних системах суттєво впливає на зміну поведінки агентів у сфері локального ринку електроенергії, то одним із перспективних напрямків оптимізаційних процедур є розвиток мультиагентних систем, поява нових агентів на локальних ринках електроенергії. Показано, що створення системи мультиагентного керування з використанням потенціалу активного споживача з метою оптимізації енергоспоживання та підвищення енергоефективності локальних систем електропостачання, її елементів і системи в цілому є актуальним науково-технічним завданням.

Ключові слова: Smart Grid, системи з гнучкою генерацією, просюмери, віртуальні електростанції, мультиагентні системи, функціонування агентної системи, системна оптимізація.

Постановка проблеми. Модернізація енергетичного сектора провідних країн світу передбачає реалізацію положень концепції Smart Grid. Одним із вживаних напрямків інтелектуалізації енергетики є розвиток мультиагентних систем, поява нових агентів, які отримали назву просюмери – активні споживачі (далі – АС), що функціонують на локальних ринках енергії, а також безумовне впровадження гнучкої розосередженої генерації (далі – ГРГ) на основі відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ). Зміна традиційної поведінки споживачів на активну потребує розв'язання низки завдань, зокрема переходу від централізованої енергетики до децентралізованої.

Розробка й вдосконалення методів інтеграції ВДЕ в мережу енергопостачання в рамках проблеми

підвищення ефективності гнучкої генерації, підвищення ефективності функціонування РГ, створення мультиагентних систем керування (далі – МАСК) із використанням потенціалу активного споживача з метою оптимізації енергоспоживання та підвищення енергоефективності локальних систем енергозабезпечення, її елементів і системи в цілому є актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз показує, що нововведення в сучасних енергосистемах мають впроваджуватися по чотирьох ключових аспектах [6; 12]:

1) впровадження технологій, які сприяють інтеграції ВДЕ;

2) нові інноваційні бізнес-моделі, які створюють нові бізнес-умови для нових послуг, що

підвищують гнучкість системи та стимулюють подальшу інтеграцію технологій ВДЕ;

3) нові ринкові структури й зміни в нормативно-правовій базі для заохочення гнучкості й нової доданої вартості послуг з енергопостачання, які своєю чергою стимулюють нові можливості для бізнесу;

4) інноваційні методи експлуатації енергетичної системи, що дозволяють інтегрувати більшу частку ГРГ.

Як наслідок, сфера відповідальності енергопостачальних компаній (далі – DSO-компанії) повинна розширитися таким чином, щоб мати змогу ефективно керувати розосередженими ВДЕ, підключеними до їхньої мережі, інтегруючи їх у мережу й максимізуючи надавані ними переваги. Нова роль DSO-компаній передбачає наступне [6; 8; 11–13]:

– закупівлю послуг мережі від розосереджених енергоресурсів;

– експлуатацію розосереджених енергоресурсів для оптимізації використання наявних мереж за допомогою прямого контролю або через формування цінкових сигналів (погодинний або поточний змінюваний тариф);

– ключові трансформаційні заходи, що мають здійснити DSO, наприклад, розробка інтелектуального обліку, укладання контрактів з агрегаторами, створення майданчиків для оперативного й безпечного ринкового онлайн-продажу енергії в реальному часі;

– керування перевантаженнями в рамках послуг, які будуть закуповуватися операторами мережі для збільшення частки ВДЕ в загальному енергопакеті, створення нових ринків послуг із керування перевантаженнями й відповідних бізнес-моделей для них;

– взаємодія з різними виробниками енергії з ГРГ із можливістю накопичення – наприклад, з гідроаккумуляційними станціями (далі – ГАЕС) або PV-станціями з CSP-накопичувачами (Concentrated Solar Power) надлишку генерації енергії у вигляді тепла.

Для подолання головних чинників проблем щодо впровадження ВДЕ на вищому рівні структура нової енергетики повинна враховувати [10–12]:

– *гнучкість (flexibility)*: можливість енергосистеми впоратися з мінливістю та невизначеністю генерації, зокрема сонячної та вітрової енергії, для чого мають вводитися різні часові шкали, від найкоротшого до довгострокового періоду, уникаючи скорочення відбору енергії від ГРГ;

– *змінюваність (variability)*: природну нестабільність генерації із сонячних і вітрових джерел, що перетворюється на потенційно швидкі зміни виробництва енергії, від чого виникає невідповідність попиту й пропозиції енергії;

– *невизначеність (uncertainty)*: нездатність надійно й правдиво прогнозувати виробництво енергії ГРГ на різних часових проміжках.

Постановка завдання. Метою статті є розробка моделі взаємодії між основним обладнанням активного споживача, гнучкою розосередженою генерацією, а також моделі оптимізації взаємодії між активним споживачем і мережею енергопостачання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нині в рамках концепції Smart Grid стає популярною модель VPP-агрегатора (агрегатора віртуальних електростанцій – virtual power plants) [4; 10–13]. Така модель передбачає створення незалежного оператора VPP. Центральна ідея VPP – розподілена хмарна система-агрегатор, яка об'єднує і перерозподіляє енергію від різних джерел і виробників. Така система «інтелектуального керування» – частина «інтелектуальних мереж» – забезпечує отримання додаткових потужностей без інвестицій в їхнє будівництво. VPP фактично є інформаційною системою, в якій у режимі реального (або майже реального) часу циркулює інформація про доступну генерацію та / або попит (поточні або прогнозовані) на підключеній до енергопостачання території, можливості розвантаження чи гнучкої потужності споживачів, бажаний графік навантаження системи. Така енергетична система забезпечує гнучкість використання генерації або доступної потужності енергоспоживання, автоматично визначаючи ефективнішу в цей момент множину ГРГ з урахуванням багатьох факторів, від ситуації на ринку до прогнозу погоди.

ГРГ в енергетичних системах суттєво впливає на зміну поведінки агентів на локальному енергетичному ринку. Вона також впливає на формування тарифної політики на ринку енергії та ведення режимів мережі.

Постає задача формування такої «цифрової спільноти» ГРГ, яка подає енергію в мережу, є спільним маркетингом енергії та надання послуг енергопостачальними компаніями. З іншого боку VPP відіграє роль стабілізатора енергосистеми.

Наведені проблеми можуть бути розв'язані завдяки створенню системи проблемно орієнтованого мультиагентного керування в локальних системах енергопостачання, яка має дозволяти

на агентному рівні розподілити обов'язки споживачів на ринку енергії, оптимізувати їхню взаємодію, наприклад, двосторонніми потоками електроенергії для підвищення якості енергопостачання [3–5; 7].

Для побудови VPP-агрегатора доцільно застосувати мультиагентні технології, які на сьогодні отримують все більше розповсюдження в електроенергетичних системах як методичний апарат для моделювання електроенергетичних систем під час розв'язання різних задач, так і як платформа для побудови систем керування різного призначення [1; 4; 9; 10]. Водночас агрегатор розглядається як суб'єкт, здатний керувати режимом споживання обладнання великої кількості роздрібних споживачів. Завдання агрегаторів – визначити множину роздрібних споживачів, готових знижувати своє споживання, та залучити їх для зниження пікового споживання та зниження витрат енергосистеми на пікову генерацію. Розвиток концепції Smart Grid приводить до суттєвих змін у підходах до організації систем керування, у тому числі в алгоритмах взаємодії учасників ринку електроенергії. Серед нових учасників є різні типи просюмерів – активних агентів, які одночасно споживають і виробляють енергію [3].

Побудова VPP-агрегаторів пов'язана з аналізом мультиагентних систем як систем, де кожен учасник організує взаємодію через визначених агентів зі своїм набором цілей і пріоритетів [4; 9; 13]. Такі агенти самостійно реагують на зміну середовища й взаємодіють з іншими агентами для координації дій і спільного прийняття рішень. Для максимізації частки ВДЕ (в єдиній енергосистемі з традиційними джерелами) будуть використовуватися всі можливі моделі, включаючи РГ і системи зберігання (акумуляування) енергії, Microgrid, зарядку електромобілів і «demand response» (DR) – реагування на попит у режимі реального часу завдяки системам зі штучним інтелектом і миттєвим блокчейн-транзакціям.

Багатоагентна система (multi-agent system) – МАСК – це сукупність взаємозв'язків, які утворені декількома співзалежними інтелектуальними агентами між собою. Багатоагентна система може бути використана для розв'язання проблем, які складно або неможливо вирішити за допомогою одного агента або традиційної (монолітної) системи. Прикладами таких завдань є онлайн-торгівля, ліквідація надзвичайних ситуацій, моделювання соціальних структур тощо [10–13].

Зазвичай у багатоагентних системах досліджуються програмні агенти, поведінка яких лежить в основі так званого «сукупного інтелекту». Агенти

можуть обмінюватися отриманими знаннями, використовуючи деяку спеціальну мову (відповідні протоколи) в системі. Прикладами таких мов є Knowledge Query Manipulation Language [en] (KQML) і FIPA's Agent Communication Language [en] (ACL) [4; 13].

Мультиагентне керування має формувати оптимальні розв'язки задач без зовнішнього втручання. Під оптимальним розв'язанням розуміється мінімізація витрат обсягів енергії в умовах обмеження ресурсів [3–5; 7]. МАСК електроенергетичних систем, де кожен агент є рівноправним учасником процесу, надають можливість реалізувати функції автоматичного ведення режимів виявлення ушкоджень і їхньої локалізації, виділення та швидкого відновлення електропостачання, збору й обробки інформації. Це дозволяє зробити мережі більш самокерованими й відновлюваними. Економічність їхнього керування досягається шляхом можливості оперативної компенсації несприятливого впливу на параметри режиму. Також проблемою є непередбачуваність роботи установок РГ, де режими визначаються метеорологічними умовами, а також складність керування процесами взаємодії АС з елементами енергетичної системи.

Важливим є питання участі АС у створенні системи послуг для енергетичної системи, системної інтеграції ВДЕ в мережу як самих АС, так і джерел РГ, або їх поєднання в складі МАСК із подальшим формуванням агрегатів, що інтегруватимуть окремі функції елементів. Тут головна перевага МАСК полягає в можливості використання гнучкості багатоагентних систем.

У виділених системах споживач має право брати участь у різноманітних тарифних програмах у рамках механізмів введення енергії в мережу й можливості отримання відповідних «премій». Водночас агенти-просюмери представляють функціонування агентів за типом peer-to-peer (p2p) [3–5; 7].

Посилаючись на абстрактну архітектуру для агентів, набір агентів позначається як $E_A = [PA_1, PA_2, PA_N]$, де N – кількість споживачів, які беруть участь у розподілі енергії p2p. Кожен агент сприймає своє оточення для збору інформації, необхідної для прийняття відповідних рішень.

Більш детально розглянемо середовище функціонування активного агента й агента-координатора з формуванням відповідних оптимізаційних процедур.

Середовище активного агента

На рівні окремого активного агента потребує розв'язання проблема взаємодії системи

керування з енергетичною системою різних типів АС на локальному ринку енергії [3–5; 7]. Для цього необхідно сформувати й розв’язати завдання оптимізації інформаційних і силових енергетичних процесів, активної взаємодії споживачів електроенергії з енергетичною системою в цілому зі збереженням сумарної вигоди АС від оптимізації власного графіка споживання електроенергії, а також можливого доходу від продажу енергії з підтримкою нормального режиму роботи енергосистеми.

Початкове середовище активного агента формується у вигляді співвідношення:

$$E_{PA} = [p^{internal}, A, D, P^{renewable}], \quad (1)$$

де $p^{internal}$ представляє сукупність внутрішніх цін у механізмі розподілу енергії р2р; A – набір параметрів обладнання (тобто різних типів енергетичного обладнання, систем зберігання енергії та розосереджених генераторів); D – попит споживача (наприклад, використання гарячої води протягом дня); $P^{renewable}$ – обсяги відпуску енергії неконтрольованої відновлюваної генерації, що належить споживачеві.

На основі інформації, отриманої з навколишнього середовища, агент-розпорядник планує роботу свого енергетичного обладнання таким чином, щоб мінімізувати витрати на електроенергію та максимізувати свої доходи в рамках розподілу енергії р2р. Цей процес моделюється моделлю прийняття рішень щодо оптимальної поведінки активного агента (просюмера), яка з врахуванням співвідношення (1) може бути представлена наступною оптимізаційною задачею:

$$\begin{aligned} \min \frac{\text{cost}}{T}(p^{internal}, p^{renewable}, x) \\ f(x, A, D) = 0 \\ h(x, A, D) \leq 0 \end{aligned}, \quad (2)$$

де T – сукупність часових кроків, які розглядаються протягом усього горизонту планування; X – змінні рішення, які є робочим станом керованого енергетичного обладнання (наприклад, стан увімкнення / вимкнення машин, нагрівальна здатність електричного водонагрівача тощо); cost – функція внутрішньої ціни на електроенергію, ціни на відновлювану продукцію виробництва й робочий стан енергетичного обладнання, значенням яких є загальна вартість енергії протягом усього горизонту планування; f та h – обмеження типу рівності й нерівності, які враховують фізичні межі функціонування для енергетичного облад-

нання, а також рівні та якість забезпечення енергією споживачів.

Зазначимо, що власне сукупність дій професійного активного агента визначається зі співвідношення:

$$AC_{PA} = [x, e^{bid}, [p^{bid}]], \quad (3)$$

де e^{bid} та p^{bid} представляють пропозицію енергії та ціну відповідно.

Середовище агента-координатора

Процес керування в МАСК під час виділення функцій агента-координатора полягає в тому, щоб мінімізувати енергію, придбану з мережі, для забезпечення її споживання, а також скористатися перевагою генерації ВДЕ й попитом на генерацію ГРГ, щоб максимально використовувати гнучкість, яку забезпечує система акумуляції енергії. Водночас виникає задача оптимізації вищого рівня, яка має розв’язуватися одночасно з іншими підпорядкованими задачами, в тому числі й сформованими на основі співвідношень (1) – (3).

Відповідальність за технологічну реалізацію розв’язання оптимізаційної задачі й покладається на агента-координатора. Відповідальність агента-координатора може бути двоякою:

- отримувати пропозиції від агентів-споживачів і повертати їм внутрішні ціни, керуючи місцевою торгівлею енергією в регіоні розподілу енергії;
- торгувати роздрібною торгівлею від імені всього регіону розподілу енергії, щоб придбати або продати електроенергію з метою збалансувати дефіцит енергії або надлишок у регіоні.

Окремі агенти-координатори мають дбати про обмеження фізичних мереж у своїх регіонах розподілу енергії, однак це вже виходить за межі функціонування агента-координатора як локального оператора ринку, оскільки вимагає від нього здійснення окремих функцій системного оператора. На основі інформації, сприйнятої із сукупності дій виділеної множини професійних активних агентів, агент-координатор планує своє функціональне середовище таким чином, щоб мінімізувати втрати й максимізувати ефективність роботи системи в цілому.

Початкове середовище агента-координатора формується у вигляді співвідношення:

$$E_{CA} = \{p^{external}, e^{bid}, p^{bid}\}, \quad (4)$$

де $e^{exchange}$ – енергія, якою торгують на ринку роздрібною торгівлі; e^{bid} та p^{bid} – пропозиція енергії та ціни відповідно.

Наведемо опис функціонування агента-координатора. Модель ціноутворення *Pricing* (...) може бути представлена у вигляді:

$$p^{internal} = Pricing(p^{external}, e^{bid}, p^{bid}), \quad (5)$$

де $p^{internal}$ та $p^{external}$ – відповідно сукупність внутрішніх і зовнішніх цін у механізмі розподілу енергії р2р.

Як наслідок, сукупність дій агента-координатора визначається наступним чином:

$$AC_{CA} = \{p^{internal}, e^{exchange}\}, \quad (6)$$

де $e^{exchange}$ представляє зміни на енергію.

Співвідношення (4) – (6) є складовими частинами оптимізаційної задачі типу (2), з визначенням, наприклад, оптимальних значень функції $Pricing(\dots)$.

Аналіз структур й особливостей функціонування просюмерів, VPP-агрегаторів показує, що взаємодію між виділеними елементами, зокрема згідно зі співвідношеннями (1) – (6), доцільно представляти операціями редукації, декомпозиції, масштабування та мультиплікації. Власне алгоритми взаємодії, насамперед алгоритми керування, мають враховувати енергетичні процеси, спільно розглядати їх в енергетичних системах, де є підсистеми як постійного, так і змінного струму, а власне сигнали змінного струму характеризуються несиметрією та / чи несинусоїдальністю. Під час розгляду теплових процесів для однотипності здійснення моделювання доцільно застосовувати методи «електротеплової аналогії».

Для досягнення оптимальних чи «квазіоптимальних» режимів складовими частинами множини критеріїв векторної оптимізації при потребі використовуються поряд з реактивною Q_1 й активною P_1 потужністю по 1-й гармоніці напруги й струму, обмінну потужність $Q_{об}$ та потужність Фризе $Q_{ф}$ [1; 2]. Важливим елементом конкретної оптимізаційної процедури є необхідність підведення адекватного балансу складових енергії з використанням поняття енергетично незмінних станів [2].

Власне, як оцінка величин потужностей $Q_{об}$ та $Q_{ф}$, так і формування балансу складових енергії потребує розкладу миттєвих значень напруги й струму на активну (індекс «А») й реактивну (індекс «Р») складові частини: $u(t) = u_A(t) + u_P(t)$; $i(t) = i_A(t) + i_P(t)$. Доцільним також може бути застосування потужності $Q_{КВ}$: $Q_{КВ}^2 = Q_{ф}^2 - Q_1^2$.

Запропонований підхід до формування оптимізаційних процедур дозволяє під час формування законів функціонування МАСК і оптимізації режимів роботи системи використати переваги, які надають застосування потужностей $Q_{об}$ та $Q_{ф}$. Так, обмінна потужність $Q_{об}$ дозволяє оцінити неоптимальність процесів із боку обмінних процесів для різних спектрів сигналів, здійснити уточнений вибір енергетичного обладнання, оцінити взаємний вплив елементів системи. Потужність Фризе $Q_{ф}$ своєю чергою є характеристикою додаткових втрат енергії, визначенням рівня неоптимальності процесів від впливу різних факторів, що спотворюють якість енергопостачання.

Висновки. На основі аналізу перспектив розвитку сучасних енергосистем виділено основні напрямки модернізації локальних енергосистем із використанням у їхньому складі активних споживачів (просюмерів) і віртуальних електростанцій.

Показано, що ефективне функціонування локальних систем, у складі яких є ГРГ на основі різних типів ВДЕ й різноманітні типи просюмерів, неможливе без побудови систем на основі мульти-агентного керування з використанням агрегаторів генераторів енергії та агрегаторів навантажень у споживачів (агентів-координаторів).

Детально представлено середовище функціонування активних агентів й агента-координатора з формуванням відповідних оптимізаційних процедур, зокрема мінімізацією витрат обсягів енергії в умовах обмеження ресурсів.

Список літератури:

1. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем'єв М.В. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 3. С. 7–22.
2. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. Київ : Текст, 2010. 264 с.
3. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П. та ін. Інтелектуальні електричні мережі : елементи та режими / за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
4. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж. *Енергозбереження, енергетика, енергоаудит*. Спец. випуск, Том 2. 2014. № 9 (128). С. 82–94.
5. Prieta F., Vale Z., Antunes L., Pionto T., Campbell A.T., Julian V., Neves A.J.R., Moreno M.N. Trends in Cyber-Physical Multi-Agent System. *The PAAMS Collection – 15th International Conference*. PAAMS, 2017. Smart Grid. P. 65–72.

6. Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables. IRENA, Abu Dhabi, 2019. 164 p.
7. Kok J.K., Warmer C.J., Kamphuis I.G. PowerMatcher: Multiagent Control in the Electricity Infrastructure. *AAMAS '05 : Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, July 2005. P. 75–82.
8. Schill, W.-P., Zerrahn A., F. Kunz F. Prosumage of Solar Energy: Pros, Cons, and the System Perspective. *Economics of Energy & Environmental Policy*. 2017. № 6 (1). P. 7–31.
9. Yavuz L., Önen A., Muyeen S.M., Kamwa I. Transformation of Microgrid to Virtual Power Plant – A Comprehensive Review. *IET Generation, Transmission and Distribution*. Changes were made to this version by the publisher prior to publication. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5649.
10. Виртуальные электростанции и реальные киловатты. *Атомный эксперт* : веб-сайт. URL: http://atomicexpert.com/virtual_power_station.
11. Нові виклики для операторів мереж. *Енергетична транзиція* : вебсайт. URL: https://avenston.com/articles/energy_transit.
12. International Renewable Energy Agency. *IRENA* : web-site. URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition>
13. Gordon Feller. The Virtual Power Plant: A New Era of Energy Flexibility. *T&D World* : web-site. URL: <https://www.tdworld.com/grid-innovations/generation-and-renewables/article/20973186/the-virtual-power-plant-a-new-era-of-energy-flexibility>.

Denysiuk S.P., Rybii M.V. FORMATION OF COMPONENT OPTIMIZATION PROCEDURES IN ENERGY SYSTEMS WITH FLEXIBLE GENERATION AND ACTIVE ENERGY CONSUMERS

The main directions of modernization of local power systems with the use of active consumers (prosumers) and virtual power plants are formed in the article. The features of construction of models of interaction between the basic equipment of the active consumer, flexible dispersed generation, as well as models of optimization of interaction between the active consumer and the energy supply network are considered. The working environment is presented in detail active agent and coordinating agent with the formation of appropriate optimization procedures that minimize energy consumption in energy systems with limited resources. The identified problems of the use of distributed generation in local systems can be solved by creating a system of problem-oriented multiagent control, which should allow at the agent level to distribute the responsibilities of consumers (prosumers) and generators in the energy market, to optimize their interaction. The experience of using a multiagent approach to solving various kinds of power problems is analyzed. It has been shown that multiagent technologies are becoming more widespread in power systems, in particular, in two aspects: as a methodological apparatus for modeling power systems in solving various problems, and as a platform for the construction of control systems for different purposes. As flexible generation in power systems significantly influences the change in the behavior of agents in the field of the local electricity market, one of the promising directions of optimization procedures is the development of multiagent systems, the emergence of new agents in the local electricity markets. It is shown that the creation of a multiagent control system using the potential of an active consumer in order to optimize energy consumption and improve the energy efficiency of local power supply systems, its elements and the system as a whole is an urgent scientific and technical task.

Key words: Smart Grid, flexible generation systems, prosumers, virtual power plants, multiagent systems, agent system function, system optimization.

УДК 621.311.153
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/38>

Калінчик В.П.

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

Буравльова М.Т.

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

Калінчик В.В.

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

Скосирев В.Г.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ГЕНЕРАЦІЇ І ВАРТОСТІ ОТРИМАНОЇ ЕНЕРГІЇ

У статті досліджуються методи прогнозування в енергетиці. Показано, що прогнозування в енергетиці є одним із завдань енергетичного моніторингу ефективності енергоспоживання. Також це основний складник для формулювання стратегій і енергетичних законів. Проведено аналіз процесів генерації енергії в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України різними джерелами енергії, як традиційними, так і відновлювальними. Показано, що задача прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового планування, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Проведено огляд та аналіз існуючих методів прогнозування, які застосовуються в енергетиці. Приведена класифікація методів прогнозування. Показано, що основними вимогами, які висувають до прогнозних моделей, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів. Показано, що з точки зору простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги до методу прогнозування на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування.

Обґрунтовано застосування адаптивних моделей Хольта-Вінтерса для прогнозування енергетичних і фінансових показників. Метод заснований на тому, що досліджуваний часовий ряд може бути представлений у вигляді трьох компонентів: базової компоненти, лінії тренду і сезонного ефекту. Приведені результати прогнозування генерації електроенергії в ОЕС України та результати прогнозування генерації електроенергії відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) України за моделлю Хольта-Вінтерса. Зроблена оцінка та порівняльний аналіз тенденцій розвитку енергетики України.

Ключові слова: об'єднана енергосистема, генерація, електроспоживання, відновлювані джерела енергії, генерація, прогнозування, метод Хольта-Вінтерса.

Постановка проблеми. Ефективне функціонування економіки можливе за умови прогнозування і планування її розвитку й ефективної системи управління народним господарством. Прогнозування в енергетиці є одним із завдань енергетичного моніторингу ефективності енергоспоживання. Також це основний складник для формулювання стратегій і енергетичних законів.

Завдання прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового плану-

вання, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Прогнозування ціни відіграє ключову роль в електроенергетичній галузі, ринкові ціни дуже впливають на рішення про інвестування нових об'єктів генерації в довгостроковій перспективі. Всі гравці ринку повинні знати майбутні ціни на електроенергію, оскільки їх прибутковість залежить від генеруючих компаній, великих промислових споживачів або інвесторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно [1] функціонування економіки буде ефек-

тивним за умови прогнозування і планування її розвитку. Прогнозування в енергетиці є одним із основних завдань. Значна частина (понад 50%) [2] паливних ресурсів використовується саме для виробництва електричної енергії. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває завдання прогнозування розвитку енергетичного комплексу, причому таке прогнозування цікаве не тільки з позиції регіональної економіки, але і з позицій найбільших енергетичних підприємств. Прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового планування, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Залежно від часу упередження – горизонту часу, на який необхідно визначити значення часового ряду, завдання прогнозування поділяються на такі категорії:

- 1) довгострокове прогнозування;
- 2) середньострокове прогнозування;
- 3) короткострокове прогнозування.

Натепер налічується більше 100 класів моделей прогнозування [3]. При чому частина моделей і відповідних методів належать до окремих підходів прогнозування. Всі методи прогнозування поділяються на дві групи: інтуїтивні та формалізовані [4].

Інтуїтивне прогнозування застосовується в тих завданнях, коли об'єкт прогнозування або занадто простий, або дуже складний, тому не можливо врахувати вплив зовнішніх факторів. Відмінною рисою інтуїтивних методів прогнозування є те, що вони відображають тільки індивідуальні судження фахівців щодо можливих варіантів розвитку процесу і тому не припускають можливості розробки моделей прогнозування. Зазвичай методи цієї групи використовуються для аналізу процесів, розвиток яких не піддається математичній формалізації, для яких важко розробити відповідну прогнозу модель. До інтуїтивних методів належать методи історичних аналогій, експертних оцінок, передбачення за зразком [4].

Формалізовані методи можуть бути розділені на статистичні та структурні моделі прогнозування. Суть статистичних моделей полягає в тому, що аналітично задаються як зовнішні фактори, так і функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду. Статистичні моделі представлені такими групами:

1) *регресійні моделі*. В роботах [5-7] регресійні моделі застосовані для прогнозування електричного навантаження енергосистеми, виробничих об'єктів і будівель;

2) *авторегресійні моделі*. Цей метод використовується для короткострокового прогнозування електроспоживання в оперативному циклі з інтервалом попередження 5÷10 хвилин в роботах [8-9];

3) *моделі експоненціального згладжування*. Ці моделі були розроблені незалежно Хольтом і Брауном всередині ХХ століття [10-12]. Метод експоненціального згладжування використовується в роботах [13; 14] для прогнозування річного електроспоживання промислових підприємств, енергосистем. Завдання прогнозування річного обсягу генерації енергії ВДЕ в роботах [15; 16] також вирішене за допомогою моделі експоненціального згладжування.

Моделі, в яких функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду, як і зовнішніми факторами, задана структурно, належать до групи структурних моделей. Вони представлені такими групами як нейромережеві моделі, моделі на базі ланцюгів Маркова, моделі на базі класифікаційно-регресійних дерев. У роботі [17] модель використовується для оцінки втрат потужності та електроенергії в електричних мережах енергосистеми на основі нейротехнологій. Автор роботи [18] застосовує нейромережеві алгоритми для короткострокового прогнозування навантаження центральної електроенергетичної системи країни. Автори роботи [19] розглядається як короткострокове, так і довгострокове прогнозування навантаження по енергосистемі загалом.

Основними вимогами, які висувають до прогнозних моделей, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час вирішення і обсяг пам'яті системи; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації; забезпечення стійкості управління.

Метою роботи є підвищення ефективності енергопостачання регіонів України за рахунок удосконалення методів прогнозування тенденцій розвитку енергетичного комплексу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори проводять аналіз та порівняння розглянутих методів прогнозування. Дані порівняння зведені в таблиці.

Переваги тих чи інших методів прогнозування визначаються в основному часовими характеристиками програм і точністю прогнозів. При цьому можна показати, що експоненціальне згладжування, метод авторегресії для одновимірних процесів зводяться один до іншого і можна знайти відповідні співвідношення між дисперсією шуму динаміки в моделі авторегресії і параметром згладжування в методі експоненціального згладжування. Тому точність названих методів навряд чи буде істотно відрізнятися. Тим часом з точки зору

простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги, які висуваються до методу прогнозування, на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування, зокрема модель Хольта-Вінтерса.

Часові ряди енергетичних, економічних показників містять періодичні сезонні коливання. Такі ряди можуть бути описані моделями двох типів – з мультиплікативними (1) та адитивними коефіцієнтами сезонності (2):

$$y_t = a_t \cdot f_t + e_t, \quad (1)$$

$$y_t = a_t \cdot g_t + e_t, \quad (2)$$

де a_t – характеристика тенденції розвитку,
 $g_t, g_{t-1}, \dots, g_{t-e+1}$ – адитивні коефіцієнти сезонності,
 $f_t, f_{t-1}, \dots, f_{t-e+1}$ – мультиплікативні коефіцієнти сезонності,
 e – кількість фаз у повному сезонному циклі,
 e_t – випадкова компонента з нульовим математичним очікуванням [20].

Модель Хольта-Вінтерса [21] або потрійне експоненціальне згладжування застосовується для процесів, які мають тренд і сезонний складник. Метод Хольта-Вінтерса заснований на тому, що досліджуваний часовий ряд може бути представлений у вигляді трьох компонент: базової компоненти, лінії тренду і сезонного ефекту. Алгоритм передбачає, що кожна з цих компонент змінюється в часі. До змінних значень кожної з компонент

застосовується експоненціальне згладжування.

Як і в методі експоненціального згладжування, прогноз на наступний період обчислюється застосуванням до поточного значення прогнозу коефіцієнтів α, β, γ . Такі коефіцієнти визначаються параметрами моделі і можуть приймати значення в межах від 0 до 1. При більш високих значеннях коефіцієнтів минулі значення компоненти враховуються більше, ніж поточні, а при більш низьких найбільший вплив на прогноз справляють поточні значення компонент [22]. Прогноз є сумою всіх трьох компонент:

$$\hat{y}_{t+1} = a_t + b_t + c_{t+1-m}, \quad (3)$$

де a_t – базова компонента,
 b_t – лінія тренду,
 c_t – сезонний ефект,
 m – період сезону (цикл).

Нова оцінка базового компоненту є її поточне значення скориговані з урахуванням значення сезонного коефіцієнту. Оскільки нове значення базової компоненти залежить від змін лінії тренду, прогноз тренду додається до коефіцієнта базової лінії:

$$a_t = \alpha(y_t - c_{t-m}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}), \quad (4)$$

Нова оцінка тренду є різницею між новим і старим значеннями базової компоненти:

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}, \quad (5)$$

Таблиця 1

Порівняння методів прогнозування

Моделі	Врахування тренду	Прозорість	Здатність моделювати нелінійні процеси	Адаптивність	Гнучкість
Лінійна регресійна	+ -	+	-	-	+
Множинна регресійна	+ -	+	-	-	+
Нелінійна регресійна	+ -	+	-	-	+
Групового врахування аргументів	+ +	-	+	+	+
Авторегресійна ковзного середнього	+ -	+	-	-	+
Експоненціального згладжування	-	+	+	+	-
Хольта	+ -	+	+	+	-
Хольта-Вінтерса	+ +	+	+	+	-

Нова оцінка сезонного компонента є різницею між його поточним значенням і базовою компонентою:

$$c_t = \gamma(y_t - a_t) + (1 - \gamma)b_{t-m}, \quad (6)$$

Формули (4) – (6) використовуються тільки для отримання поточних значень компонент на один часовий інтервал, оскільки ці збережені значення перераховуються кожної ітерації [22].

В першій точці ряду значення базової компоненти і тренду не розраховуються, оскільки для їх розрахунку не існує попередніх експериментальних значень. В другій точці ряду згладжені значення базової компоненти приймається рівним її значенням, а мікротренд за цей період вважається лінійним і розраховується як різниця між поточним і минулим значеннями відгуку [22].

Починаючи з третьої точки, використовуються формули (4) – (6): розраховується згладжені значення базової компоненти по згладженому значенню і мікротренду для минулої точки ряду і відгуку для поточної точки, а потім розраховується новий мікротренд за попереднім значенням і різницею між минулим і тільки що оціненим згладженим значенням. Потім описана процедура повторюється для всіх подальших точок часового ряду.

Прогноз по методу Хольта-Вінтерса на p періодів вперед визначається як [22]:

$$\hat{y}_{t+p} = (a_{t+p} \cdot b_t) \cdot c_{t+p-m}, \quad (7)$$

де \hat{y}_{t+p} – прогноз по методу Хольта-Вінтерса на p періодів вперед,

a_t – базова компонента (експоненціально згладжена величина за останній період),

p – порядковий номер періоду, на який робиться прогноз,

b_t – тренд за останній період,

c_{t+p-m} – коефіцієнт сезонності за цей же період в останньому сезоні.

Прогнозування набору показників ОЕС України. Прогноз генерації електроенергії в ОЕС України

Розрахунки проводилися на підставі даних по електрогенерації, зафіксованих за період січень 2010-грудень 2019 року для Об'єднаної Енергосистеми України.

Використовуючи модель Хольта-Вінтерса розраховані показники експоненціально згладженого ряду, значення тренда, коефіцієнти сезонності, прогноз на 2011-2022 роки, а також помилку моделі, відхилення помилки моделі від прогнозної моделі і точність прогнозу. Помилка прогнозної моделі не перевищує 6%, що підтверджує її адекватність і вказує на доцільність використання методу і розрахунку прогнозних показників.

Прогноз генерації електроенергії в ОЕС України до 2022 року наведений на рисунку 1.

Прогноз генерації відновлювальними (альтернативними) джерелами енергії

За аналогічною схемою складена модель і розраховані прогнозні значення для перерахованих вище показників відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Розрахунки проводилися на підставі даних по енергогенерації відновлювальними джерелами енергії (вітер, сонце та інші) за 2013-2022 роки. Потенціал відновлюваних джерел

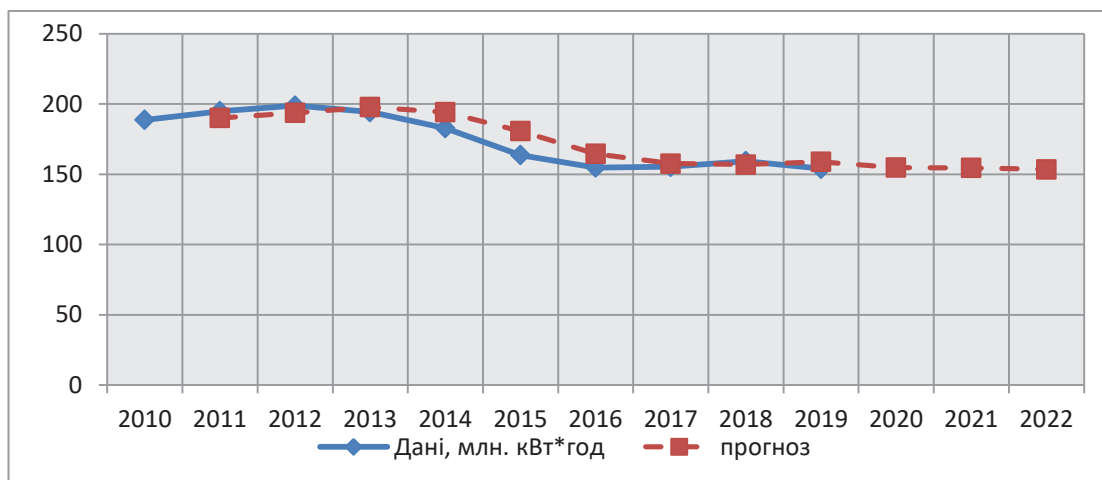


Рис. 1. Результати прогнозування генерації електроенергії в ОЕС України за моделлю Хольта-Вінтерса



Рис. 2. Результати прогнозування генерації електроенергії ВДЕ в Україні за моделлю Хольта-Вінтерса

в Україні дуже великий. Розвиток технологій відновлюваної енергетики та як результат зменшення ціни на установки і вартість отриманої енергії призведе до стійкого зростання використання ВДЕ. Прогноз генерації електроенергії ВДЕ в Україні до 2022 року наведений на рисунку 2.

З огляду на збільшення вартості первинних джерел енергії, фінансову політику країни вартість енергії буде зростати, що підтверджують результати прогнозування вартості енергії для споживачів. Результати дослідження підтверджують світові тенденції розвитку енергетичної галузі: збільшення споживання вторинної енергії, зростання генерації з відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії, скорочення використання викопних видів енергії, а також зростання вартості енергії.

Такі потужні і довгострокові тенденції як індустріалізація, урбанізація і автомобілізація продовжують формувати сучасну економіку енергетичної галузі. Ці тенденції пов'язані з:

- 1) збільшенням обсягу споживаної енергії;
- 2) підвищенням ефективності видобутку і споживання енергії;
- 3) зростаючою диверсифікацією джерел енергії;

4) зростанням споживчого попиту на чисту і зручну енергію.

Світові тенденції вказують, що паливний баланс буде змінюватися повільно через тривалість життєвого циклу активів, але частка природного газу і невикопного палива буде зростати за рахунок вугілля і нафти. Найшвидше зростання буде спостерігатися у відновлюваних джерел енергії [23]. Загалом збільшення споживання буде обмежено зростанням цін на енергоресурси (як і останніми роками), а також триваючим поступовим зниженням субсидій.

Висновки. Основним двигуном розвитку відновлюваної енергетики є реалізація політичних заходів зі скорочення викидів парникових газів, що ґрунтуються на цінах на вуглець і низьковуглецевих технологій. Конкретні аспекти політики визначатимуть енергобаланси.

Результати дослідження показують, що прогнози генерації енергії з вугілля і природного газу мають загальну тенденцію до зменшення, що пов'язано з ростом вартості первинної енергії, впровадженням енергоефективних та енергозберігаючих технологій, а також реалізацією політик, спрямованих на пом'якшення впливу змін клімату та адаптації до цього впливу.

Список літератури:

1. Каменев В.В. Научно-методические подходы к совершенствованию механизмов экономического развития регионов / В.В. Каменев // Культура народов Причерноморья. 2006. № 86. С. 27–30.
2. Енергетичний баланс України за 2011 рік [Електронний ресурс] // Державна служба статистики України. Режим доступу до статистичних даних: www.ukrstat.gov.ua.
3. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка : учебное пособие / Э.Е. Тихонов. Невинномысск : Северо-Кавказский ГТУ, 2006. 221 с. ISBN 5895710778.

4. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия : дис. канд. тех. наук: 05.13.18 / Чучуева И.А. Москва, 2012. 153 с.
5. Винославский В.Н. Прогнозирование электропотребления производственных объектов / В.Н. Винославский, А.В. Праховник, А.Ф. Бондаренко // Энергетика и электрификация. 1974. № 5. С. 30–31.
6. Лапинский Г.С. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий / Г.С. Лапинский, З.Р. Майрансаев // Известия ЮФУ, 2013. № 5. С. 241–246.
7. Freire R.Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings / Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // Energy and Buildings. 2008. № 40. P. 810–820.
8. Валь П.В. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода / П.В. Валь, А.С. Торопов // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск : ТПУ, 2010. С. 23–24.
9. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев. М. : Недра, 1985. 232 с.
10. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
11. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing / R.G. Brown, R.F. Meyer // Operation research. 1961. Vol. 9. № 5. P. 673–685.
12. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology. 1957. № 2.
13. Надтока И.И. Развитие теории и методов моделирования и прогнозирования электропотребления на основе данных средств автоматизации учета и телеизмерений : дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Надтока И.И. Новочеркасск, 1998. 346 с.
14. Bindiu R. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing / R. Bindiu, Dr. Eng. M. Chindri, G.V. Pop // Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures. Vol. 6. 2009. P. 89–93.
15. Прогнозирование показателей энергопотребления, генерации и стоимости полученной энергии / Калинин В.П., Кокорина М.Т. НТУУ «КПИ» Н.-й ин-т автоматики и энергетики «Энергия». Киев, 2013. 14 с.
16. Fatema Tuz Jhohura An Assessment of Renewable Energy in Bangladesh through ARIMA, Holt's, ARCHGARCH Models / Fatema Tuz Jhohura and Md. Israt Rayhan // Dhaka University Journal of Science, 2012. vol. 60. № 2. P. 159–162.
17. Заиграева Ю.Б. Нейросетевые модели оценки и планирования потерь электроэнергии в электрических системах : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. тех. наук: спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / Заиграева Юлия Борисовна; Новосибирский гос. тех. ун-т. Новосибирск, 2008. 20 с.
18. Сухбаатарын Мунхжаргал. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования нагрузки центральной электроэнергетической системы Монголии : дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Сухбаатарын Мунхжаргал. Новосибирск, 2004. 177 с.
19. Шумилова Г.П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева. Сыктывкар : КНЦ УрО РАН, 2008. 78 с.
20. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования в экономике / Дуброва Т.А. Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики. М., 2001. 50 с.
21. Уинтерс П.Р. Прогноз продаж с помощью экспоненциально взвешенных скользящих средних / Уинтерс П.Р. Пер. статьи с англ. из журнала Management Science. 1960. Vol. 6, № 3. С. 324–342.
22. Исхаков С.Ю. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей / Исхаков С.Ю., Шелупанов А.А., Тимченко С.В. Доклады ТУСУРа, № 1(25), Ч. 2, июнь 2012. С. 101–104.
23. Международное энергетическое агентство. Прогноз развития мировой энергетики. Париж, 2010.

Kalinchyk V.P., Buravlova M.T., Kalinchyk V.V., Skosyrev V.H. FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION, ENERGY GENERATION AND VALUE OF ENERGY RECEIVED

The article explores methods of forecasting in energy industry. It is shown that energy forecasting is one of the tasks of energy monitoring of energy efficiency. It is also a key component in formulating strategies and energy laws. The analysis of energy generation processes in the unified energy system (UES) of Ukraine by different sources of energy, both traditional and renewable. It is shown that the task of forecasting the time series future values based on its past values in the energy sector is the basis for the financial planning, management and optimization of energy production and control.

The review and analysis of the existing forecasting methods used in the energy sector are carried out. The classification of forecasting methods is given. It is shown that the basic requirements for forecasting models are rather high prediction accuracy and simplicity of algorithms. It is shown that, from the point of view of simplicity of realization, time of calculation, in view of the requirements to the forecasting method, adaptive forecasting methods should be put first.

The use of adaptive Holt-Winters models for forecasting energy and financial performance is substantiated. The method is based on the fact that the investigated time series can be represented as three components: the base component, the trend line and the seasonal effect. The results of electricity generation forecasting in the United Energy System of Ukraine and the results of RES generations forecasting in Ukraine by the Holt-Winters model are presented. The estimation and comparative analysis of tendencies of development of energy of Ukraine are made.

Key words: *United Energy System, energy generation, energy consumption, renewable energy, forecasting, Holt-Winters method.*

Кулик М.П.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЗАХИСТ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ

Об'єкти теплової енергетики належать до найбільших забруднювачів атмосферного повітря через зношеність основного технологічного обладнання. Вугільні блоки при спалюванні палива низької якості є джерелами утворення оксидів вуглецю, сірки та азоту. Найкращими методами зменшення шкідливих речовин є екологічно безпечні технологічні процеси, зокрема процес спалювання помеленого вугілля.

Проведений порівняльний аналіз парового та газового способу генерації електроенергії. Паровий спосіб генерації включає чотири етапи перетворення енергії палива (спалювання, формування робочого тіла, його розширення та отримання електроенергії при обертанні ротора генератора). Газовий спосіб включає тільки етапи перетворення (спалювання турбінного палива з отриманням робочого тіла, його розширення та генерацію електроенергії за допомогою окремого генератора).

Ефективність спалювання палива оцінювалася за рівнянням зворотнього теплового балансу. Загальний коефіцієнт корисної дії парового способу (добуток чотирьох величин) дещо менший за коефіцієнт корисної дії газового методу (добуток трьох величин). Показано, що при посіданні в одній енергетичній установці парового та газового способу генерації електроенергії можна підвищити ефективність генерації в межах 5-10%. Цього можна досягти навіть тоді, коли газова її частина працює на органічному паливі, а перерозподіл потоків первинної сировини здійснюється по схемі 50%/50%.

Спалювання палива в атмосферному повітрі, збагаченому киснем, призводить до зменшення обсягу димових газів і зниження концентрації оксидів азоту. Сучасні методи передачі теплового потоку із топки (а ще краще із передтопка) котельного агрегату в цикл газової генерації сприяють також підвищенню маневровості комбінованої енергетичної установки.

Ключові слова: паровий і газовий способи генерації електроенергії, зворотній тепловий баланс, комбінована парогазова енергетична установка, скорочення викидів, маневровість теплових станцій.

Постановка проблеми. Захист довкілля, зокрема атмосферного повітря, є однією із найгостріших проблем сучасного промислового виробництва, яке тісно пов'язане з енергетичною галуззю. Об'єкти великої теплової енергетики України, які здебільшого базуються на вугільних блоках, належать до найбільших забруднювачів атмосферного повітря. До переліку шкідливих речовин, які утворюються в ключовому технологічному процесі теплової енергетики – спалюванні органічного палива (дрібно помеленого кам'яного вугілля, мазуту, природного газу чи горючих газових відходів різноманітних технологічних процесів) входять оксиди вуглецю, сірки та азоту. Крім того, в структурі потужностей об'єднаної енергетичної системи України спостерігається дефіцит маневрових потужностей [1, 2, с. 32; 3, с. 49].

Спроба використання вугільних блоків теплоелектростанцій, більшість яких побудовані в 60-70 роках минулого століття, для покриття пікових навантажень не може бути ефективною. Адже часті їх пуски та зупинки підвищують ризики виникнення аварійних ситуацій, а робота техно-

логічного обладнання, яке вичерпало свій ресурс, у перехідних непроектованих режимах погіршує техніко-економічні та екологічні показники.

Створення додаткових маневрових потужностей у необхідних обсягах традиційними способом, тобто будівництвом гідроакумуючих електростанцій або використанням існуючих гідроелектростанцій у насосному режимі роботи, є економічно не вигідним. Тому необхідно терміново віднайти нестандартні способи вирішення вказаної проблеми [4, с. 2; 5, с. 25]. В критичних умовах, в яких знаходиться енергетична галузь, її технічне переобладнання за прикладом розвинених країн Європи і найближчих сусідів слід проводити на базі газотурбінних технологій.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [2, с. 34] проведений порівняльний аналіз ефективності вугільної паротурбінної генерації, коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) якої лежить в межах 40-42%. В той же час діючі теплові електростанції мають ККД на рівні дещо нижчому за 40%, а коефіцієнт корисної дії сучасних парогазових установок становить 50-60%. Вартість

встановленої потужності для традиційної генерації складає 1000-1400 дол./кВт, а для газової генерації – 400-600 дол./кВт. Такий же показник для гідроакмулюючих електростанцій перевищує 2500 дол./кВт.

В Україні наявна деяка інфраструктура у сфері газотурбінних технологій (проекування, випуск, налагоджувальні роботи), але через відсутність у достатній кількості дорогого газотурбінного палива (рідкого чи газоподібного) ця технологія в тепловій енергетиці широко не використовується. Сучасні підходи в традиційній тепловій енергетиці полягають у поєднанні в одній енергетичній установці парової та газової генерації, при цьому обидві турбоустановки [6, с. 109] можуть працювати на паливі, яке найбільш доступне в конкретному промисловому регіоні.

Постановка завдання. Прообразом такого підходу до енергетичних установок слід вважати технічне рішення німецьких інженерів (патент ФРГ № 839290 «Парогазова теплосилова установка», 1944 рік). У вказаному патенті німецькі винахідники запропонували частину неохолоджених димових газів після очищення від твердих включень скеровувати до газової турбіни, яка за допомогою окремого електрогенератора виробляє тиме додаткову кількість електричної енергії.

Мета статті – оцінити вплив поєднання парового та газового способів генерації електроенергії на ефективність техніко-екологічних показників процесу виробництва електричної енергії, зокрема коефіцієнт корисної комбінованої парогазової установки, обсяг димових газів і концентрацію шкідливих речовин.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для підтвердження викладених припущень проведемо оцінку ефективності парового і газового методу генерації електричної енергії. Спрощена блок-схема парового способу генерації електроенергії наведена на Рис. 1.

Традиційна схема парової генерації електроенергії на теплових електростанціях має певні послідовно з'єднані етапи перетворення енергії різного виду: спалювання палива в топці (коефіцієнт корисної дії топкової камери – η_1); нагрів кот-

лової води з отриманням пари необхідного тиску та температури (коефіцієнт корисної дії парогенератора – η_2), необхідних для роботи парової турбіни (ККД парової турбіни – η_3), яка в подальшому обертає електрогенератор (ККД електрогенератора – η_4).

Загальний коефіцієнт корисної дії послідовного з'єднання чотирьох блоків, які відображають етапи перетворення різного виду енергії в електричну, визначається за схемою:

$$\eta_{заг} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4, \quad (1)$$

Аналіз ефективності роботи окремих блоків, які ілюструють паровий спосіб генерації електроенергії (Рис. 1), відрізняється від загальноприйнятих у теплотехніці тим, що котельний агрегат розглядається як послідовне з'єднання паливної топки та парогенератора. Коефіцієнт корисної дії окремих компонентів такого поєднання, а саме топки, в сфері теплової енергетики не використовується. Це може бути пов'язано з тим, що такий коефіцієнт дещо занижений. В той же час у практиці використовуються котельні агрегати, в яких, крім радіаційних поверхонь нагріву, встановлені напіврадіаційні та конвективні поверхні. Це дає змогу ефективно використати температуру димових газів за топкою (для пиловугільних парогенераторів – 900-1200°C), знизивши її до рівня 110-130°C за повітропідігрівниками (на виході з котла).

Суто методично для аналітичних досліджень коефіцієнт корисної дії топки вугільних, мазутних котлів чи інших топко (паливень) можна визначити, знайшовши та оцінивши величину теплових втрат, які мають місце в досліджуваній топці. Ефективність використання палива в котельному агрегаті, а конкретніше в топці, визначається здебільшого двома факторами: повнотою згорання палива і глибиною охолодження продуктів згорання (димових газів, золи).

В роботі [7, с. 42–44] зазначено, що переважна кількість тепла, яке вноситься в котельний агрегат, сприймається поверхнями нагріву та переда-

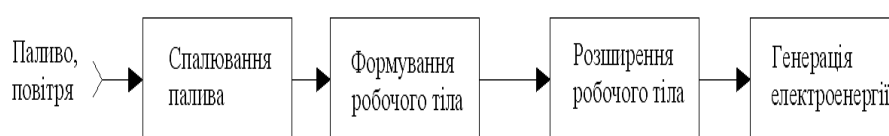


Рис. 1. Блок-схема технологічного процесу виробництва електроенергії по паровому способу генерації

ється робочому тілу, яке формується при підігріванні води до кипіння, випаровування та перегріву водяної пари до необхідних по технологічному регламенту тиску та температури. На ці потреби йде тепло, яке вважається корисним. Решта теплоти, яка в сучасних потужних котельних складає приблизно 8-12%, не використовується для отримання перегрітої пари. Це має місце внаслідок різного виду втрат тепла, що характеризує різні аспекти (режимні, конструктивні) роботи котельного агрегату.

Загальний розподіл тепла на частини, які корисно використовуються, і окремі втрати можна отримати із теплового балансу:

$$Q_n^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (2)$$

де Q_n^p – кількість тепла, яка міститься в одиниці маси твердого (рідкого) палива чи в одиничному об'ємі газоподібного палива, ккал/кг (ккал/м³);

Q_1 – корисне тепло, ккал/кг (ккал/м³);

Q_2 – втрата тепла з відхідними газами, ккал/кг (ккал/м³);

Q_3 – втрати тепла через хімічну неповноту спалювання палива, ккал/кг (ккал/м³);

Q_4 – втрати тепла через механічну неповноту спалювання палива, ккал/кг (ккал/м³);

Q_5 – втрати тепла на зовнішнє охолодження котельного агрегату (з поверхні котла), ккал/кг (ккал/м³);

Q_6 – втрата з фізичним теплом жужелю, ккал/кг (ккал/м³).

Наведене рівняння теплового балансу (2) може бути записане у відносних величинах до кількості скритої кількості теплоти в паливі, яке використовується для роботи енергоблоку.

$$\sum_{i=1}^{i=6} q_i = 1, \quad (3)$$

де $q_i = Q_i / Q_n^p$ – відносне значення.

Рівняння (2) називають прямим, а рівняння (3) – зворотнім тепловим балансом котельного агрегату. Якщо корисним теплом Q_n^p для таких досліджень вважати кількість теплоти, яка міститься в газах спалювання для нагрівання котлової води, то коефіцієнт корисної дії топкової камери за зворотнім балансом можна записати у відносних величинах так:

$$\eta_{т.к.} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (4)$$

Враховуючи, що всі значення відносних втрат тепла, які входять до виразу (4), значно відрізняються для різних конструкцій топковий котельного агрегату, виду та якості палива, експлуатаційного

стану топки, а також потужності енергоблоку, то для наближених розрахунків необхідно взяти середні значення для діапазону їх зміни для втрат тепла із відхідними газами q_2 , втрат від хімічної неповноти спалювання q_3 , втрат від механічного недопалу q_4 , втрат тепла через зовнішнє охолодження q_5 , а також втрат із фізичним теплом золи q_6 .

В різних розділах роботи [7, с. 48] для згаданих вище коефіцієнтів питомих втрат наведені орієнтовні їх значення і можливий діапазон їхньої зміни. Так, найбільша частка втрат тепла пропадає з відхідними газами, що складає 50-70% всіх перерахованих втрат. Відсоткова величина втрат тепла з відхідними газами складає 4-8% від кількості тепла, яке міститься в паливі та отримується при його спалюванні, тобто $q_2 = 0.04 - 0.08$.

Для оціночних розрахунків приймемо його значення не посередині можливого діапазону змін, а будемо орієнтуватися на найгірші умови, отже нехай $q_2 = 0.08$. Слід зауважити, що на думку авторів [7] збільшення об'єму димових газів призводить до підвищення втрат тепла, і ці втрати зменшуються при зменшенні такого об'єму. Що стосується втрат тепла від хімічної неповноти згоряння, то згадані автори вважають, що для камерних топковий вони не перевищують 0.5%, тобто $q_3 = 0.005$. По аналогії із попереднім каналом втрат обираємо найгірший випадок.

Наступна втрата тепла q_4 тими ж авторами оцінюється величиною, яка лежить у діапазоні від 0.5 до 5%, а середина діапазону для втрат від механічної неповноти згоряння $q_4 = 0.025$. Втрати від зовнішнього охолодження залежать від геометричних розмірів котельного агрегату і від температури його зовнішньої поверхні. При робочому навантаженні, яке близьке до номінального значення, q_5 за оцінками тих же авторів лежить у діапазоні від 0.176% до 0.31%. Для найгіршого випадку для втрат q_5 автор приймає значення 0.003.

Остання втрата корисного тепла із фізичним теплом жужелю (із золюю чи шлаком) q_6 авторами [7, с. 49] оцінюється величиною в 0.2% для палива із приведеною зольністю, яка передбачалася проектною документацією на момент побудови діючих ТЕС, а це 60-70-ті роки минулого століття. Якість палива, яке використовується на вугільних блоках, значно погіршилася, зокрема його зольність зросла вдвічі-втричі, а q_6 може прийняти значення теж у гіршому випадку на рівні 0.006 у не відсотковому вираженні. Після підставлення значень, згаданих у попередньому абзаці, в вираз (4) отримаємо: $\eta_{т.к.} = 1 - 0.08 - 0.005 - 0.025 - 0.003 - 0.006 = 0.88$.

Реальний коефіцієнт корисної дії топкової камери з урахуванням експлуатаційного зношування основних палинкових пристроїв може бути дещо нижчим за розраховане і вказане вище значення для новітніх котельних агрегатів вугільних блоків (на діючих ТЕС України такі блоки ще не встановлені). У зв'язку з цим для приблизних концептуальних розрахунків чисто умовно автор прийняв його значення на рівні 0.8.

Коефіцієнт корисної дії котла значно вищий від ККД топки насамперед тому, що температура відхідних газів за ним у 8-9 разів менша, ніж за топкою (900-1300°C – за топкою і 110-130°C – за котлом), тому і втрати значно менші. Інші втрати аналогічні, хоча мають деяку тенденцію до збільшення. Втрати з відхідними газами за парогенератором коливаються в дещо вужчому діапазоні і складають 8-10%. Необхідно чітко враховувати ККД котлів, в яких спалюють паливо різного типу (тверде, рідке чи газоподібне). Такий коефіцієнт лежить в межах 84-92%. Для подальших приблизних розрахунків автор приймає його значення теж на рівні 0.8.

Коефіцієнт корисної дії котла значно вищий від ККД топки насамперед тому, що температура відхідних газів за ним у 8-9 разів менша, ніж за топкою (900-1300°C – за топкою і 110-130°C – за котлом), тому і втрати значно менші. Інші втрати аналогічні, хоча мають деяку тенденцію до збільшення. Втрати з відхідними газами за парогенератором коливаються в дещо вужчому діапазоні і складають 8-10%. Необхідно чітко враховувати ККД котлів, в яких спалюють паливо різного типу (тверде, рідке чи газоподібне). Такий коефіцієнт лежить в межах 84-92%. Для подальших приблизних розрахунків автор приймає його значення теж на рівні 0.8.

Коефіцієнт корисної дії парової турбіни може лежати в межах 80-90%, в середньому для приблизних розрахунках було прийнято 80%. Такий же параметр електричного генератора на сучасному технічному рівні конструктивної реалізації значно вищий залежно від технічної досконалості та умов роботи електричної мережі і складає

97-99%. Використання виробленої електроенергії, яка спрямовується ще й на власні потреби, може призвести до умовного зниження ефективності електрогенератора до рівня 0.9. Після підстановки у вираз (1) всіх складників отримаємо загальний коефіцієнт роботи електричної станції по стандартній схемі парової генерації: $\eta_{\text{заг}} = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.9 = 0.4608$, що відповідає ефективності сучасних теплових електростанцій. Ефективність українських ТЕС значно нижча і в найгіршому випадку знаходилася на рівні приблизно 33-35%.

Значно простішою схемою генерації електричної енергії, яку в тепловій енергетиці досить часто використовують на ТЕЦ, є газотурбінна установка, яка розкручується високотемпературним газовим потоком, що отримується в камері згорання при спалюванні газотурбінного палива. Блок-схема такого технологічного процесу генерації електричної енергії наведена на Рис. 2.

Камера згорання газотурбінної установки теж може мати коефіцієнт корисної дії на рівні 80% (також у найгіршому або найкращому випадках). Враховуючи згадані значення ККД електричного генератора (90%), ККД газової турбіни приймемо на рівні парової (80%). Слід зауважити, що у виразі (1) для блок-схеми, зображеної на Рис. 2, матимуть місце лише три множники. Для виявлення позитивного ефекту переваги газової генерації електричної енергії перед її традиційним способом прийняті оцінки ефективності перетворення енергії в блоках ГТУ такі ж як і для парової генерації у виразі (1). Загальний коефіцієнт корисної дії процесу виробництва електричної енергії по схемі з використанням ГТУ буде виглядати так: $\eta_{\text{заг}} = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.9 = 0.576$.

Порівняння ефективності роботи комбінованої парогазової енергетичної установки (паралельне поєднання парового і газового способів генерації електроенергії) показує, що за умови розподілу первинного енергетичного ресурсу, кам'яного вугілля (чи іншого органічного палива) по схемі 50%/50% загальний коефіцієнт корисної дії може зрости в гіршому випадку як мінімум на 5%. Слід зауважити, що для забезпечення роботи газової

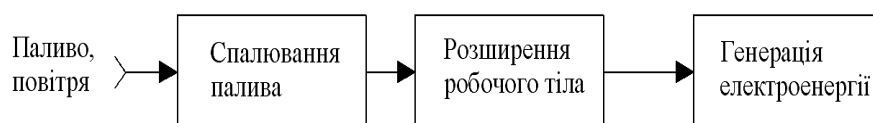


Рис. 2. Блок-схема виробництва електроенергії з використанням газової турбіни

частини комбінованої частини енергетичної установки може не використовуватися дороговартісне газотурбінне паливо.

Паралельне поєднання двох віток (парової та газової генерації електроенергії) у комбінованій парогазовій енергетичній установці дозволяє підвищити маневровість теплової енергетики, яка забезпечує енергетичну безпеку держави [8, с. 9–10]. Аналіз перспектив застосування таких установок в енергетиці України, а також оцінка існуючого стану і напрямів розвитку таких технологій в Україні проведений у роботах [9, с. 236; 10, с. 227]. З цього аналізу вбачається, що в зарубіжних країнах, включаючи Росію, таким проблемам приділяють серйозну увагу.

Висновки. Оновлена діюча енергетична стратегія України на період до 2030 року (Енергостратегія-2030), а також нова енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (НЕС-2035) передбачають зниження імпортозалежності завдяки збільшенню видобутку власних енергоносіїв, підвищення енергоефективності та розвитку поновлювальних джерел енергії.

Збалансований підхід до оновлення джерел генерації електроенергії та побудови нових дже-

рел енергії в рамках проекту 2025 року передбачає ввід 2.8 ГВт поновлювальних джерел, включаючи гідрогенерацію. В той же час на об'єктах теплової енергетики передбачається продовження терміну експлуатації 3-6 ГВт, а також будівництво нових потужностей приблизно на 0.6 ГВт. Такими темпами частка маневрових потужностей у встановленій потужності до 2035 року порівняно з 2015 роком має зрости майже вдвічі з 8.6% до 18%, що ще не зовсім відповідає науково обгрунтованому безпечному значенню.

За рахунок поєднання парового та газового способів генерації в одній енергетичній установці при різних схемах їх роботи, описаних у [9], вирішується три незалежних завдання:

- підвищення ефективності технологічного процесу генерації, що супроводжується підвищенням потужності при тій же кількості палива чи навіть при меншій його кількості,
- зменшується об'єм димових газів і концентрація деяких шкідливих інгредієнтів, внаслідок чого суттєво знижуються питомі валові викиди,
- підвищується маневровість теплових електростанцій завдяки різним поєднанням парової та газової генерації електроенергії.

Список літератури:

1. Воронцов С. Про відповідність Енергетичної стратегії України на період до 2030 року сучасним викликам і загрозам у сфері енергетичної безпеки // Національний інститут стратегічних досліджень. Електронний ресурс: <http://www.niss.gov.ua/articles/470/>.
2. Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття, або інтенсивне відновлення. Наукові праці. Серія: «Техногенна безпека». Вид. ЧДУ ім. П. Могили, 2013, Вип. 198, том 210. С. 31–39.
3. Мацевитый Ю.М. Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины / Ю.М. Мацевитый, Б.С. Стогний, А.К. Шидловский // Энергетика та електрифікація, 2013, № 1. С. 48–52.
4. Шеберстов О.М. Стан теплових електростанцій України, перспективи їх оновлення та модернізації // Энергетика і електрифікація, 2004. № 2. С. 1–6.
5. Ковецкий В.М., Ковецкая Ю.Ю. Газотурбинные двигатели в энергетике: достижения, особенности, возможности // Проблемы загальної енергетики, 2008. № 17. С. 24–30.
6. Кулик М.П. Підвищення ефективності комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок і зменшення екологічного забруднення навколишнього середовища // Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 5, 2008. С. 107–111.
7. Стырикович М.А. Парогенераторы электростанций / М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов // М.-Л. : Энергия, 1966. 384 с.
8. Праховник А.В. Развитие маневренной генерации ОЭС Украины как фактор повышения энергетической безопасности государства // А.В. Праховник, В.А. Попов, В.Ф. Находов, А.Г. Баталов, К.Б. Денисевич. Энергетика та електрифікація, 2008. № 7. С. 9–12.
9. Здановський В.Г. Перспективи застосування парогазових установок з врахуванням особливостей енергетики України / Теплова енергетика – нові виклики часу // Під загальною редакцією П. Омеляновського, Й. Мисака. Львів : НВФ «Українські технології», 2009. С. 235–242.
10. Халатов А.А. Парогазові установки в електроенергетиці: сучасний стан та перспективи розвитку в Україні / Теплова енергетика – нові виклики часу // Під загальною редакцією П. Омеляновського, Й. Мисака. Львів : НВФ «Українські технології», 2009. С. 226–234.

Kulyk M.P. ATMOSPHERIC AIR PROTECTION DURING LOW-QUALITY ORGANIC FUEL BURNING

It is noted that thermal power facilities are among the largest air pollutants due to the deterioration of the main technological equipment. Coal blocks, if burning fuel is of low quality which will only deteriorate in the future, are sources of carbon, sulfur and nitrogen oxides. The best methods of reducing harmful substances are environmentally friendly technological processes, in particular a process of burning ground coal.

The comparative analysis of the steam and gas methods of electricity generation is carried out. The steam generation method involves four stages of fuel energy conversion (burning, formation the working fluid, its expansion and power generation when a generator rotor is rotated). The gas method involves only conversion stages (combustion of turbine fuel to obtain working fluid, its expansion and power generation by a separate generator). The efficiency of fuel combustion was evaluated by the inverse heat balance equation. The overall efficiency of steam method (which is the product of four values) is slightly less than efficiency of gas method (product of three values).

It is shown, that a combination of steam and gas power generation methods in a single power plant, increases generation efficiency within 5-10%. This can be achieved even when its gas section is powered by organic fuel and redistribution of primary raw material flows is carried out according to 50%/50% scheme. Fuel combustion with oxygen-enriched atmospheric air reduces flue gas volume and decreases concentration of nitrogen oxides. Modern methods of transferring heat flow from a furnace (or even better from a pre-furnace) of the boiler unit to the gas generation cycle also help to increase maneuverability of the combined power plant.

Key words: *steam and gas power generation method, inverse heat balance, combined steam and gas power plant, emission reductions, maneuverability of thermal power plants.*

УДК 621.311.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/40>

Сінчук О.М.

Криворізький національний університет

Бойко С.М.

Криворізький національний університет

Некрасов А.В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Ножнова М.О.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

Онищенко А.О.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ОСНОВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою цієї роботи є аналіз факторів, що впливають на основні енергетичні показники вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств. Зважаючи на те, що залізорудна сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами, при цьому займаючи великі площі, що непридатні для сільськогосподарських робіт, ці підприємства мають стати полігоном для впровадження вітроенергетичних станцій в структури розподільчих систем цих підприємств. Гірничорудні підприємства відносяться до класу енергоємних, а у світі постійно йде конкурентна боротьба за ринки збуту залізорудної сировини, оскільки залізорудна промисловість займає важливе місце в економіці багатьох країн світу. Тому можна вважати актуальною науково-практичною задачею розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів для впровадження вітроенергетичних станцій в структуру комплексу електропостачання цих підприємств. Таким чином, в умовах гірничорудних підприємств є можливість та актуальність побудови вітроенергетичних станцій, однак їх експлуатація має свою специфіку, яку необхідно враховувати під час їх проектування та експлуатації. У статті викладено специфіку проектування вітроенергетичних станцій та фактори, що впливають на їх основні енергетичні характеристики.

Ключові слова: вітроенергетичні станції, енергетичне обладнання, електропостачання гірничорудних підприємств, фактори впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій.

Постановка проблеми. Аналіз досягнень сучасної енергетики показує, що децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Зазвичай витрати на передачу енергії сягають 30% від вартості її вироблення [1].

Між тим, освоєння потенціалу відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), особливо вітроенергетичних станцій (ВЕС), – це завдання, яке на цей час важко реалізувати технічно, оскільки воно пов'язане з низькою щільністю потоку енергії від

ВДЕ і залежністю їх від природних умов. Вартість отримання енергії, хоча вона і знижується щорічно, залишаються значно вище, ніж у традиційних енергоресурсів, а необхідних кардинальних технічних рішень поки не існує.

Технологічне об'єднання енергії ВЕС і енергії вуглеводневого палива в одній системі має суттєві техніко-економічні переваги. Ця перевага полягає у високій енергетичній ефективності, недосяжній у наявних системах енергопостачання, в простоті інтеграції з додатковими генеруючими потужностями на основі ВЕС з будь-яким ступенем заміщення.

Зважаючи на те, що залізорудна сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами, при цьому займаючи великі площі, що непридатні для сільськогосподарських робіт, залізорудні підприємства мають стати полігоном для впровадження ВЕС в структури розподільчих систем цих підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наявні методики для проектування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню, електропостачання за рахунок генерації електроенергії на ВДЕ, у тому числі ВЕС, або за рахунок використання котелень, дизель-генераторів.

У ряді попередніх досліджень автори обґрунтовують необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання гірничорудних підприємств (ГРП) під час застосування ВЕС, за критеріями економічності та ефективності передбачає формування ефективних режимів в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реального складника спожитої електричної енергії (ЕЕ), згенерованої під час використання ВДЕ [2-8].

Враховуючи той факт, що ГРП належать до класу енергоємних, у світі постійно йде конкурентна боротьба за ринки збуту залізорудної сировини (ЗРС), оскільки залізорудна промисловість займає важливе місце в економіці багатьох країн світу, можна вважати актуальною науково-практичною задачею розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів для впровадження ВЕС у структуру комплексу електропостачання-електроспоживання ГРП.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз факторів, що впливають на основні енергетичні показники вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств.

Виклад основного матеріалу. Із наведеної вище формули майже зрозуміло, крім степені k . Значення k в багатьох роботах приймається $k=0,143$. У нормативних документах рекомендують $k=0,2$. В США, для різних місць представлені значення від 0,2 до 0,26. Під час вимірів на різних висотах значення k сягає 0,34. В окремих працях для України використовується $k=0,167$. Тим не менш підбір значень потребує обережності [1].

Оскільки місцем для встановлення вітроенергетичної станції розглядається відвал, що являє собою повністю відкритий ландшафт, то степеневий показник шерохватості приймаємо 0,2.

Питома щільність повітря ρ не є сталою величиною і залежить від тиску, температури і кількості водяної пари в повітрі. Щільність водяної пари менше щільності сухого повітря, тому вологе повітря за того ж тиску буде мати меншу щільність, ніж сухе. Якщо розглядати повітря як ідеальний і сухий газ, то залежність щільності повітря від тиску і температури набуває такого вигляду:

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (1)$$

де p – тиск повітря; R_s – питома газова стала; T – температура повітря.

За умови нормального атмосферного тиску (на рівні моря $p_0 = 101\,325$ Па) і температурі повітря 0°C отримаємо:

$$\rho_0 = \frac{p}{R_s \cdot T} = \frac{101325}{287,058 \cdot 273,15} = 1,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2)$$

Під час розробки деяких покладів корисних копалин в атмосферу кар'єру можуть виділятися газоподібні радіоактивні речовини, основним з яких є радон, утворений під час розпаду радія. Вміст у повітрі робочої зони шкідливих газів і парів відповідно до вимог не має перевищувати певних норм.

Під час розробки корисних копалин в атмосферу кар'єрів виділяється такий пил, який являє собою маленькі тверді крупини розміром менше 0,1–0,5 мм. Він може бути отруйним чи не отруйним.

Оскільки наявність пилу у повітрі дуже впливає на густину повітря, то основними характеристиками, які визначають мікроклімат кар'єрів, накопичення і виніс шкідливостей, являються швидкість повітря, його температурний режим і вологість атмосфери.

Швидкість повітря в кар'єрах визначається швидкістю повітря на поверхні і температурним режимом кар'єрів. За швидкості вітру на поверхні більше 2 м/с вона визначається енергією вітрового потоку, за меншій – термічним фактором. Існує добовий і річний період зміни швидкості вітру на поверхні, швидкість вітру в кар'єрі зазвичай менша, ніж на поверхні. Термічні сили, які викликані прогрівом або охолодженням повітря, можуть суттєво змінювати швидкість повітря в кар'єрі і формувати повітряні горизонтальні потоки до 3 м/с, а висхідні – до 5 м/с [2–4].

Температура повітря в кар'єрі визначається температурою повітря на поверхні, адіабатичним

зчепленням повітря, тепловіддаючими і теплопоглинаючими процесами в кар'єрах і станом його атмосфери. Вона також змінюється протягом доби та за рік. Зазвичай температура повітря в кар'єрі вище, ніж на поверхні, внаслідок природного стискування, нагріву порід сонцем і наявності додаткових джерел тепла (машин і механізмів), причому у північній сторони температура повітря вище, ніж у південній сторони.

Висока вологість повітря в кар'єрі сприяє утворенню в них туману та паморосі, що зменшують видимість, ускладнюють ведення гірничих робіт і ослаблюють прогрів бортів, що знижує конвективний повітряний обмін у кар'єрах. Збільшенню вологості сприяють деякі заходи та технологічні процеси: зрошення вибухової гірничої маси, отвалів, доріг, гасіння пожеж, застосування гідромеханізації, дренаж підземних вод. Зміна відносної вологості має добовий та річний період.

Кар'єр є частиною земної поверхні. Тому повітрообмін в ньому у значному ступені визначається тим же фактором, що і повітрообмін над земною поверхнею загалом: швидкістю вітру і розподілом температури в приземному шарі повітря.

Найбільш ефективно провітрюється кар'єр під час застосування вітрової енергії, причому, чим вище швидкість вітру, тим краще провітрювання. В цьому разі в кар'єрі утворюється або вільний,

або напівграничний струмінь, який виносить все з кар'єра. Вільний струмінь утворюється за великого кута відкоса борта кар'єру і тому зустрічається частіше, ніж напівграничний. Схема провітрювання вільним струменем називається рециркуляційною, оскільки наявність зворотного струменя другого роду приводить до багатократної циркуляції (рециркуляції) деякої частки повітря в об'ємі кар'єру. При цьому вільний струмінь буде приносити до борту шкідливі речовини. Частина цих шкідливих речовин знову вступає в зону ОВСО, що з часом може привести до накопичення тут шкідливих речовин, тому ця зона називається застійною або мертвою [5].

Під штучною вентиляцією кар'єру розуміють інтенсифікацію атмосферного обміну в ньому будь-якими цілеспрямованими діями людини.

Штучна вентиляція кар'єру необхідна в випадках, коли інтенсивність повітрообміну в кар'єрі виявляється недостатньою для підтримки нормального санітарно-гігієнічного стану атмосфери в місцях ведення робіт.

Умови, що сприяють накопиченню шкідливих речовин у кар'єрі, такі:

- зменшення енергії вітрового потоку на поверхні;
- вертикальний температурний градієнт – менш адиабатичний;

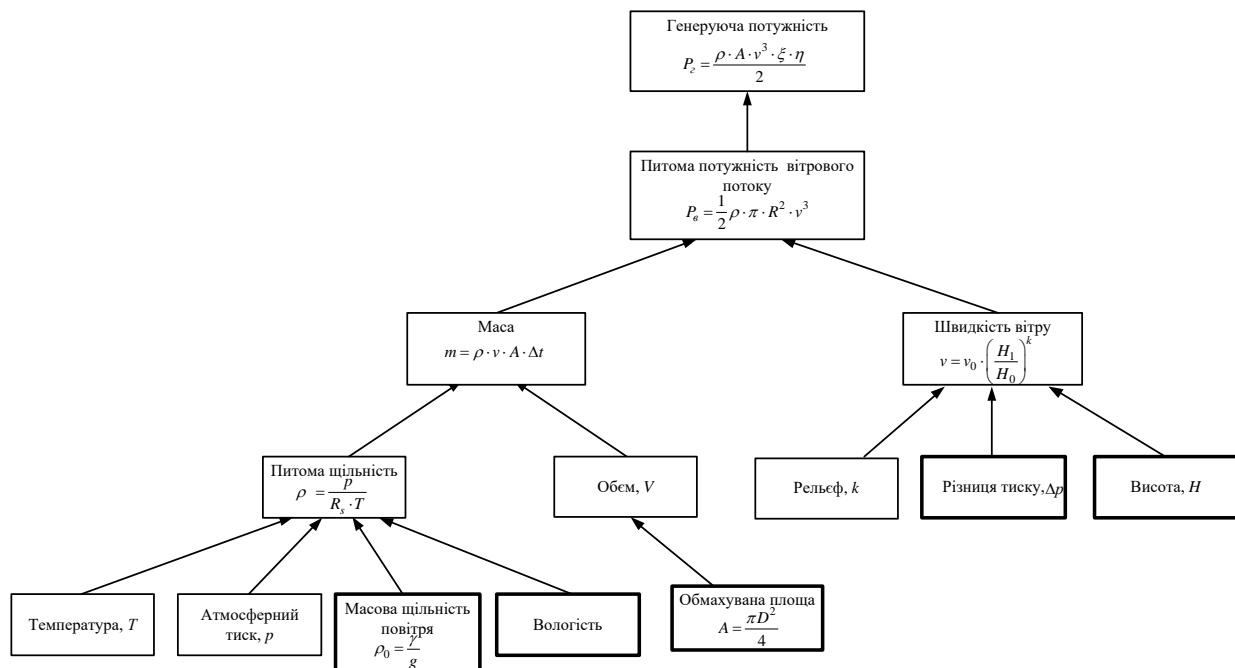


Рис. 1. Фактори впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції:
 D – діаметр вітроколеса; γ – питома вага повітря; g – прискорення сили тяжіння;
 R_s – питома газова стала; v_0 – швидкість вітру на заданій висоті; H_1 – задана висота; H_0 – висота виміру;
 ξ – коефіцієнт використання енергії вітру; η – коефіцієнт корисної дії генератора

– підвищення інтенсивності виділення шкідливих речовин у атмосферу кар'єри.

Зменшення енергії вітрового потоку на поверхні є основним фактором, який сприяє накопиченню шкідливих речовин у атмосфері кар'єра. Вище було зазначено, що за швидкості повітря на поверхні менше 2 м/с повітряний обмін між атмосферою кар'єра і поверхнею значно скорочується.

Підвищення інтенсивності виділення шкідливих речовин за наявних технологічних процесів у кар'єрах зазвичай пов'язане з виробництвом вибухових робіт, за яких в атмосферу кар'єра викидається велика кількість отруйного газу та пилу.

Способи штучної вентиляції кар'єрів поділяються на два класи: способи інтенсифікації природного повітряного обміну та способи власної штучної вентиляції [4].

До способів власної штучної вентиляції кар'єрів належать:

- вентиляція за допомогою труб та виробок;
- вентиляція вільними струменями, які створюються спеціальними вентиляторними установками.

Способи штучної вентиляції кар'єрів можуть бути також розділені на способи місцевої та загальнообмінної вентиляції.

Аналізуючи все вищезазначене, можна зробити висновок, що запыленість суттєвого впливу на генерацію електричної енергії за допомогою ВЕУ не буде мати.

Підсумовуючи, всі вищезазначені фактори впливу на основні енергетичні показники ВЕС можна показати у вигляді структури, яка зображена на рис. 1.

Значний вплив на характер затінення здійснює мінливість напрямку вітру протягом інтервалу вимірювання, яка реально спостерігається в

умовах вітрового поля ВЕС. Отже, відстань L між центрами поверхні обмаху та зони затінення (або кут ψ відхилення вітру від напрямку на ВЕУ) має сприйматися як випадкова величина з певними числовими характеристиками.

Як показують практичні дослідження на ряді зарубіжних ВЕС, у разі розташування в ряд декількох ВЕУ найбільший спад швидкості в разі напрямку вітру вздовж ряду спостерігається на другій в ряду (першій з затінених) установці, надалі він зменшується, а на рівні 5–6 ВЕУ вітровий потік практично стабілізується [3].

На вітчизняних ВЕС, побудованих на базі ВЕУ типу USW56-100, відстані між сусідніми ВЕУ в ряду становлять іноді 1,5–2,0 D (у світовій практиці відстані менше $4D$ не практикуються). За напрямку вітру вздовж ряду агрегати працюють зазвичай через один для уникнення впливу взаємозатінення, тому отримати практичні результати для розташованих поряд ВЕУ досить складно. Більш стабільний результат можна отримати, порівнюючи роботу ВЕУ в різних рядах за фронтального напрямку вітру, тобто за умови затінення одного ряду іншим. До речі, такий напрям вітру спостерігається найчастіше, таке орієнтування рядів ВЕУ під час проектування ВЕС [2].

Для максимального використання вітрового потоку рекомендується розміщувати ВЕС рядами, перпендикулярними переважному напрямку вітру, на відстані $4D$ один від одного. Однак у разі поздовжнього вітру ($\varphi 0 - \varphi \approx 0^\circ$) їх показники значно гірші. Так, втрата швидкості вітру на 20–30% спричинить зменшення потужності ВЕУ на 30–40% і більше, залежно від абсолютних значень швидкості вітру. Якщо ж напрям вітру може рівномірно змінюватися, то ВЕС доцільно розміщувати в шаховому порядку між сусідніми станціями $4D$.

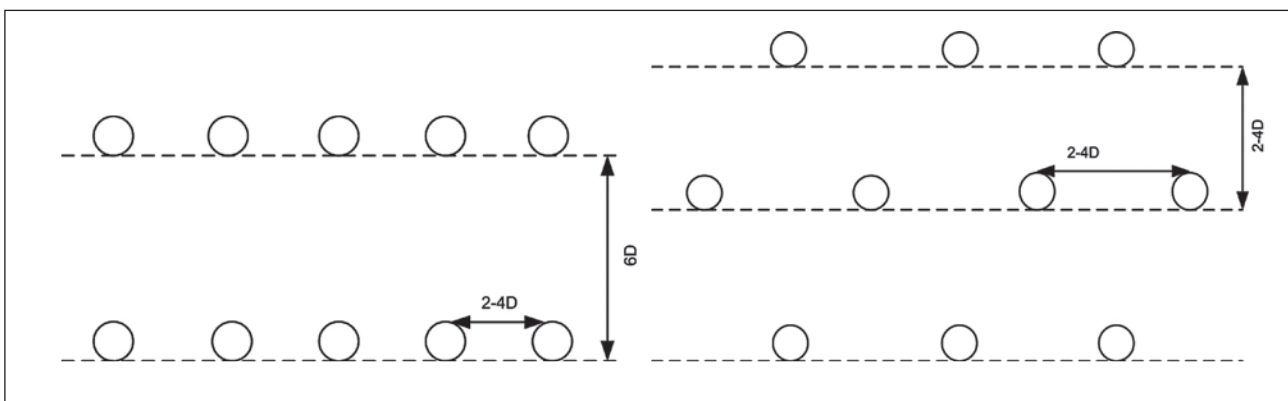


Рис. 2. Лінійна дворядка схема та лінійна шахова рівномірна схема

Тоді в першому випадку на площі S_T можна розмістити $S_T/(20D)^2$ установок, які дозволять отримати за рік ($T = 8760$ год/рік) енергію, яка рівна:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad [кВт \cdot \text{год}/\text{рік}], \quad (3)$$

або

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad [кВт \cdot \text{год}/\text{рік}]. \quad (4)$$

У другому випадку можна розмістити $S_T/(100D^2)$ установок, яка забезпечать технічний потенціал енергії вітру території:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (5)$$

або з урахуванням градації вітру V_i :

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (6)$$

Як бачимо, технічний потенціал вітрової енергії не залежить від діаметру i , відповідно, від одичної потужності вітроустановок.

Висновки. В умовах гірничорудних підприємств є можливість та актуальність побудови вітроенергетичних станцій, однак їх експлуатація має свою специфіку, яку необхідно враховувати під час їх проектування та експлуатації.

У статті викладено специфіку проектування вітроенергетичних станцій та фактори, що впливають на їх основні енергетичні характеристики.

Список літератури:

1. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): монографія. Кривий Ріг : Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
2. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startceva T.B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods // RNSPE, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.
3. Baumann T., Germond A. Application of the Kohonen Network to Short-Term Load Forecasting. IEEE 0-7803-1217-1. 1993. P.407-412.
4. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 p.
5. Кудря С.О. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води / С.О. Кудря, Ю.П. Морозов, М.П. Кузнєцов. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: тези доп. наукової звітної сесії НАН України*. Київ, 2013. С. 30.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. та інші. НАН України, державний комітет України з енергозбереження. Київ : 2001. 41 с.
7. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2013. Вип. 141. С. 8–10.
8. НЕК «Укренерго»: Офіційний сайт. URL: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>.

Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Onichenko A.O.

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCE ON BASIC ENERGY CHARACTERISTICS OF WIND POWER PLANTS OPERATED IN MINING ENTERPRISES

An analysis of the achievements of modern energy shows that decentralized grid systems using distributed generation sources can be an extremely profitable area for investment, if it is possible to place energy sources near consumers. Generally, energy transmission costs reach 30% of the cost of generating energy. Meanwhile, harnessing the potential of renewable energy sources, especially wind power stations, is a technically difficult task nowadays that is associated with low energy flux density from renewable energy sources and their dependence on natural conditions. Although energy costs are reduced annually, the cost of obtaining energy remains much higher than traditional energy resources, and the necessary fundamental technical solutions do not yet exist. The purpose of this work is to analyze the factors affecting the main energy performance of wind power stations operated in mining enterprises. Due to the fact that iron ore is extracted both open (quarry) and underground (mine, mine), while occupying large areas that are unsuitable for agricultural work, these enterprises should become a training ground for the introduction of wind power stations in distribution structures systems of these enterprises. Mining companies are energy-intensive, and the world is constantly competing for the markets for iron ore, since the iron ore industry is an important place in the economy of many

countries in the world. Therefore, it can be considered an urgent scientific and practical task of developing theoretical foundations, mathematical models and methods for the introduction of wind power stations in the structure of the power supply complex of these enterprises. Thus, in the conditions of mining enterprises there is an opportunity and urgency to build wind power plants, but their operation has its own specificity, which must be taken into account about their design and operation. The article describes the specifics of the design of wind power plants and the factors that affect their basic energy characteristics.

Key words: *wind power stations, power equipment, power supply to mining enterprises, factors influencing the main energy characteristics of wind power plants.*

Відомості про авторів

Беглов К.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Беднарська І.С. – асистентка кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Беднарська Я.С. – студентка кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Бойко С.М. – кандидат технічних наук, здобувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету;

Бунке О.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Буравльова М.Т. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного інституту «Енергія» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Владов С.І. – кандидат технічних наук, викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Водяницький Г.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри процесів, машин і обладнання в агроінженерії Житомирського національного агроекологічного університету;

Войтік А.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

Войтко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету;

Вяткін С.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту автоматики і електрометрії СВ РАН;

Гайтан О.М. – старший викладач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Говорушенко Т.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету;

Голуб Т.В. – аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Грабар О.І. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»;

Грибков С.В. – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри інформатики, доцент кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Гришкун Є.О. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»;

Грушко С.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Гупало Ю.Ю. – аспірант кафедри машинобудування Дніпровського державного технічного університету;

Денисюк С.П. – доктор технічних наук, професор, директор інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»;

Дерев'янюк І.Г. – викладач циклової комісії авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Доля К. – кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;

Доля О.Є. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних керуючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки;

Дроздова Є.А. – старший викладач кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету;

Єрмакова Д.Г. – магістр Одеського національного політехнічного університету;

Завгородній В.В. – студент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету;

Залюбовський М.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автотранспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Зеленьова І.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Іванчук О.В. – студент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету;

Калінчик В.В. – кандидат технічних наук, асистент кафедри охорони праці, цивільної та промислової безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Калінчик В.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Киричек Г.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Ковальчук А.О. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба;

Ковальчук Ю.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

Козел В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету;

Кравченко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

Кравченко С.М. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»;

Кулик М.П. – кандидат технічних наук, доцент Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Кутковецька Т.О. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

Кучеренко В.С. – кандидат фармацевтичних наук, викладач Черкаської медичної академії;

Лабжинський В.А. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Левківський В.Л. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»;

Лисогор Ю.І. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»;

Лисюк Г.П. – старший викладач кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Лобачев М.В. – кандидат технічних наук, завідувач кафедри Одеського національного політехнічного університету;

Малишев В.В. – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Мамчур В.А. – кандидат технічних наук, викладач спеціальних дисциплін Житомирського агротехнічного коледжу;

Марчук Г.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»;

Мещеряков Д.В. – менеджер підтримки користувачів АТ PETROSOFT;

Мисливий М.В. – Державний університет «Житомирська політехніка»;

Морозов А.В. – провідний інженер-дослідник ДП «Івченко-Прогрес» Orsid Author ID: 0000-0002-9343-6211;

Назаренко Н.П. – викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Некрасов А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних машин і апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського;

Нікулін Д.С. – студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Новіков П.В. – кандидат технічних наук, асистент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Ножнова М.О. – викладач циклової комісії авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Онищенко А.О. – аспірант кафедри електричних машин і апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського;

Павлішин М.А. – магістр кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Павлов В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Панасюк І.В. – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну;

Пелих С.М. – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Пилипенко Л.М. – голова циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Політанський Р.Л. – доктор технічних наук, виконуючий обов'язки професора кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Пономаренко А.В. – викладач циклової комісії авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Портянко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності Черкаського державного технологічного університету;

Приходько Н.В. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри фінансів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Приходько С.Б. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Пушка О.С. – кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технологічного факультету, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

Репін М.В. – кандидат технічних наук, асистент кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Рибій М.В. – 5 курс, ОЕ-91мп, кафедра електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Романюк О.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету;

Романюк О.Н. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету;

Сабодашко Д.В. – аспірант 3 року підготовки кафедри захисту інформації Національного університету «Львівська політехніка»;

Садовий К.В. – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри озброєння радіотехнічних військ Харківського національного університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба;

Сичило А.А. – студентка Одеського національного політехнічного університету;

Сінчук О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету;

Скачков В.О. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»;

Скосирев В.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри систем автоматизації та електроприводу Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет»;

Скрупський С.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Слюсаренко І.П. – старший викладач кафедри вищої та прикладної математики Житомирського національного агроекологічного університету;

Смикодуб Т.Г. – старший викладач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Смолій В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Снитюк В.Є. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Сорока П.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Сотніченко Ю.О. – викладач Київського коледжу зв'язку;

Струзік В.А. – аспірант кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій, інженер-програміст ТОВ «ПЕРША УКРАЇНСЬКА ЛІЗИНГОВА КОМПАНІЯ»;

Тверда О.Я. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Терещенко Д.О. – студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Тимків В.В. – асистент кафедри процесів, машин і обладнання в агроінженерії Житомирського національного агроекологічного університету;

Тимошенко В.С. – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Національного університету «Запорізька політехніка»;

Тіменко А.В. – асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»;

Ткаченко О.В. – магістр комп'ютерних наук кафедри інтелектуальних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Ткачук К.К. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Тугова Н.В. – викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Хома В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри захисту інформації Національного університету «Львівська політехніка»;

Хома Ю.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»;

Чобану В.В. – студентка кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Чорнофостова К.В. – студентка Одеського національного політехнічного університету;

Чубатий М.А. – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету;

Шелешей Т.В. – асистентка кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»;

Шкарупило В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Шмельов Ю.М. – кандидат технічних наук, заступник директора коледжу з навчальної роботи, викладач циклової комісії авіаційного та радіоелектронного обладнання Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ;

Шуригін А.С. – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету;

Ячменьов Я.О. – магістрант Державного університету «Житомирська політехніка».

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 31 (70) № 2 2020

Частина 1

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 23,58. Ум.-друк. арк. 30,92. Зам. № 0620/148

Підписано до друку 29.04.2020. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

03150, м. Київ, вул. Велика Васильківська 74, оф. 7

Телефон +38 (0552) 399 580,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.