

**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 35 (74) № 1 2024

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

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

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

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

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 10 від 21.03.2024 року)**

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

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

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

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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2024

ЗМІСТ

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бешлей П.І.

МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ.....1

Близнюкова А.Д., Близнюков Д.В., Новіков В.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИПАДКОВОГО РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ (RED) ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІР-МЕРЕЖАХ.....11

Бойко Ю.М., Пятін І.С.

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ LDPC КОДІВ ЗАСОБАМИ HDL В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI 6.....19

Ветошко І.П., Кравчук С.О.

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ГОЛОСОВИХ ПОСЛУГ VONR В МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ 5G.....27

Дубина В.О., Кононова І.В.

МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛЮ.....34

Єрохін В.Ф., Толстова А.В.

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ СИНТЕЗУ ДЕМОДУЛЯТОРА ВЗАЄМНО НЕОРТОГОНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ВФМ-2.....40

Кононова І.В., Тихонов М.В.

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ45

Мустафаєв О.В.

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВИХ ДИНАМІЧНИХ МЕРЕЖ.....51

Романов О.І., Бурлака Г.Ю.

ВЗАЄМОДІЯ КОНТРОЛЕРА RYU З КОМУТАТОРАМИ SDN.....57

Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Фомін М.М., Солодовник В.І.,

Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я.

УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ВИБОРУ АБОНЕНТСЬКИМ ТЕРМІНАЛОМ СТИЛЬНИКА МЕРЕЖІ 5G МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....66

Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Фомін М.М., Солодовник В.І.,

Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я.

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО БПЛА ЗА УМОВ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ.....74

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Andriushchenko T.Yu., Berezhna O.B.

CURRENT TRENDS IN THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PUBLISHING INDUSTRY OF UKRAINE.....81

Andriushchenko T.Yu.

COMBINING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TECHNOLOGIES METHODOLOGY FOR EFFICIENT GRAPHIC INFORMATION PROCESSING.....86

Баган Т.Г., Бунь В.П., Бунке О.С., Наделяєв К.О.

ПРЕДИКТИВНЕ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ91

Бишевец Н.Г., Бишевец Н.М., Бойков А.І., Фуртат С.О.

ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ.....97

Бойчук В.О., Бойчук А.А., Бойчук М.В. ПРО ФОРМУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ДІЙ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ.....	103
Брунеткін В.О., Давидов В.О., Тельпіс Р.Ф., Жанько К.О. МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТИ З ДИМОВИМИ ГАЗАМИ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ЇХ КІЛЬКІСТЮ ПРИ ЗМІННОМУ НАВАНТАЖЕННІ КОТЛА.....	111
Hrabovevskiy Ye.M., Bondarenko D.O., Ushakova I.O. USAGE OF ADAPTIVE DESIGN TECHNOLOGIES FOR THE DESIGNING OF A WEB APPLICATION FOR ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS.....	118
Дьячук Т.С., Шкрябець В.І. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ КОДУ НА МОВАХ ВИСОКОГО РІВНЯ.....	127
Жученко А.І., Путятін Р.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ НЕТОЧНОСТІ МОДЕЛІ.....	133
Киричек Г.Г., Тягунова М.Ю., Братчиков В.В. СИСТЕМА КЕШУВАННЯ ДАНИХ В РОЗГАЛУЖЕНІЙ МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ.....	141
Kolomoiets S.O. INTELLIGENT MEDICAL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....	147
Комлева Н.О. ІНЖИНІРИНГ БІЗНЕС-ВИМОГ ПРИ РОЗРОБЦІ СКЛАДНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ	152
Корнійчук О.В., Граф М.С. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ КОНФІДЕНЦІЙНОСТІ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НА ПРИКЛАДІ ПОБУДОВИ МАЙДАНЧИКУ ДЛЯ ДЕРЖАВНИХ ЗАКУПІВЕЛЬ.....	157
Костинчук О.В., Зима І.В. ВЛАСТИВОСТІ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ.....	163
Кулінченко Г.В., Панич А.О., Бугаєць П.І., Давиденко І.Л., Левковський О.В. ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ УСТАНОВКИ УТИЛІЗАЦІЇ ТИСКУ ГАЗУ.....	169
Кучеренко О.І., Вакалюк Т.А. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО СИСТЕМИ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ДРОНІВ.....	178
Лагута В.В., Тимошенко Л.С. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПОТОЧНОГО СТАНУ.....	185
Levkin D.A., Zavgorodniy O.I., Guliiyeva D.O., Levkin A.V. APPLICATION OF BOUNDARY-BORDER PROBLEMS FOR THE ANALYSIS OF THE STATE OF COMPLEX SYSTEMS.....	190
Легеза В.П., Нещадим О.М. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДЕМПФІРУВАННЯ ПОЗДОВЖНІХ ВПЛИВІВ В СИСТЕМІ З АМОРТИЗАТОРАМИ СУХОГО ТЕРТЯ.....	195
Лісовець С.М. ДОСТУП ДО ОРС-СЕРВЕРІВ З СЕРЕДОВИЩА .NET ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ADVOSOL.....	203
Ляшенко О.М., Бодягін В.Ю., Кирийчук Д.Л., Фролова М.Е. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ УНІВЕРСИТЕТУ: ПІДСИСТЕМА «СТУДЕНТ»	207
Малюга А.І. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС АВТОШКІЛ.....	213
Маріяш Ю.І., Степанець О.В. КОМБІНОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ.....	223
Марчук Д.К. АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ РОЗТАШУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА АВТОСТОЯНКАХ ДЛЯ РОЗРОБКИ МОЖЛИВИХ НЕЧІТКИХ ПРАВИЛ	231

Матошин О.В., Вислоух С.П. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ.....	237
Melnychuk B.P., Shevchenko V.V. AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF PARTS	245
Мрак В.Б., Климаш М.М., Масюк А.Р., Колодій Т.Б. МЕТОДИ ТА ПОКАЗНИКИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ РОЗРОБЦІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	252
Нічепорук А.О., Бармак О.В., Манзюк Е.А., Продеус М.С. МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МЕТАМОРФНИХ ВІРУСІВ РОЗПОДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ.....	260
Oleshchenko L.M. INTERCITY PASSENGER FLOW FORECASTING AND MTE BUSES OPTIMAL OPERATION USING LSTM NEURAL NETWORK.....	266
Омецинська Н.В., Боженко М.І. ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЗАПИТІВ КОРИСТУВАЧІВ.....	275
Положаєнко С.А., Прокоф'єв А.Ю. МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯКИХ ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ РЕЖИМОМ ПРОФІЛАКТИКИ.....	280
Пфайфер В.В., Бешлей М.І., Селюченко М.О., Брич М.В., Климаш М.М. АВТОМАТИЗАЦІЯ ОНОВЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	287
Тарновецька О.Ю., Газдюк К.П., Бален С.М., Дмитращук К.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ІНТЕРНЕТ СИСТЕМИ ДО МОНІТОРИНГУ, ВИКОРИСТОВУЮЧИ СУЧАСНІ DEVOPS ТЕХНОЛОГІЇ.....	295
Хорошевська І.О., Хорошевський О.І. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ WEB-TO-PRINT	303
Чикунів П.О., Нефьодова І.В. ПІДТРИМКА ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ БАГАТОРІВНЕВИМИ ПЕРЕРОБНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ.....	309
Шубович І.В., Вакалюк Т.А. СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМ ЛОЯЛЬНОСТІ....	316
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	324

CONTENTS

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Beshley P.I. METHOD OF ADAPTIVE LOAD CONTROL USING IOT TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT USE OF SOLAR ENERGY IN HYBRID POWER GRIDS.....	1
Blyzniukova A.D., Blyzniukov D.V., Novikov V.I. STUDY OF RANDOM EARLY DETECTION (RED) METHOD FOR PREVENTING TRAFFIC OVERLOAD IN MULTISERVICE IP NETWORKS.....	11
Boiko J.M., Pyatin I.S. DETERMINING THE PERFORMANCE OF LDPC CODES USING HDL IN COMMUNICATION SYSTEMS WI-FI 6 TECHNOLOGY.....	19
Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. STRUCTURAL FEATURES OF VONR VOICE SERVICES IMPLEMENTATION IN A 5G MOBILE NETWORK.....	27
Dubyna V.O., Kononova I.V. RELIABILITY MODELS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT OBJECTS TAKING INTO ACCOUNT CONTROL CHARACTERISTICS.....	34
Yerokhin V.F., Tolstova A.V. METHODOLOGY AND RESULTS OF THE SYNTHESIS OF A DEMODULATOR OF MUTUALLY NOORTHOGONAL SIGNALS VFM-2.....	40
Kononova I.V., Tykhonov M.V. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT.....	45
Mustafaiev O.V. ASSESSMENT OF SIGNAL TRANSMISSION QUALITY IN ACCORDANCE WITH CONNECTIVITY OF NODES IN WIRELESS DYNAMIC NETWORKS.....	51
Romanov O.I., Burlaka H.Yu. SDN NETWORK MANAGEMENT USING RYU CONTROLLER.....	57
Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Fomin M.M., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. IMPROVED ALGORITHM FOR ADAPTIVE SELECTION BY THE SUBSCRIBER TERMINAL OF THE 5G MOBILE NETWORK	66
Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Fomin M.M., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. ALGORITHM FOR DETERMINING THE LOCATION OF AN UNAUTHORIZED UAV UNDER THE CONDITIONS OF MULTIBEAM PROPAGATION OF RADIO WAVES.....	74

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Andriushchenko T.Yu., Berezhna O.B. CURRENT TRENDS IN THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PUBLISHING INDUSTRY OF UKRAINE.....	81
Andriushchenko T.Yu. COMBINING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TECHNOLOGIES METHODOLOGY FOR EFFICIENT GRAPHIC INFORMATION PROCESSING.....	86
Bahan T.H., Boun V.P., Bunke O.S., Nadeliaev K.O. PREDICTIVE CONTROL IN CONTROL SYSTEMS OF MICROCLIMATE	91
Byshevets N.H., Byshovets N.M., Boikov A.I., Furtat S.O. THE TRAVELER'S PROBLEM AS A UNIVERSAL TOOL FOR ROUTE OPTIMIZATION.....	97
Boychuk V.O., Boychuk A.A., Boychuk M.V. ON THE FORMATION OF ACTIONS SEQUENCES FOR INTELLIGENT AGENTS.....	103

Brunetkin V.O., Davydov V.O., Telpis R.F., Zhanko K.O. METHOD OF MINIMIZING LOSSES WITH FLUE GASES BY CONTROLLING THEIR QUANTITY AT VARIABLE BOILER LOAD.....	111
Hrabovskiy Ye.M., Bondarenko D.O., Ushakova I.O. USAGE OF ADAPTIVE DESIGN TECHNOLOGIES FOR THE DESIGNING OF A WEB APPLICATION FOR ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS.....	118
Diachuk T.S., Shkriabets V.I. AUTOMATED SYSTEM OF CODE GENERATION IN HIGH-LEVEL LANGUAGES.....	127
Zhuchenko A.I., Putiatin R.O. INVESTIGATION OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL OF THE FIRING PROCESS OF CARBON GRAPHITE PRODUCTS WITH REGARD TO MODEL INACCURACY.....	133
Kyrychek H.H., Tiahunova M.Yu., Bratchykov V.V. DATA CACHING SYSTEM IN DISTRIBUTED MICROSERVICE ARCHITECTURE.....	141
Kolomoiets S.O. INTELLIGENT MEDICAL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....	147
Komleva N.O. ENGINEERING OF BUSINESS REQUIREMENTS IN THE DEVELOPMENT OF COMPLEX DIAGNOSTIC SYSTEMS	152
Korniichuk O.V., Hraf M.S. METHODS AND ALGORITHMS OF PRESERVING CONFIDENTIALITY IN DECENTRALIZED SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF BUILDING PUBLIC PROCUREMENTS SYSTEM.....	157
Kostynchuk O.V., Zyma I.V. PROPERTIES OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY AS A POWER CONTROL OBJECT.....	163
Kulinchenko H.V., Panych A.O., Buhaiets P.I., Davydenko I.L., Levkovskiy O.V. THE EVALUATION OF THE GAS PRESSURE UTILIZATION PLANT ELECTRICAL GENERATION PARAMETERS.....	169
Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A. OVERVIEW OF RESEARCH ON THE DRONE ROUTE CONSTRUCTION SYSTEM.....	178
Laguta V.V., Tymoshenko L.S. SELECTION OF THE EFFICIENCY PARAMETERS OF RAILWAY AUTOMATION SYSTEM COMPONENTS TAKING INTO ACCOUNT THEIR CURRENT CONDITION.....	185
Levkin D.A., Zavgorodniy O.I., Gulieva D.O., Levkin A.V. APPLICATION OF BOUNDARY-BORDER PROBLEMS FOR THE ANALYSIS OF THE STATE OF COMPLEX SYSTEMS.....	190
Legeza V.P., Neshchadym O.M. MATHEMATICAL MODEL OF THE DAMPING PROCESS OF LONGITUDINAL IMPACTS IN A SYSTEM WITH DRY FRICTION SHOCK ABSORBERS.....	195
Lisovets S.M. ACCESS TO OPC SERVERS FROM THE .NET ENVIRONMENT USING ADVOSOL SOFTWARE...203	203
Liashenko O.M., Bodiain V.Yu., Kyrychuk D.L., Frolova M.E. DESIGNING A SOFTWARE SYSTEM TO SUPPORT THE PROCESSES OF MANAGEMENT OF EDUCATIONAL ACTIVITIES OF THE UNIVERSITY: SUBSYSTEM “STUDENT”.....	207
Maliuha A.I. RESEARCH CONCEPTUAL PRINCIPLES VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF DRIVING SCHOOLS.....	213
Mariiash Yu.I., Stepanets O.V. COMBINED FEEDFORWARD AND FEEDBACK CONTROL OF PARAMETERS OF THE BLOWING MODE OF THE BASIC OXYGEN FURNANCE.....	223
Marchuk D.K. ANALYSIS OF POSSIBLE OPTIONS FOR THE LOCATION OF VEHICLES IN PARKING LOTS TO DEVELOP POSSIBLE FUZZY RULES.....	231
Matoshyn O.V., Vysloukh S.P. SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF DRILLING HOLES IN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER PARTS.....	237

Melnychuk B.P., Shevchenko V.V. AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF PARTS ..	245
Mrak V.B., Klymash M.M., Masyuk A.R., Kolodiy T.B. METHODS AND INDICATORS OF EFFICIENCY ASSESSMENT IN THE DEVELOPMENT OF INTELLIGENT VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS.....	252
Nicheporuk A.O., Barmal O.V., Manziuk E.A., Prodeus M.S. THE METHOD OF DETECTION OF METAMORPHIC VIRUSES BY DISTRIBUTED SYSTEMS BASED ON COMPARISON OF EQUIVALENT FUNCTIONAL BLOCKS.....	260
Oleshchenko L.M. INTERCITY PASSENGER FLOW FORECASTING AND MTE BUSES OPTIMAL OPERATION USING LSTM NEURAL NETWORK.....	266
Ometsynska N.V., Bozhenko M.I. PERSONALIZATION OF SEARCH BASED ON ANALYSIS USER REQUESTS.....	275
Polozhaenko S.A., Prokofiev A.Ju. MODELS FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF DYNAMIC SYSTEMS, THE FUNCTIONING OF WHICH IS CHARACTERIZED BY THE MODE OF PREVENTION.....	280
Pfaifer V.M., Beshley M.I., Seliuchenko M.O., Brych M.V., Klymash M.M. AUTOMATION OF THE SOFTWARE UPDATE OF DISTRIBUTED INFORMCOMMUNICATION SYSTEMS.....	287
Tarnovetska O.Yu., Hazdiuk K.P., Balen S.M., Dmytrashchuk K.M. STUDY OF INTERNET SYSTEM CONNECTION TO MONITORING USING MODERN DEVOPS TECHNOLOGIES.....	295
Khoroshevska I.O., Khoroshevskiy O.I. RESEARCH OF THE POSSIBILITIES AND FEATURES OF SYSTEMS BUILT ON THE BASIS OF WEB-TO-PRINT.....	303
Chykunov P.O., Nefodova I.V. SUPPORT FOR DECISION-MAKING PROCESSES IN MULTI-LEVEL PROCESSING ENTERPRISES	309
Shubovych I.V., Vakaliuk T.A. THE STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF DEVELOPMENT OF MODELING LOYALTY PROGRAMS.....	316
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	324

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/01>**Бешлей П.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ¹

У роботі досліджено існуючу систему віддаленого моніторингу та управління SmartESS, що використовується в автономних сонячних електростанціях. Виявлено обмеження системи, зокрема неефективне управління енергоспоживанням через ручне втручання, обмежену адаптацію до змін погодних умов, недостатню інтеграцію з системами "розумного будинку" та відсутність динамічного реагування на коливання виробництва сонячної енергії. Одним із основних недоліків усіх сучасних систем моніторингу сонячної енергії є їх нездатність вимірювати та ресструвати сонячну енергію, яка не використовується безпосередньо для живлення пристроїв або зарядки акумуляторів, особливо в умовах відсутності навантаження. Через цей недолік, системи моніторингу можуть недооцінювати загальну кількість енергії, яку можуть виробляти сонячні панелі. Це може вплинути на планування та ефективність використання сонячної енергії. Для вирішення цих недоліків запропоновано та реалізовано метод адаптивного управління навантаженням у гібридних електромережах з використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії. Метод базується на використанні сенсора освітленості біля сонячних панелей, що дозволило визначити модель кореляції між рівнем освітленості і потужністю генерації сонячної енергії. У системі Smart Life створені сценарії управління навантаженням, які використовують кореляційну модель для автоматичного реагування на зміну інтенсивності світла та вироблення сонячної енергії. Система працює таким чином, що коли відбуваються зміни в інтенсивності світла, вона автоматично робить прогнози щодо майбутнього вироблення сонячної енергії. На основі цих прогнозів розробляються різні сценарії управління навантаженням. Однією з ключових особливостей цієї системи є використання розумних розеток для управління електроприладами. Зокрема розумні розетки визначають рівень енергоспоживання підключених до них пристроїв та можуть автоматично вмикати або вимикати прилади в залежності від доступності для їх живлення сонячної енергії. Наприклад, якщо виробляється багато сонячної енергії, система може включити деякі прилади, а коли енергії мало – вимкнути їх автоматично. У практичному застосуванні розроблений метод дозволив автоматично та ефективно використовувати сонячну енергію для потреб домогосподарства, адаптуючись до змін погодних умов у реальному часі без потреби ручного втручання.

Ключові слова: Інтернет речей, гібридні електромережі, система SmartESS, система Smart life, розумні пристрої, сонячна енергія.

Постановка проблеми. Зростання світового енергоспоживання посилює навантаження на традиційні енергетичні джерела та природні ресурси, акцентуючи увагу на необхідності енергетичної трансформації [1]. Використання цифрових технологій у поєднанні з відновлюваною енергетикою відкриває шлях до створення інноваційних,

ефективних та екологічно чистих енергосистем [2]. Однією з ключових аспектів застосування цифрових технологій є використання систем віддаленого моніторингу та управління гібридними електромережами з сонячною генерацією, які працюють на «зеленій» енергії [3]. Серед недоліків існуючих систем моніторингу варто відзначити неефективне управління енергоспоживанням через залежність від ручного втручання, недостатню адаптацію до змін погодних умов, обмежену інтеграцію з системами "розумного будинку" та відсутність динаміч-

¹ Робота виконана за підтримки українського проекту № 0123U101692 «Стратегічні напрямки, методи та засоби цифровізації та інтелектуалізації енергетичних систем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій»

ного реагування на коливання виробництва сонячної енергії [4–6]. Ці виклики вимагають розробки сучасних систем моніторингу та управління, які включають в себе технології Інтернету речей (IoT) для автоматизації та адаптації процесу управління навантаженням на основі аналізу реальних даних щодо доступності сонячної енергії, що дозволить оптимізувати використання енергії та підвищити загальну ефективність системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженнях, представлених у роботах [7–10], системи енергомоніторингу на базі IoT виявляють значний потенціал для збору та аналізу даних про енергоспоживання в режимі реального часу. Вони використовують передові технології, такі як розумні лічильники та сенсори, розташовані в будівлях, для надання детальної інформації про споживання енергії. Передові методи аналітики, такі як машинне навчання та інтелектуальний аналіз даних, обробляють ці дані для виявлення закономірностей, аномалій та можливостей для оптимізації енергоспоживання. Ці системи відкривають широкі можливості для оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності енергетичних мереж. Проте, одним із важливих викликів у використанні таких систем є точність прогнозування генерації сонячної енергії. Це стає складним завданням через потребу враховувати різноманітні параметри, такі як розташування сонячних станцій, їхні технічні характеристики, індивідуальні потреби споживачів у енергії та змінні погодні умови. Для досягнення точних прогнозів, необхідно навчати моделі, які вимагають велику кількість даних та обчислювальних ресурсів. Крім того, такі моделі можуть бути чутливими до змін в параметрах та умовах, що може знизити їхню надійність.

Автори роботи [11] пропонують систему управління енергоспоживанням, яка оптимізує використання сонячних панелей та електромережі для зменшення витрат на електроенергію. Система автоматично перемикається між джерелами енергії для максимальної ефективності та економії коштів. Недоліком пропонованої системи є відсутність урахування змін кількості генерованої сонячної енергії в залежності від погодних умов та відсутність автоматичної адаптації навантаження для максимізації використання сонячної енергії у реальному часі.

У роботі [12] досліджено застосування IoT для моніторингу та розподілу енергії гібридної сонячної електростанції. Для цього використовуються різні IoT-пристрої, такі як серводвигуни, світлозалежні резистори, Arduino та контролер МРРТ, щоб оптимізувати збір сонячної енергії. Додатково використовується датчик температури для аналізу впливу погодних умов на роботу системи. Всі дані, такі як температура, вологість, напруга та струм,

відображаються в реальному часі на сервері Thing Speak, що дозволяє користувачам відстежувати щоденне використання сонячної енергії та її ефективність. Важливо зауважити, що цей проект є прототипом, і реальний розподіл енергії не був виконаний, але планується використовувати IoT для контролю за навантаженням у майбутньому. Недоліком пропонованої системи моніторингу та управління є обмеженість щодо урахування тільки температури зовнішнього середовища, що стає недостатнім для точного визначення обсягу генерації сонячної енергії, оскільки інші важливі фактори, такі як хмарність і освітленість, не враховуються належним чином.

Метою роботи є покращення функціональності існуючих систем моніторингу та управління в гібридних електромережах шляхом інтеграції IoT-орієнтованої системи Smart Life та розробки методу адаптивного управління навантаженням та ефективного використання сонячної енергії.

Виклад основного матеріалу. Сучасні досягнення у галузі сонячної енергетики стрімко розвиваються, і однією з передових інновацій на ринку є гібридна сонячна станція. Ця технологія виявляється надзвичайно ефективною і ідеальною для використання у приватних домогосподарствах. Гібридна сонячна електростанція представляє собою оптимальний компроміс між автономними і мережевими сонячними електростанціями, забезпечуючи стабільний доступ до електроенергії і здатність працювати автономно в разі відключення мережі. У роботі досліджується власна сонячна електростанція, що складається з п'яти панелей Longi LR5-72НТН, кожна з яких має потужність 580 Вт, загалом надаючи 2900 Вт потужності. Установка доповнена гібридним інвертором Altek Atlas потужністю 3,6 кВт-24В, а також парою 12-вольтових гелевих батарей об'ємом 100 ампер кожна, які з'єднані послідовно.

Для спрощення управління системою, в інверторі вбудований модуль збору даних з Wi-Fi підтримкою, що дозволяє віддалено і неперервно контролювати продуктивність системи, виконувати діагностику компонентів, змінювати робочі налаштування і надавати моніторингові дані. Доступ до реєстратора даних і з'єднання з ним здійснюються через маршрутизатор KuWfi PRO POE 4G LTE [11–13].

Розгортання автономної сонячної системи відкриває нові можливості для домогосподарств, але успішне використання її потенціалу залежить від розуміння та ефективного використання цієї технології. Перший крок – це глибокий аналіз своїх енергетичних звичок, включаючи моніторинг щоденного споживання електроенергії. Ще однією важливою складовою є оптимізація використання побутових приладів, з метою максимально ефективного використання сонячної енергії, зокрема,

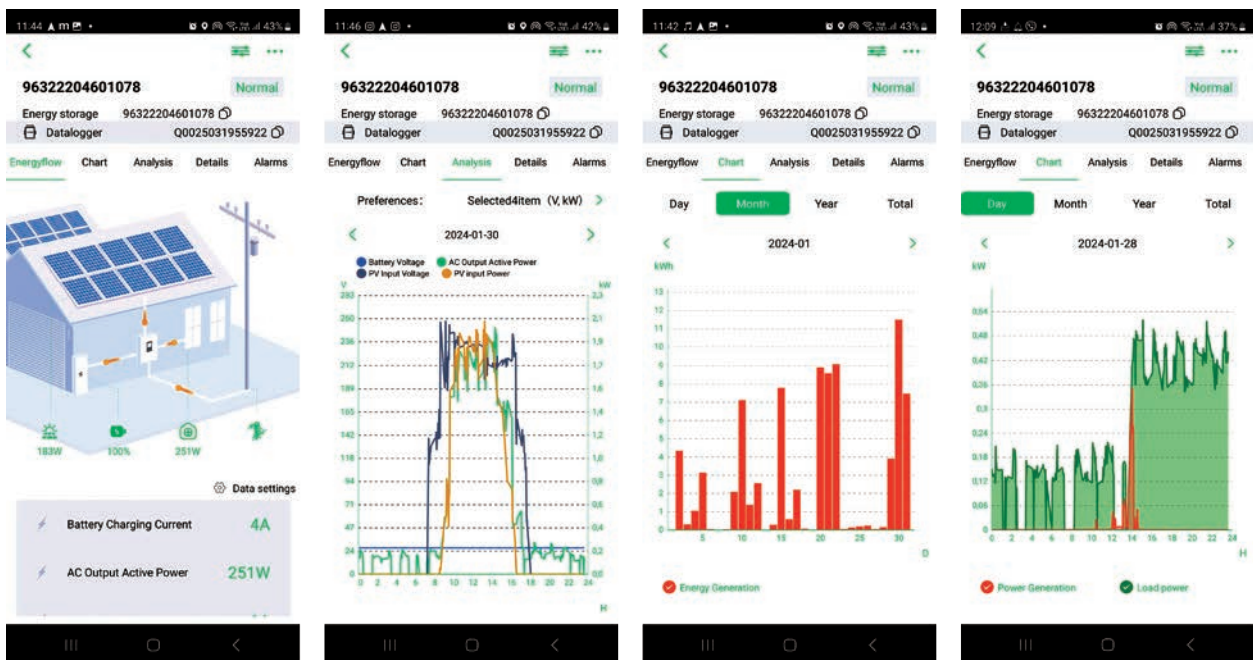
запуск приладів із високим енергоспоживанням під час пікової сонячної активності. Це покращує ефективність використання сонячної енергії та зменшує залежність від традиційних джерел електроенергії. Крім цього, необхідно уважно стежити за зарядкою та розрядкою акумулятора, щоб уникнути його передчасного зносу. Останнім, але не менш важливим етапом є використання програмованих функцій автономних сонячних систем.

Це дозволяє налаштувати систему на оптимальні режими роботи, які відповідають вашому розпорядку дня та потребам в енергії.

Отже, розглянемо процес моніторингу та управління автономною сонячною електростанцією за допомогою використання відомої системи моніторингу та управління виробника SmartESS для інвертора Altek, встановленої на мобільному додатку (рис. 2).



Рис. 1. Структурна схема досліджуваної системи гібридної сонячної електростанції



а) б) в) г)
Рис. 2. Структурна схема досліджуваної системи гібридної сонячної електростанції

На рис. 2а показано інтерфейс мобільного додатка для моніторингу сонячної енергетичної системи. У верхній частині екрану вказано серійний номер системи та статус «Нормально», що свідчить про те, що система функціонує. Далі є вкладки для навігації між розділами інтерфейсу, такі як «Накопичувач енергії», «Реєстратор даних», «Графік», «Аналіз», «Деталі» та «Тривоги». У центрі екрана відображено анімацію будинку з сонячними панелями на даху, яка візуалізує потоки енергії. Індикатори на анімації показують поточну вихідну потужність сонячних панелей, рівень заряду акумуляторної батареї та споживану потужність. Нижче розташовані кнопки та інші елементи управління інтерфейсом.

На рис. 2б подано комплексний графік, який відображає динаміку чотирьох параметрів протягом доби. Ці параметри включають напругу акумуляторної батареї, напругу від сонячних панелей, потужність споживання домогосподарства та потужність генерації від сонячних панелей. Графік дозволяє спостерігати за їхньою динамікою протягом доби.

На рис. 2в представлений інтерфейс для вибору періоду моніторингу, такого як «День», «Місяць», «Рік» та «Всього», з можливістю перегляду даних за попередні або наступні періоди. У нижній частині графіка розташовані налаштування та іконки для додаткових функцій.

На рис. 2г наведено дані моніторингу генерації та споживання енергії за день 2024-01-28. Графік показує генерацію електроенергії зеленим кольором та споживану потужність червоним кольором. З графіка можна зрозуміти, що о 14:00 годині генерація електроенергії від сонячних панелей досягла 400 кВт, що забезпечує можливість використання енергії для підігріву через керамічну батарею. Однак через похмуру погоду рівень генерації сонячної енергії значно зменшився, і, відповідно, додаткова енергія постачається зі стандартної мережі, що є менш ефективним рішенням.

Вибір джерела енергії та способу їх взаємодії має велике значення для ефективності роботи сонячної системи. Існує три основні режими роботи інвертора рис. 3а.

Режим Utility Solar Bat (USB) – лише електромережа забезпечує електроенергією ваш будинок. Сонячна енергія та акумулятори будуть використовуватися тільки в тому випадку, якщо електромережа недоступна.

Режим Solar Utility Bat (SUB) – сонячна батарея забезпечує живлення навантажень в першу чергу, якщо сонячної енергії недостатньо для живлення

навантажень, енергія від мережі дозаряджається. Акумулятори використовуються лише тоді, коли сонячної енергії недостатньо і немає доступу до електромережі.

Режим Solar Bat Utility (SBU) – сонячна енергія забезпечує живлення ваших навантажень в першу чергу, якщо сонячної енергії недостатньо, для одночасного живлення навантажень буде використовуватися акумуляторна батарея. Електромережа використовується лише тоді, коли акумулятор розряджається до низької напруги.

В управлінні сонячними станціями вибір пріоритетного джерела зарядного пристрою є важливим для оптимізації використання сонячної енергії. Загалом є 3 режими (рис. 3б).

Режим CSO – сонячна енергія заряджає акумулятор. Електромережа використовується лише за відсутності сонячної енергії.

Режим SNU – сонячна енергія та електроенергія заряджають акумулятор одночасно.

Режим OSO – для заряджання акумулятора використовується лише сонячна енергія.

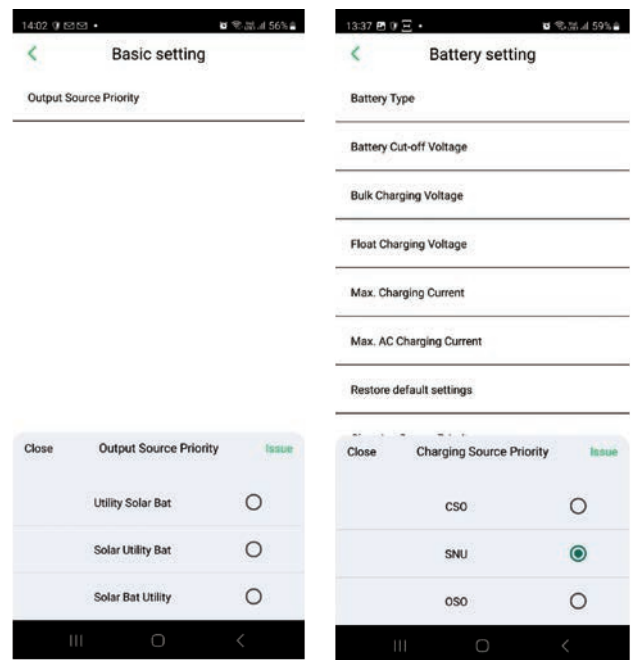


Рис. 3. Управління режимами функціонування гібридної сонячної електростанції за допомогою системи SmartESS

З описаного вище випливає, що режим USB не підходить, адже він не використовує сонячну енергію та не сприяє економії коштів. Також не має сенсу налаштовувати режим заряду SNU, оскільки він використовує електроенергію для заряду акумулятора, навіть коли є доступна сонячна енергія. Отже, основним питанням є визначення частоти

заряджання батареї, яка найбільше відповідає вашим потребам і дозволяє ефективно використовувати сонячну енергію.

Якщо ви хочете зберегти акумулятор на випадок скидання навантаження і максимізувати термін її служби, то найбільш доцільними є режими SUB і CSO. Сонячна енергія буде використовуватися тоді, коли вона доступна, а загальна електромережа поповнюватиме її запас за необхідності, наприклад, якщо хмара насунеться на панелі або сонце почне сідати. Акумулятор заряджатиметься від сонця, але в разі розряду вночі, його заряджатиме комунальна електромережа.

Якщо головною метою є максимізація використання сонячної енергії, включаючи її використання вночі, то налаштування SBU та OSO може бути оптимальним варіантом. У цьому режимі сонячна енергія буде використовуватися для заряджання акумуляторної батареї, і система буде автоматично використовувати її, коли це потрібно, щоб забезпечити стабільну подачу енергії. Акумуляторна батарея буде використовуватися вночі до досягнення певного рівня розряду (зазвичай 50% ємності), після чого вона буде лише на резервний запас для використання в разі пікового навантаження або поганих погодних умов. Цей підхід ефективний, але може бути ризикованим у випадку тривалих хмарних днів або інтенсивних опадів, коли сонячна генерація обмежена.

Третім варіантом є збалансований підхід, який ураховує ризик втрати ефективності через недостачу сонячної енергії та забезпечує її максимальне використання. Це налаштування включає в себе використання SUB та OSO. В такому режимі сонячна енергія буде споживатися для живлення ваших пристроїв, а акумуляторна батарея буде заряджатися лише за потреби. При цьому, акумулятор також буде заряджатися від сонячної енергії, якщо це можливо. Коли настає ніч та сонячні панелі припиняють генерувати енергію, інвертор автоматично переходить на живлення від електромережі. На цей момент батарея буде близькою до повного заряду, за винятком випадків довготривалих похмурих днів. З більш консервативним підходом, можна використовувати CSO для зарядки акумулятора, коли сонячна енергія недоступна, що забезпечить повний заряд акумуляторної батареї перед ніччю.

У процесі дослідження системи моніторингу виявлено декілька недоліків. Зокрема, через крок моніторингу у 5 хвилин, система не може реєструвати короткотривалі піки споживання електроенергії, такі як раптове включення потужного

електричного обладнання (наприклад, насоса для закачування води). Якщо система моніторингу сонячної енергії не фіксує короткочасні піки споживання, це може призвести до неправильного управління переходом на акумуляторне живлення, особливо в ситуаціях, коли насуваються хмари і зменшується вироблення сонячної енергії. Як наслідок, акумулятори можуть перевантажуватися, використовуючись частіше або інтенсивніше, ніж це необхідно. Це може призвести до глибокого розряду акумуляторів, що негативно впливає на їхній термін служби та загальну ефективність системи, оскільки постійний глибокий розряд може знизити їхню здатність зберігати заряд і скорочувати тривалість їхнього експлуатаційного циклу.

Одним із основних недоліків усіх сучасних систем моніторингу сонячної енергії є їх нездатність вимірювати та реєструвати сонячну енергію, яка не використовується безпосередньо для живлення пристроїв або зарядки акумуляторів, особливо в умовах відсутності навантаження. Через цей недолік, системи моніторингу можуть недооцінювати загальну кількість енергії, яку можуть виробляти сонячні панелі. Це може вплинути на планування та ефективність використання сонячної енергії.

Іншим важливим недоліком є відсутність механізму автоматичного керування навантаженням побутових пристроїв у Smart ESS, що призводить до збільшення споживання енергії та витрат, особливо у періоди нестабільного виробництва сонячної енергії. Це підкреслює необхідність розробки більш гнучких та інтелектуальних систем управління енергоспоживанням, які б могли інтегруватися з розумними пристроями дому IoT для автоматизації та оптимізації використання енергоресурсів в режимі реального часу.

З цієї причини пропонується рішення, яке полягає у використанні відомої системи Smart Life для управління розумним будинком [17], що використовує технологію IoT. Ця система охоплює широкий спектр розумних пристроїв, включаючи системи освітлення, опалення та охолодження, розумні розетки, камери безпеки, датчики та інші побутові прилади, якими можна легко керувати через єдиний інтерфейс. Завдяки використанню безпроводних технологій та IoT пристроїв, Smart Life дозволяє об'єднати ці пристрої в єдину екосистему. Користувачі можуть дистанційно керувати цими пристроями через мобільний додаток, налаштовувати автоматичні сценарії для підвищення комфорту, енергоефективності та безпеки.

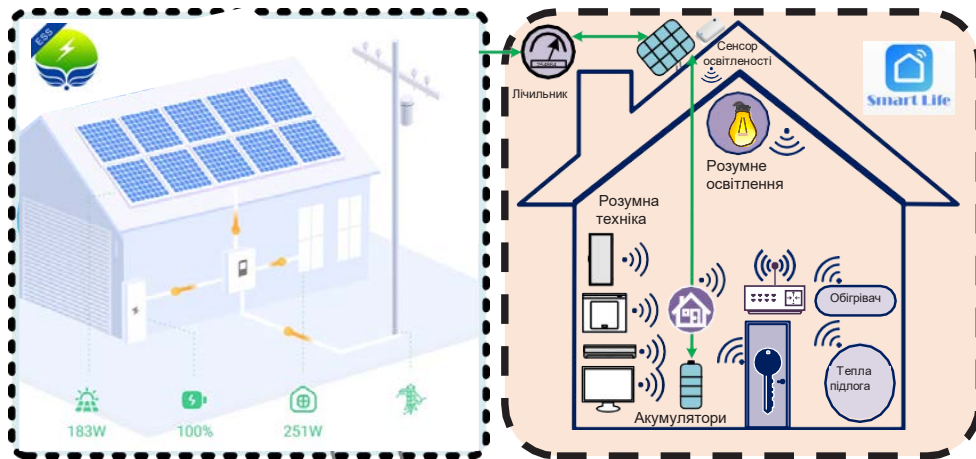


Рис. 4. Схема адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах

Можна налаштувати розумні сценарії: при зміні погодних умов (температура, вологість, погода, схід/захід сонця, швидкість вітру), при зміні місцезнаходження (вихід з локації, вхід в локацію), таймер (налаштування увімкнення/вимкнення за часом та днями тижня), при зміні стану пристрою (наприклад, при виявленні руху датчиком, увімкнення одного або декількох пристроїв в системі).

У роботі запропоновано схему на рис. 4, що відображає синергію між системами Smart Life та Smart ESS, призначену для покращення використання сонячної енергії. Для реалізації запропонованої схеми розроблено метод адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах. Цей метод використовує сенсор освітленості для оптимізації використання сонячної енергії в реальному часі. Система автоматично регулює навантаження шляхом включення та вимкнення розумних пристроїв в залежності від рівня освітленості і вимог споживачів, забезпечуючи оптимальне використання доступної сонячної енергії. Цей підхід дозволяє зменшити витрати на електроенергію і сприяє створенню більш стабільних і ефективних гібридних електромереж.

Розглянемо детально принцип роботи запропонованого методу адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах. На рис. 5 показано інтерфейс мобільного застосунку Smart Life, який демонструє список IoT-пристроїв, підключених до розумного будинку. У списку представлені різні пристрої, якими можна віддалено керувати через додаток,

такі як датчик газу, система теплої підлоги, керамічні обігрівачі, датчик освітленості, розумні продовжувачі, а також розумні розетки та чайник.

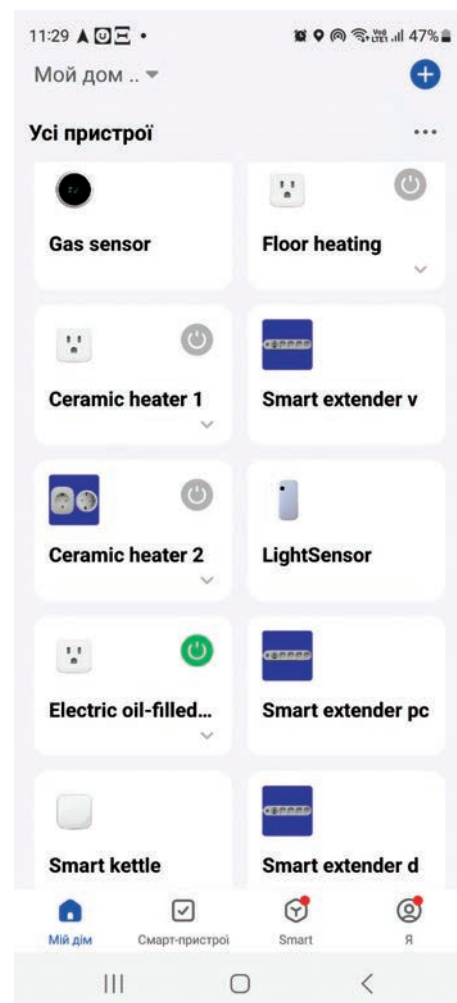


Рис. 5. Інтерфейс мобільного додатку Smart Life для віддаленого управління розумними IoT пристроями

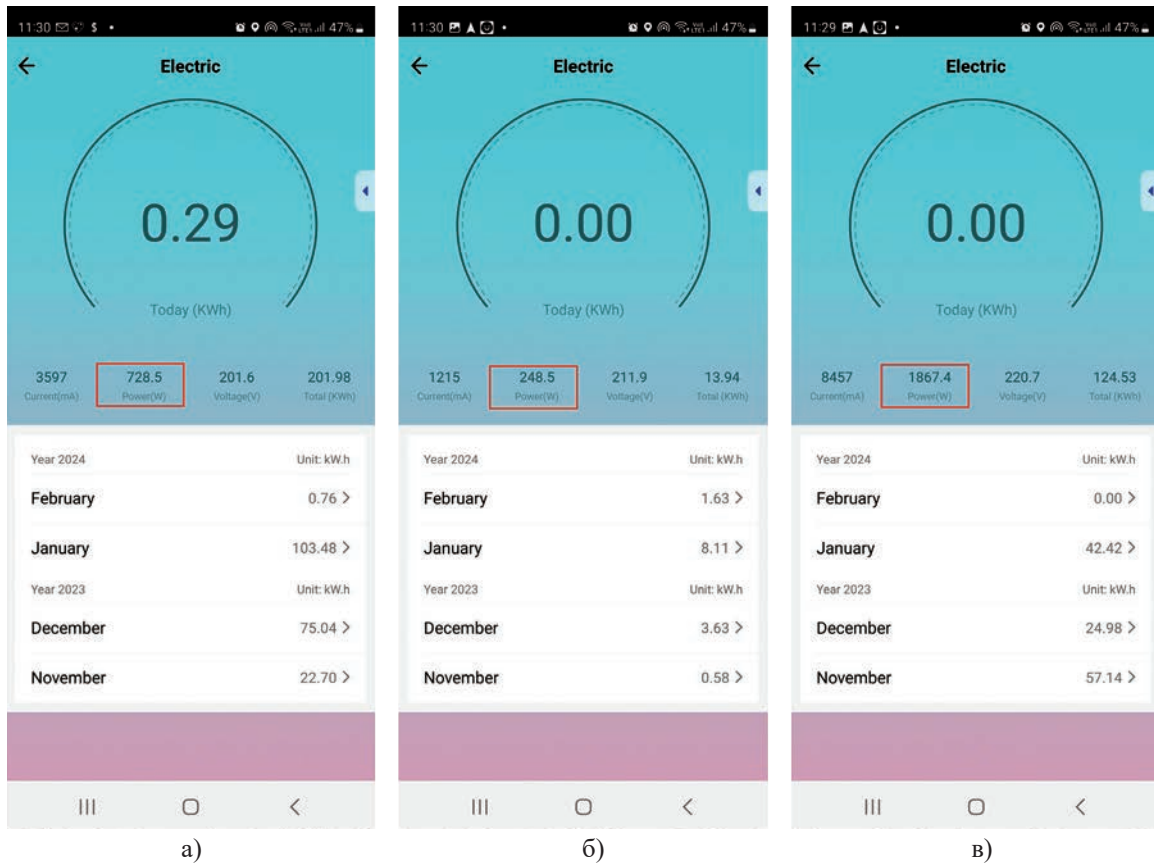


Рис. 6. Енергоспоживання пристроїв

На першому етапі методу використовувались розумні розетки з функцією енергомоніторингу для вимірювання потужності, яку споживають побутові пристрої. Завдяки цьому виявлено, що система теплої підлоги споживає 728 Вт (рис. 6а), керамічний обігрівач споживає 248 Вт (рис. 6б), а електричний масляний обігрівач – 1876 Вт (рис. 6в). На другому етапі методу було встановлено Wi-Fi сенсор освітленості біля сонячних панелей, що забезпечило можливість точного відстеження рівня освітленості в реальному часі з інтервалом вимірювань щосекунди, деталі чого представлено на рис. 7 (інтервал вимірювання кожної секунди рис. 7а, та протягом доби рис. 7б). Важливо забезпечити синхронізацію часу між записами даних з датчиків освітленості та системи моніторингу SmartESS виробленої сонячної енергії, щоб дані відповідали один одному за часом.

Для аналізу було використано зібрані дані, у ході чого були порівняні рівні освітленості та відповідні показники виробленої енергії. Застосування статистичних методів та візуалізація даних допомогли детально проаналізувати та виявити зв'язок між цими параметрами, надаючи цінну інформацію для ефективного використання сонячної енергії. На основі аналізу, розроблено

графічну модель, яка може точно прогнозувати вироблення енергії на основі виміряного рівня освітленості (рис. 8).

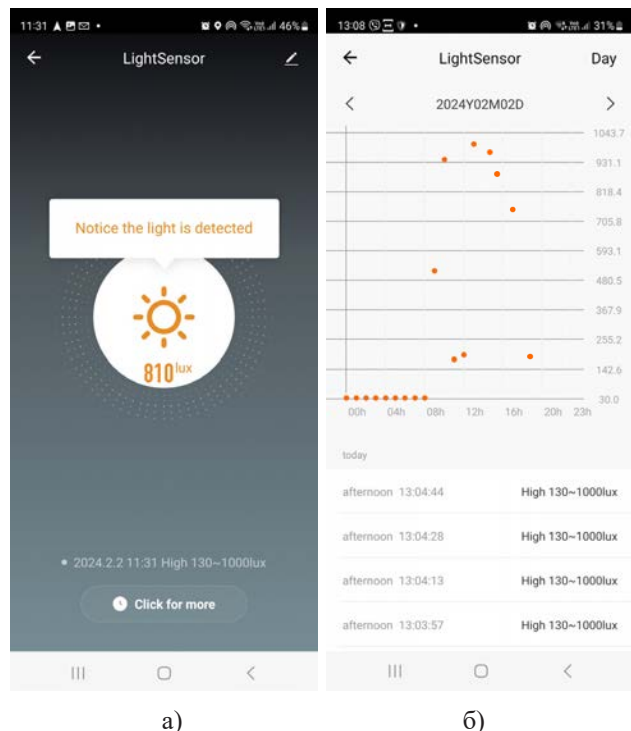


Рис. 7. Моніторинг рівня освітленості

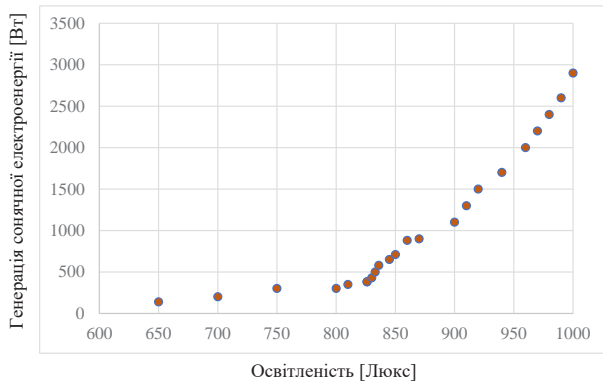


Рис. 8. Залежність генерації сонячної енергії від рівня освітленості

У наступному етапі методу, використовуючи систему Smart Life, яка об'єднує розумні розетки та інші IoT-пристрої, було розроблено автоматизований сценарій для вмикання та вимикання побутових приладів залежно від наявності сонячної енергії. Це підвищило ефективність та зручність у порівнянні з традиційними системами, що вимагають ручного управління. Основою для цього сценарію став датчик освітленості, який вимірює рівень світла в люксах. Це дало змогу точно оцінити кількість згенерованої сонячної енергії за певного числового значення в люксах.

Зокрема коли освітленість досягає рівня, достатнього для генерації необхідної кількості енергії для цих пристроїв (більше 750 люкс для керамічного підігрівача та більше 900 люкс для підігріву теплої підлоги), то створено сценарій автоматичного включення. Якщо датчик освітленості фіксує низький рівень світла (менше 750 люкс та менше 900 люкс), активується сценарій вимкнення певних

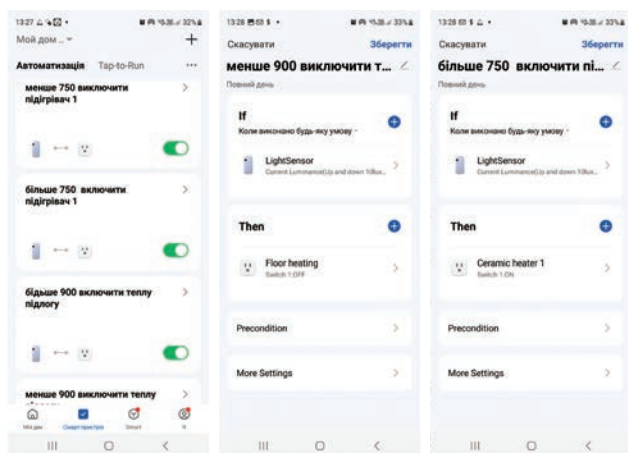


Рис. 9. Сценарій вмикання та вимикання теплої підлоги та керамічного обігрівача в залежності від рівня освітленості в системі Smart life

приладів, таких як система теплої підлоги, щоб скоротити споживання енергії у відповідь на зменшення генерації сонячної енергії (рис. 9).

Ефективність реалізації запропонованого методу адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій показано на рис. 10.

Рис. 10а відображає ситуацію без впровадження методу адаптивного управління навантаженням, де споживання енергії не зменшується у відповідь на зниження генерації сонячної енергії через похмурість. Тобто автоматичне вимкнення підігріву підлоги та керамічної батареї не відбулося. Це призвело до необхідності використання загальної електромережі та відповідно додаткових енергетичних витрат.

На рис. 10б та рис. 10в представлено дні, коли був використаний метод адаптивного управління навантаженням з використанням вище запропонованих сценаріїв автоматизації включенням IoT пристроїв. Коли вироблення сонячної енергії (червона крива) зменшується через похмурість, споживання енергії (зелена крива) автоматично знижується, що свідчить про адаптацію системи до змін в освітленості. Тобто відбувається автоматичне вимкнення/включення підігріву підлоги та керамічної батареї в залежності від освітленості. Це дозволяє забезпечити максимальне використання сонячної енергії та зниження навантаження на електромережу, що веде до економії витрат.

Ефективність використання сонячної енергії візуально відображається через перекриття червоної кривої (генерація сонячної енергії) над зеленою (споживання енергії). Чим більша площа під червоною кривою покриває зелену криву, тим ефективніше система використовує сонячну енергію. Водночас, будь-яка частина зеленої кривої, що виходить за межі червоної, вказує на використання додаткової енергії з загальної електромережі, що призводить до збільшення витрат.

Таким чином, на рис. 10б та рис. 10в, де застосовувався метод адаптивного управління навантаженням, візуально видно, що зелена крива рідше виходить за межі червоної, що свідчить про зменшення споживання енергії з мережі та зниження витрат у періоди зниженої генерації сонячної енергії. Це підкреслює переваги запропонованого методу, який дозволяє не лише зменшити витрати, а й покращити ефективність використання сонячної енергії.

Висновки. У роботі досліджено систему моніторингу та управління SmartESS, яка використовується в гібридних сонячних електростанціях. Визначено її функціональні можливості та сформовано рекомендації для ефективного управління.

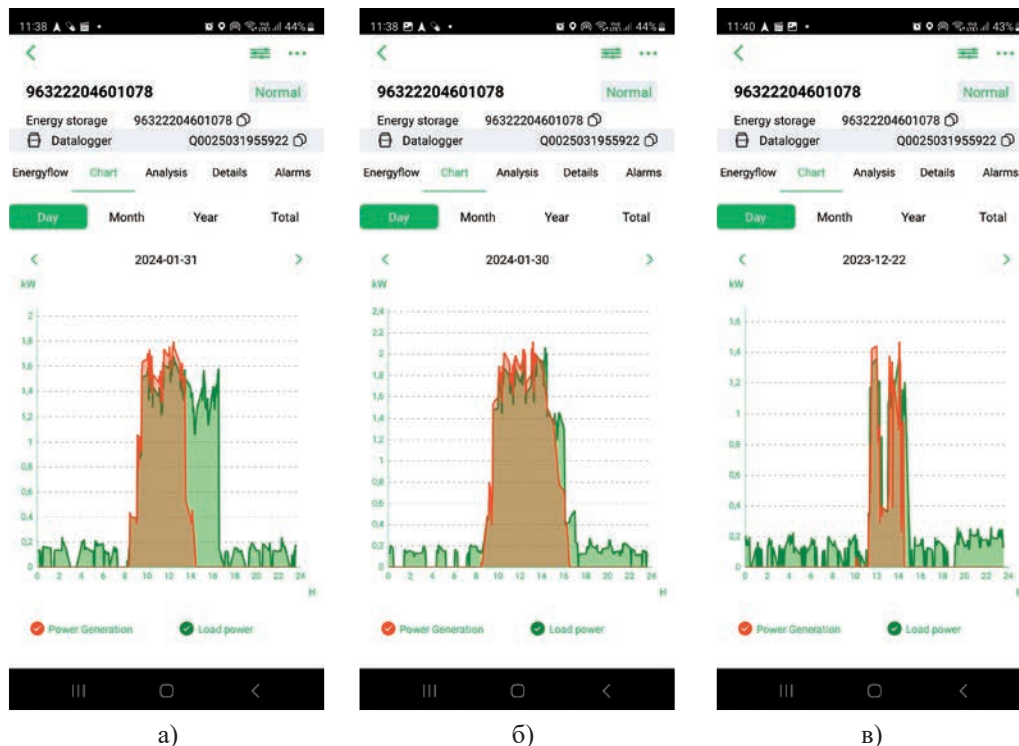


Рис. 10. Оцінка ефективності розробленого методу адаптивного управління навантаженням в гібридних електромережах

Виявлено недоліки існуючих систем віддаленого моніторингу та управління, які обмежують їх адаптацію до погодних умов та інтеграцію з системами «розумного будинку» для автоматичного керування навантаженням побутових пристроїв. У роботі використано систему управління розумним будинком Smart Life як рішення для покращення енергоменеджменту. Розроблено і реалізовано метод адаптивного управління навантаженням, який базується на застосуванні

IoT-технологій для оптимізації використання сонячної енергії в гібридних електромережах. Завдяки використанню сенсорів освітленості, система здатна динамічно регулювати навантаження, автоматично управляючи розумними пристроями в залежності від поточних умов світла та енергетичних потреб. Такий підхід дозволяє системам ефективно використовувати сонячну енергію в умовах змінної освітленості, зменшуючи залежність від електромережі.

Список літератури:

1. Joseph A., Balachandra P. Smart Grid to Energy Internet: A Systematic Review of Transitioning Electricity Systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 215787–215805. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3041031>.
2. Kabeyi M. J. B., Olanrewaju O. A. Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: a review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 685–758. URL: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>
3. Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review / Z. Chen et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 4. P. 2118. URL: <https://doi.org/10.3390/s23042118>
4. Ali M. I. IoT based smart solar PV monitoring system; A Cost Effective and reliable solution. *Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 8–14. URL: <https://doi.org/10.30537/sjcms.v6i2.1160>
5. V. K. V and Sasikala G. Arduino based smart solar photovoltaic remote monitoring system. *Malaysian Journal of Science*. 2022. Vol. 41, no. 3. P. 58–62. URL: <https://doi.org/10.22452/mjs.vol41no3.8>
6. Solar PV systems design and monitoring / M. Aghaei et al. *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. 2020. P. 117–145. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819610-6.00005-3>
7. Minoli D., Sohrawy K., Occhiogrosso B. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 269–283. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2647881>

8. IoT-Enabled Smart Solar Energy Management System for Enhancing Smart Grid Power Quality and Reliability / M. T. Shahed et al. *SN Computer Science*. 2023. Vol. 4, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02298-8>
9. A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management / L. Yu et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, no. 15. P. 12046–12063. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3078462>
10. Elsaraiti M., Merabet A. Solar Power Forecasting Using Deep Learning Techniques. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 31692–31698. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3160484>
11. Energy Management and Analysis for Smart Homes Using IoT / S. Oswal et al. *2019 5th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*, Pune, India, 19–21 September 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iccubea47591.2019.9128496>
12. An IoT Based Application for Monitoring Smart Grid Assimilating Tracking System / F. T. Zohora Saima et al. *2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, Arad, Romania, 20–22 May 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/globconet53749.2022.9872330>

Beshley P.I. METHOD OF ADAPTIVE LOAD CONTROL USING IOT TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT USE OF SOLAR ENERGY IN HYBRID POWER GRIDS

The paper examines the existing SmartESS remote monitoring and control system used in standalone solar power stations. Limitations of the system were identified, including inefficient energy management due to manual intervention, limited adaptation to changing weather conditions, insufficient integration with smart home systems, and lack of dynamic response to fluctuations in solar energy production. One of the main shortcomings of all current solar energy monitoring systems is their inability to measure and record solar energy that is not used directly for powering devices or charging batteries, especially in the absence of a load. Due to this shortcoming, monitoring systems can underestimate the total amount of energy that solar panels can produce. This can affect the planning and efficiency of solar energy use. To address these shortcomings, a method of adaptive load management in hybrid electric grids using IoT technologies for efficient use of solar energy has been proposed and implemented. The method is based on the use of a light sensor near the solar panels, which allowed determining the correlation model between the level of illumination and the power generation of solar energy. In the Smart Life system, load management scenarios have been created that use the correlation model for automatic response to changes in light intensity and solar energy production. The system operates in such a way that when changes in light intensity occur, it automatically makes forecasts about future solar energy production. Based on these forecasts, various load management scenarios are developed. One of the key features of this system is the use of smart sockets to control electrical appliances. In particular, smart sockets determine the level of energy consumption of the devices connected to them and can automatically turn on or off devices depending on the availability of solar energy for their power supply. For example, if a lot of solar energy is produced, the system can turn on some devices, and when there is little energy – turn them off automatically. In practical application, the developed method allowed to automatically and efficiently use solar energy for household needs, adapting to changes in weather conditions in real-time without the need for manual intervention.

Key words: *Internet of Things, hybrid power grids, smartESS system, smart life system, smart devices, solar energy.*

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/02>**Близнюкова А.Д.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Близнюков Д.В.**Науково-дослідний гірничорудний інститут
Криворізького національного університету**Новіков В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИПАДКОВОГО РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ (RED) ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІР-МЕРЕЖАХ

Перевантаження трафіку в мультисервісних ІР-мережах виникає внаслідок інтенсивного використання мережевих ресурсів при передачі різних видів даних, таких як голос, відео, текстова інформація тощо. Збільшення обсягу мультимедійного контенту та високочутливість до затримок у реальному часі створює необхідність у вивченні та впровадженні методів, спрямованих на запобігання перевантажень та забезпечення стабільності мережі. У роботі проаналізовано метод випадкового раннього виявлення (RED) для запобігання перевантажень трафіку в мультисервісних ІР-мережах. Визначено проблеми пасивного нового керування чергами. Розглянута дисципліна черги випадкового раннього виявлення та її особливості застосування. Проведено огляд існуючих варіацій дисципліни черги RED, а саме Gentle RED, Nonlinear RED, Self Configuring RED та Adaptive RED Queue Discipline. Метод випадкового раннього виявлення (RED) вибраний для подальшого дослідження за такими критеріями, як стійкість, адаптивність до змін навантаження та ефективність управління трафіком. В роботі досліджується ефективність використання механізму активного керування чергами RED в умовах перевантаження трафіку в мультисервісній ІР-мережі. При виконанні дослідження застосовується моделювання у середовищі NS2 для визначення впливу та ефективності роботи механізму RED на протидію перевантаження трафіку в мультисервісній ІР-мережі. Це дозволяє отримати конкретні дані щодо ефективності запропонованого методу в реальних умовах мультисервісної ІР-мережі. В результаті дослідження встановлено, що метод випадкового раннього виявлення (RED) виявляється оптимальним рішенням для запобігання перевантажень трафіку в мультисервісних ІР-мережах, що відображено в отриманих результатах моделювання в середовищі NS2. Це дозволяє зробити висновок про практичну застосовність та ефективність запропонованого методу у реальних умовах мультисервісних ІР-мереж.

Ключові слова: перевантаження, мультисервісна ІР-мережа, метод, черга, моделювання, випадкове раннє виявлення (RED).

Постановка проблеми. В сучасному світі, де інформаційні технології займають ключову роль у розвитку суспільства, комп'ютерні мережі є невід'ємною частиною інфраструктури, що забезпечує передачу даних на великі відстані. З появою та широким поширенням мультисервісних ІР-мереж, основний акцент у сфері телекомунікацій та інтернет-технологій ставиться на забезпеченні якості обслуговування та ефективному керуванні трафіком. Проблема перевантажень трафіку стає надзвичайно актуальною в умовах інтенсивного використання мультисервісних ІР-мереж. В останні роки загальний обсяг передачі даних

у мережах значно зріс, що призвело до навантаження на їхні ресурси. Ця проблема є особливо гострою у мультисервісних ІР-мережах, де одночасно передаються різні типи даних, такі як голос, відео, та дані. Дослідження цієї проблеми має велике значення, оскільки відповідно до сучасних вимог до телекомунікаційних мереж, важливо розробляти та вдосконалювати методи та механізми, що дозволяють уникнути перевантажень та забезпечити ефективне управління трафіком в умовах інтенсивного використання мережевих ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень і публікацій [1–7] вказує на

значущість та актуальність використання методу RED для забезпечення ефективного управління трафіком у сучасних мультисервісних IP-мережах. Огляд літературних джерел підтверджує, що зростання обсягу мультимедійного контенту та вимог до низьких затримок у реальному часі створює необхідність у вдосконаленні методів управління трафіком. Додатковий аналіз варіацій дисципліни черги RED, таких як Gentle RED, Nonlinear RED, Self Configuring RED та Adaptive RED Queue Discipline [6–9], підкреслює важливість вибору конкретної варіації в залежності від конкретних умов та вимог мережі.

Метою статті є дослідження методу випадкового раннього виявлення для запобігання перевантажень трафіку в мультисервісних IP-мережах.

Виклад основного матеріалу. Використання методу TailDrop для керування TCP трафіком призводить до ефекту, відомого як «глобальна синхронізація». Це відбувається, коли буфер маршрутизатора переповнюється, і всі пакети, що надходять, одночасно відкидаються. У відповідь до цього всі TCP передавачі зменшують розмір свого вікна одночасно, і потім одночасно його збільшують, що призводить до нового періоду високого навантаження. Крім того, ця ситуація призводить до збільшення кількості відкинутих пакетів UDP трафіку, які також проходять через той же буфер маршрутизатора [1]. Для подолання цих проблем був розроблений метод випадкового раннього виявлення перевантажень (RED), який визначає ймовірність скидання пакетів на основі середньої довжини черги. RED залишається найбільш поширеним методом у маршрутизаторах [2], хоча деякі дослідники вказують на його недоліки, оскільки він лише оцінює середню довжину черги, що може призводити до коливань миттєвої довжини черги, і використовує лінійний підхід до зміни ймовірності скидання пакетів, ігноруючи нелінійні аспекти цього процесу.

Методи RED та Adaptive RED

Метод RED [3] визначає середню довжину черги, використовуючи експоненційно згладжений ковзний середній показник α через рекурентну формулу:

$$a \leftarrow (1 - w) \cdot a_n + w \cdot q,$$

де a_n – попереднє значення середньої довжини черги, q – поточна величина черги, w – ваговий коефіцієнт, рекомендований для використання зі значенням 0,002.

У випадку, коли черга є пустою, проводиться оцінка середньої величини черги α у відсутність пакетів за формулою:

$$a \leftarrow a_n \cdot (1 - w)^m,$$

де m – ймовірна кількість пакетів, що надійшли в чергу. Без цього припущення, оцінка значення α буде некоректною. У випадку, коли пакет надходить в той момент, коли черга є порожньою, значення α розраховується за допомогою такої формули:

$$m = \frac{t - t_0}{s},$$

де t – представляє собою поточний час, а t_0 – це момент часу, коли черга стала порожньою, s – представляє собою середній розмір пакета.

Ймовірність маркування або відкидання пакетів систематично змінюється у межах від 0 до max_p за наступною математичною залежністю:

$$P_{drop} = \frac{max_p (\alpha - min_{th})}{(max_{th} - min_{th})},$$

де min_{th} – вказує на найнижчий рівень середнього значення черги, нижче якого не відбувається відкидання, max_{th} – вказує на найвищий рівень середнього значення черги, після якого усі пакети скидаються.

Фактична ймовірність відкидання пакетів P_a розраховується на підставі лічильника пакетів, які надійшли після останнього відкидання:

$$P_a = \frac{P_{drop}}{(1 - n \cdot P_{drop})},$$

де n – кількість пакетів, які надійшли до черги після останнього відкидання.

Сучасні маршрутизатори використовують модифікацію RED (Random Early Detection) під назвою WRED (Weighted RED) [4]. Ця модифікація дозволяє враховувати різні пріоритети пакетів та підтримувати архітектуру диференційованого обслуговування DiffServ [5]. Досліджено вплив параметрів конфігурації RED, таких як ваговий коефіцієнт (w), максимальна ймовірність скидання (max_p), пороги виникнення осциляцій довжини черги та параметри якості обслуговування. Вибір відповідних параметрів RED є складним завданням, і одним із недоліків методу є висока залежність поведінки алгоритму від встановлених значень цих параметрів. Для розв'язання цієї проблеми було запропоновано механізм Adaptive RED [6, 7], який дозволяє динамічно змінювати значення параметрів, включаючи max_p , залежно від завантаження черги, а також автоматично розраховувати значення max_{th} і вагового коефіцієнта згладжування w за формулою:

$$w = 1 - e^{\frac{1}{C}},$$

де C – це швидкість каналу, що вимірюється в пакетах на секунду.

Для динамічного контролю параметра max_{th} використовують адитивний коефіцієнт α , який обчислюється $\alpha = \min(0.01, max_p/4)$ і мультиплікативний коефіцієнт β , що дорівнює 0.9. Періодично, зазначений інтервал виміру значення середньої довжини черги α порівнюється з певним пороговим рівнем l :

$$l = [\min_{th} + 0.4 \cdot (max_{th} - \min_{th}), \min_{th} + 0.6 \cdot (max_{th} - \min_{th})],$$

при виконанні умови:

$(\alpha > l)$ and $(max_p \leq 0.5)$, де α – це середнє значення.

Тоді max_p буде збільшуватися за такою формулою:

$$max_p \leftarrow max_p + a,$$

де α – це адитивний коефіцієнт.

У випадку, якщо

$(\alpha < l)$ and $(max_p \geq 0.01)$,

тоді max_p буде зменшуватися за такою формулою:

$$max_p \leftarrow max_p \cdot \beta.$$

Отже, характеристики методу RED автоматично змінюються відповідно до обсягу та інтенсивності трафіку.

Типи дисциплін RED Queue

Алгоритм випадкового раннього виявлення (RED) є методом керування чергою у мережевому планувальнику, спрямованим на запобігання перевантаженням.

Існують різні варіації дисципліни черги RED, включаючи наступні [8]:

- Gentle RED;
- Nonlinear RED;
- Self Configuring RED;
- Adaptive RED Queue Discipline.

Gentle RED

Алгоритм випадкового раннього виявлення збільшує шанси на скидання пакетів з 0,05 до 0,50, коли середня довжина черги зростає лінійно від мінімального порогового значення до максимального порогового значення [9]. Проте, коли середня довжина черги незначно перевищує максимальний поріг, ймовірність скидання пакета раптово зростає з 0,50 до 1. Ця зміна не є плавною. Алгоритм gentle RED використовується для плавного регулювання цього раптового переходу. Ця динаміка призводить до інтенсивного відкидання пакетів, тобто, коли середня довжина черги перевищує максимальну, ймовірність відкидання різко зростає до 1. Gentle RED намагається згладити цю криву з кутом, подібним до початкового RED, коли середня довжина черги знаходиться в діапазоні від max_{th} до подвоєного max_{th} .

Nonlinear RED і Self Configuring RED

Замість збільшення P_d лінійно, може бути ефективніше, якщо P_d збільшується повільно,

коли він наближається до \min_{th} , і різко зростає, коли він наближається до max_{th} . Якщо ймовірність відкидання збільшується лінійно між мінімальним і максимальним порогоми, існує значна ймовірність, що вхідний пакет може бути відкинутий, навіть якщо середній розмір черги невеликий [8]. Тому для досягнення високої ймовірності відкидання пакета, коли середня довжина черги наближається до максимального порогу, було розроблено квадратне рівняння для розрахунку ймовірності відкидання, коли середній розмір черги перевищує мінімальний поріг, але залишається меншим за максимальний поріг.

Робота Nonlinear RED:

$$\Rightarrow P_d = 0, \text{ when newavg} \leq \min_{th}$$

$$\Rightarrow P_d = 1, \text{ when newavg} < \max_{th}$$

$$\Rightarrow P_d = (max'_p)^2 * [(newavg - \min_{th}) / (\max_{th} - \min_{th})]$$

де $max'_p = 1.5 * max_p = 0.75$

Робота Self Configuring RED:

Self Configuring RED адаптує max_p , як показано в кодї нижче: При кожному оновленні «newavg»:

if $(\min_{th} < newavg < \max_{th})$

status = between;

else if $(newavg < \min_{th} \ \&\& \ status \ != \ below)$

status = below;

$max_p = max_p \div ?$

else if $(newavg > \max_{th} \ \&\& \ status \ != \ above)$

status = above;

$max_p = max_p \cdot x ?$

Дисципліна Adaptive RED Queue

Мета Adaptive RED схожа на ту, що і у Self-configuring RED. Self-configuring RED старається підтримувати середній розмір черги в межах мінімальних і максимальних порогових значень. Крім того, Adaptive RED вилучає необхідність ручного втручання та автоматично налаштовує параметри. Максимальна ймовірність відкидання адаптується в залежності від доступності мережі, і більше не вимагає ручних налаштувань, як у попередніх версіях RED.

Основні внески в Adaptive RED [8]:

- автоматичне встановлення нижнього порогу (\min_{th}) проводиться на підставі пропускної здатності каналу (C) та бажаної затримки в черзі;
- автоматичне визначення верхнього порогу (\max_{th}) залежить від встановленого значення \min_{th} ;
- саморегулювання параметру w_q автоматично відповідає пропускній здатності каналу;
- адаптивне налаштування максимальної ймовірності відкидання (max_p) змінюється відповідно до поточної середньої довжини черги.

Перейдемо до дослідження ефективності роботи RED для запобігання перевантажень

трафіку в модельованій мережі та проаналізовано залежність роботи RED від параметрів налаштування мережі.

У роботі досліджується використання механізму RED для запобігання перевантаження трафіку шляхом моделювання в середовищі NS2.

Для вирішення поставлених завдань дослідження використовується середовище NS2. Щоб змодельовати ділянку мережі потрібно створити сценарій моделювання, для написання якого використовується tcl-скрипт [10]. Але спочатку потрібно визначити топологію модельованої ділянки мультисервісної IP-мережі.

Топологія імітаційної моделі мережі має відповідати таким вимогам:

- необхідність забезпечити, щоб протоколи TCP були наявні для відправників і одержувачів трафіку;
- пропускна здатність каналів зв'язку має бути використана на максимум;
- потрібно створити проблемну ділянку, для того щоб штучно створювати перевантаження;
- можливість зміни дисциплін обслуговування черги має бути наявною для проміжних маршрутизаторів;
- одиничність наявного маршруту, який здійснюється від відправників до одержувачів.

Було створено топологію мережі, яка має відповідати наведеним вище вимогам, вона наведена на рисунку 1.

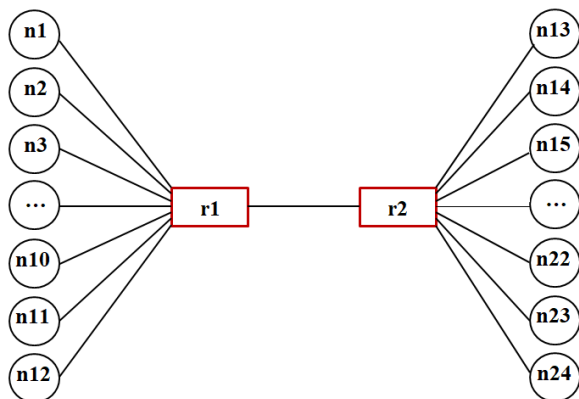


Рис. 1. Створена топологія мережі

На рисунку 1 можна побачити, що n1 – n12 – представляють собою відправників даних, а n13 – n24 – представляють собою одержувачів даних. Проміжними маршрутизаторами на рисунку зображені r1 і r2. Лінії зв'язку між відправниками та маршрутизатором мають пропускну здатність 5 Гб/с, в якості як фізичного, так і каналного рівнів стека протоколів.

Для передачі повідомлень одержувачу використовується транспортний протокол TCP із реалізаціями Reno та Vegas, над яким функціонує протокол прикладного рівня FTP, що спрямований на використання наявної пропускної здатності максимально можливою мірою.

Маршрутизатор виконує функцію маршрутизації для отримуваних пакетів та передає їх по лінії зв'язку до одержувача. Лінія зв'язку, в свою чергу, має обмежену пропускну здатність в 0.5 Гб/с. Ця пропускна здатність значно нижча за загальну пропускну здатність каналів, які з'єднують маршрутизатор із відправниками. Змінюючи значення смуги пропускання, моделюється різна пропускна здатність маршрутизатора, а також різна частота відкидання пакетів.

Важливо зазначити, що під час моделювання в середовищі NS2 питання, які стосуються фізичної реалізації передачі даних по лінії зв'язку, можуть враховуватись лише обмежено, тобто можна встановити лише пропускну здатність та затримку. Це забезпечує незалежність функціонування протоколів, що мають більш високий рівень. Саме через це детальний аналіз організації цього рівня не доцільно розглядати в даній роботі. Маршрутизатор використовує реалізовані в середовищі NS2 механізми обслуговування черги, такі як алгоритми RED.

Після встановлення топології мультисервісної мережі, необхідно розробити відповідний сценарій. Зважаючи на унікальні характеристики побудованої топології та поставлені завдання для дослідження, використовуються такі ключові параметри для сценарію, як:

- пропускна здатність ліній зв'язку між маршрутизатором та відправниками/одержувачами даних складає 5 Гб/с;
- затримка в лініях зв'язку між маршрутизатором та відправниками/одержувачами дорівнює 3 мілісекундам;
- максимальна довжина черги маршрутизатора буде змінюватися від 50 до 500 сегментів;
- протокол передачі даних TCP використовує реалізацію «Reno» або «Vegas»;
- розмір сегменту даних становить 1500 байт;
- для обслуговування черги маршрутизатора використовується алгоритм «RED» (зі стандартними параметрами, які визначені в скрипті «ns-default.tcl»);
- загальний час моделювання складає 240 секунд;
- початок передачі даних відправниками розпочинається від 0 до 220 секунд для першого та дванадцятого відправників, відповідно;

– основним навантаженням у мережі є потоки даних за допомогою протоколу FTP, який передає файли нескінченної довжини.

З самого початку створюється файл для сценарію моделювання «simulation.tcl». Відповідно до особливостей роботи з середовищем NS2, а саме створення сценаріїв моделювання, вміст файлу «simulation.tcl» сформований на мові Tcl.

Далі створюється новий об'єкт моделювання, використовуючи команду «set ns [new Simulator]». Також визначається процедура «finish». Вона виконує дії, що необхідні при завершенні моделювання, включаючи закриття файлів з даними, очищення буфера трасування та виклик програми «xgraph», яка буде використовуватись саме для побудови графіків отриманих значень. Текст процедури «finish» наведено на рисунку 2.

```

130 # Define 'finish' procedure (include post-simulation processes)
131 proc finish {} {
132     global tchan
133     set awkCode {
134         {
135             if ($1 == "q" && NF>2) {
136                 print $2, $3 >> "temp.q";
137                 set end $2
138             }
139             else if ($1 == "a" && NF>2)
140                 print $2, $3 >> "temp.a";
141         }
142     }
143     set f [open temp.queue w]
144     puts SF "Titletext: red"
145     puts SF "Device: Postscript"
146
147     if [ [info exists tchan_] ] {
148         close $tchan_
149     }
150     exec rn -f temp.q temp.a
151     exec touch temp.a temp.q
152
153     exec awk $awkCode all.q
154
155     puts SF "\nqueue"
156     exec cat temp.q >& SF
157     puts SF "\n\ave_queue"
158     exec cat temp.a >& SF
159     close SF
160     exec /home/nastya/Desktop/ns2/xgraph_4.38_linux64/XGraph4.38_linux64/bin/xgraph -bb -tk
161     time -y queue temp.queue &
162     exit 0
163 }

```

Рис. 2. Текст кінцевої процедури «finish»

Розглянемо опис топології мережі, що задається для дослідження. У запропонованій моделі мережі запрограмовані 24 вузли, з яких n1 – n12 це відправники даних, n13 – n24 це одержувачі даних. Також створюється ще два вузли r1 та r2, вони є маршрутизаторами. Створення та опис ліній зв'язку між вузлами наведено на рисунку 3 та 4 відповідно.

```

4 set node_(s1) [$ns node]
5 set node_(s2) [$ns node]
6 set node_(r1) [$ns node]
7 set node_(r2) [$ns node]

```

Рис. 3. Створення вузлів топології

```

31 $ns duplex-link $node_(s1) $node_(r1) 5Gb 3ms DropTail
32 $ns duplex-link $node_(s2) $node_(r1) 5Gb 3ms DropTail

```

Рис. 4. Опис ліній зв'язку

На рис. 5 показано конфігурацію максимальної довжини черги маршрутизатора.

```

57 $ns duplex-link $node_(r1) $node_(r2) 0.5Gb 6ms RED
58
59 #Set Queue Size of link (r1-r2) to 500
60 $ns queue-limit $node_(r1) $node_(r2) 500
61 $ns queue-limit $node_(r2) $node_(r1) 500

```

Рис. 5. Завдання максимальної довжини черги маршрутизатора

Необхідне створення та налаштування 12 з'єднань протоколом TCP. Для досягнення цієї мети визначаються агенти та адресати трафіку TCP, які зв'язуються з необхідними для них вузлами. Встановлюється з'єднання між агентами та адресатами, та задається максимальний розмір для плаваючого вікна протоколу TCP. Відповідні конфігурації зображені на рисунку 6.

```

65 set tcp1 [$ns create-connection TCP/Vegas $node_(s1) TCPSink $node_(s13) 0]
66 $tcp1 set window_ 1500
67 set tcp2 [$ns create-connection TCP/Reno $node_(s2) TCPSink $node_(s14) 1]
68 $tcp2 set window_ 1500

```

Рис. 6. З'єднання TCP

Для генерації надісланих даних через протокол транспортного рівня TCP поверх нього використовується протокол прикладного рівня FTP. Процедура створення агентів FTP та їх зв'язок з наявними з'єднаннями TCP наведена на рисунку 7.

```

91 set ftp1 [$tcp1 attach-source FTP]
92 set ftp2 [$tcp2 attach-source FTP]

```

Рис. 7. Створення агентів FTP

Конфігурація з'єднань між двома маршрутизаторами, що трасують чергу наведена на рисунку 8.

```

105 # Tracing a queue
106 set redq [[$ns link $node_(r1) $node_(r2)] queue]
107 set tchan_ [open all.q w]
108 $redq trace curq_
109 $redq trace ave_
110 $redq attach $tchan_
111

```

Рис. 8. Створення з'єднання між маршрутизаторами r1 та r2

Розглянемо розроблення розкладу моделювання, який автоматизує запуск необхідних процедур у визначений момент часу. Відповідні операції наведені на рисунку 9.

```

113 #Schedule events for the FTP agents
114 $ns at 0 "$ftp1 start"
115 $ns at 20 "$ftp2 start"
116 $ns at 40 "$ftp3 start"
117 $ns at 60 "$ftp4 start"
118 $ns at 80 "$ftp5 start"
119 $ns at 100 "$ftp6 start"
120 $ns at 120 "$ftp7 start"
121 $ns at 140 "$ftp8 start"
122 $ns at 160 "$ftp9 start"
123 $ns at 180 "$ftp10 start"
124 $ns at 200 "$ftp11 start"
125 $ns at 220 "$ftp12 start"
126 $ns at 240 "finish"

```

Рис. 9. Розклад моделювання

Процедура безпосереднього запуску моделювання виконується за допомогою команди «\$ ns run».

Створений та описаний попередньо сценарій запускається для моделювання в середовищі NS2, використовуючи командний рядок. Запуск виконується за допомогою команди «ns simulation.tcl». При запуску середовище NS2 запускає інтерпретатор мови Tcl, а він, в свою чергу, виконує по черзі кожен рядок скрипту, а також перевіряє скрипт на коректність та наявність синтаксичних помилок.

Для детального дослідження роботи механізму RED було п'ять разів модифіковано вихідний код створеного сценарію. А саме змінювались значення розміру черги, кількість джерел протоколу TCP, розмір смуги пропускання ліній зв'язку маршрутизатора з одержувачем, пропускна здатність ділянки, що є проблемною та час моделювання.

У наступних графіках показані результати моделювання для використовуваного механізму при різних варіантах роботи алгоритму RED. Головним параметром виконаного моделювання є розмір черги маршрутизаторів «queue».

Результати моделювання при першій модифікації параметрів наведені на рисунку 10. Розмір черги становить 500 сегментів, використовуються шість джерел протоколу TCP, три з яких використовують реалізацію TCP Vegas, а інші три – TCP Reno. Розмір смуги пропускання лінії зв'язку маршрутизатора з одержувачем становить 5 Гб/с, а RED є механізмом обслуговування черги маршрутизатора. Пропускна здатність проблемної ділянки становить 0.5 Гб/с.

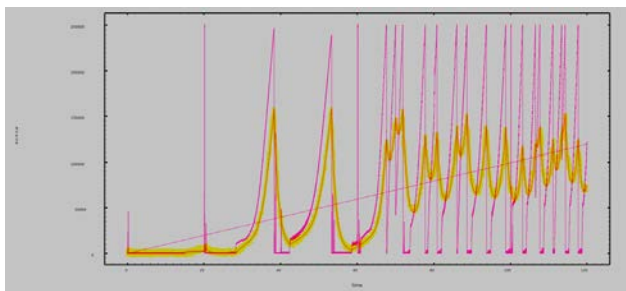


Рис. 10. Залежність довжини черги від часу при першій модифікації параметрів

Результати моделювання при другій модифікації параметрів наведені на рисунку 11. Розмір черги становить 250 сегментів, використовуються шість джерел протоколу TCP, три з яких використовують реалізацію TCP Vegas, а інші три – TCP Reno. Розмір смуги пропускання лінії зв'язку маршрутизатора з одержувачем становить 5 Гб/с, а RED є механізмом обслуговування черги маршрутизатора. Пропускна здатність проблемної ділянки становить 0.5 Гб/с.

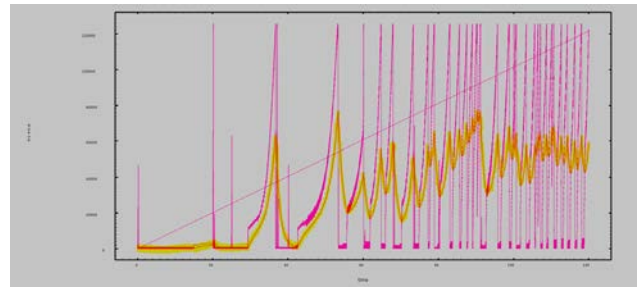


Рис. 11. Залежність довжини черги від часу при другій модифікації параметрів

Результати моделювання при третій модифікації параметрів наведені на рисунку 12. Розмір черги становить 100 сегментів, використовуються шість джерел протоколу TCP, три з яких використовують реалізацію TCP Vegas, а інші три – TCP Reno. Розмір смуги пропускання лінії зв'язку маршрутизатора з одержувачем становить 0.5 Гб/с, а RED є механізмом обслуговування черги маршрутизатора. Пропускна здатність проблемної ділянки становить 0.1 Гб/с.

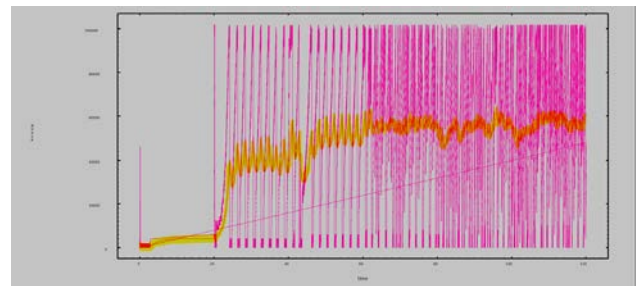


Рис. 12. Залежність довжини черги від часу при третій модифікації параметрів

Результати моделювання при четвертій модифікації параметрів наведені на рисунку 13. Розмір черги становить 50 сегментів, використовуються шість джерел протоколу TCP, три з яких використовують реалізацію TCP Vegas, а інші три – TCP Reno. Розмір смуги пропускання лінії зв'язку маршрутизатора з одержувачем становить 0.5 Гб/с, а RED є механізмом обслуговування черги маршрутизатора. Пропускна здатність проблемної ділянки становить 0.1 Гб/с.

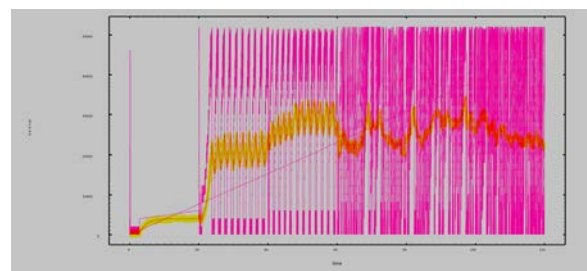


Рис. 13. Залежність довжини черги від часу при четвертій модифікації параметрів

Результати моделювання при п'ятій модифікації параметрів наведені на рисунку 14. Розмір черги становить 200 сегментів, використовуються дванадцять джерел протоколу TCP, шість з яких використовують реалізацію TCP Vegas, а інші шість – TCP Reno. Розмір смуги пропускання лінії зв'язку маршрутизатора з одержувачем становить 0.5 Гб/с із затримкою в 3мс, а RED є механізмом обслуговування черги маршрутизатора. Пропускна здатність вузького місця становить 0.1 Гб/с та має затримку в 6мс.

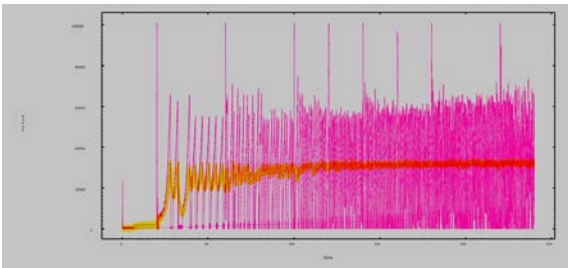


Рис. 14. Залежність довжини черги від часу при п'ятій модифікації параметрів

У випадку з розміром черги, який становив 500 сегментів та реалізацією протоколів TCP Vegas і TCP Reno, було помічено, що сплески в черзі спостерігалися при використанні протоколу TCP Vegas, і черга швидко заповнювалася. Однак, середнє значення заповнення черги залишалось на прийнятному рівні, коливаючись між 70 і 140 сегментами, що свідчить про те, що механізм RED ефективно контролює розмір черги та знижує ймовірність втрат даних. Зменшення розміру черги до 250 сегментів призвело до збільшення частоти сплесків, що може свідчити про більшу чутливість черги до змін обсягу даних. Однак, середнє значення заповнення черги залишалось на прийнятному рівні, коливаючись між 30 і 72 сегментами, показуючи, що механізм RED впорався зі змінами в умовах мережі. З розміром черги, становлячи 50 сегментів, відбувалася значна втрата даних через велику кількість випадкових відкидань пакетів. Черга в цьому випадку не була здатна витримати такий великий потік даних, і механізм RED не можна було б вважати ефективним при такому розмірі черги. У випадку з чергою розміром 200 сегментів і зміною певних параметрів мережі, черга заповнювалася лише наполовину завдяки ефективності механізму RED у врахуванні часу затримки. Цей результат показує, що правильний підбір параметрів черги і розумне використання механізму RED можуть сприяти збалансуванню навантаження в мережі та зменшенню втрат даних. У п'ятому сценарії з чергою розміром 200 сегментів і використанням дванадцяти джерел протоколу TCP Vegas і TCP Reno, відзначалася значна резервна місткість черги завдяки ефективному управлінню чергою механізмом RED. Це може свідчити про те, що правильне використання механізму RED може

допомогти збалансувати навантаження та забезпечити оптимальне використання доступної смуги пропускання.

На підставі проведеного дослідження можна рекомендувати використання методу RED у таких випадках:

- Рекомендації щодо розміру черги: RED може бути ефективним при розмірах черги, які можуть варіюватися від 200 до 500 сегментів, забезпечуючи оптимальний баланс між заповненістю черги та втратами даних.

- Чутливість до змін в мережі: RED може успішно адаптуватися до змін обсягу даних та параметрів мережі, таких як час затримки.

- Використання з різними протоколами: RED показав ефективність при використанні різних реалізацій протоколів TCP (Vegas і Reno) та змінних числах джерел даних.

Важливо також відзначити, що оптимальні параметри RED можуть варіюватися в залежності від конкретних умов мережі, тому рекомендується проводити додаткові експерименти та налаштування параметрів RED для конкретних сценаріїв та мережевих умов.

Для подальшого вдосконалення та розширення дослідження вирішення завдання перевантаження трафіку можна розглянути наступні ідеї та аспекти.

Оптимізація параметрів RED:

- Використання оптимізаційних методів або автоматизованих алгоритмів для знаходження оптимальних значень параметрів.

Дослідження впливу типів трафіку та протоколів:

- Розширення дослідження на різні типи трафіку та протоколи для оцінки ефективності RED в різних сценаріях.

Адаптація до змінних умов мережі:

- Врахування динамічних змін у мережі та розробка механізмів адаптації RED до змін обсягу даних та трафіку.

Розгляд сумісності з іншими AQM методами:

- Дослідження можливостей комбінації RED з іншими методами AQM для покращення загальної ефективності в різноманітних умовах.

Використання машинного навчання та аналізу даних:

- Застосування методів машинного навчання для прогнозування та автоматичного налаштування параметрів RED з урахуванням динаміки мережі.

Врахування цих аспектів може допомогти у подальших дослідженнях та поліпшити ефективність методу RED для запобігання перевантаження трафіку в мультисервісних IP-мережах.

Висновки. На підставі аналізу результатів дослідження можна рекомендувати використання методу Random Early Detection (RED) у таких випадках: RED може бути ефективним при розмірах

черги, від 200 до 500 сегментів, забезпечуючи оптимальний баланс між заповненістю черги та втратами даних; RED успішно адаптується до змін обсягу даних та параметрів мережі, таких як час затримки; RED демонструє ефективність при використанні різних реалізацій протоколів TCP (Vegas і Reno) та змінних числах джерел даних. З великим розміром черги та ефективним виявленням перевантажень RED допомагає уникнути деградації якості обслуговування. RED виявляється ефективним в умовах змінного обсягу трафіку, де зміни в розмірі трафіку можуть виникати швидко. Важ-

ливо зазначити, що з розміром черги 50 сегментів, відбувалася значна втрата даних через велику кількість випадкових відкидань пакетів. Черга в цьому випадку не була здатна витримати такий великий потік даних, і механізм RED не можна було б вважати ефективним при такому розмірі черги. Це відбувається через випадкове відкидання великої кількості пакетів даних, і робить майже неможливим передачу файлів, які мають великий розмір. Також через це практично неможливе проведення відеозв'язку, оскільки присутні значні затримки та великі втрати пакетів.

Список літератури:

1. Sawashima H., Hori Y., Sunahara H. Characteristics of UDP packet loss: effect of TCP traffic. *Internet Society's seventh annual conference, INET'97*. 1997. P. 6.
2. May M., Bolot J., Diot C., Lyles B. Reasons not to deploy RED. *Seventh International Workshop on Quality of service (IWQoS '99)*. 1999. P. 40–46. DOI: 10.1109/IWQOS.1999.766502.
3. Floyd S., Jacobson V. Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1993. No. 1(4), P. 397–413. DOI: 10.1109/90.251892.
4. Class-Based Weighted Fair Queueing. *Cisco.com*. URL: https://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0t/12_0t5/feature/guide/cbwfq.html (дата звернення 18.10.2023).
5. Blake S., Black D., Carlson M., Davies E., Wang Z., Weiss W. An Architecture for Differentiated Services. *RFC-2475*. 1998.
6. Floyd S., Gummadi R., Shenker S. Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management. *Rep. ICSI; Executor*. 2001. P.518-522.
7. Feng W.-C., Kandlur D., Saha D., Shin K. A Self-Configuring RED Gateway. *IEEE INFOCOM '99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now*. 1999. No. 3(99CH36320), P. 1320–1328. DOI: 10.1109/INFCOM.1999.752150.
8. Types of RED Queue Disciplines. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-red-queue-disciplines/> (дата звернення 06.11.2023).
9. Random Early Detection (RED) Queue Discipline. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/random-early-detection-red-queue-discipline/> (дата звернення 01.11.2023).
10. Harju K., Korventausta, S. Network Simulation and Protocol Implementation Using Network Simulator 2. *TTKK, Tech. Rep.* 2001. URL: <https://silو.tips/download/network-simulation-and-protocol-implementation-using-network-simulator-2> (дата звернення 07.10.2023).

Blyzniukova A.D., Blyzniukov D.V., Novikov V.I. STUDY OF RANDOM EARLY DETECTION (RED) METHOD FOR PREVENTING TRAFFIC OVERLOAD IN MULTISERVICE IP NETWORKS

Traffic congestion in multi-service IP networks occurs as a result of intensive use of network resources when transmitting various types of data, such as voice, video, text information, etc. The increase in the volume of multimedia content and high sensitivity to delays in real time creates the need to study and implement methods aimed at preventing overloads and ensuring network stability. The paper analyzes the random early detection (RED) method for preventing traffic congestion in multiservice IP networks. The problems of passive new queue management have been identified. The discipline of the random early detection queue and its application features are considered. The existing variations of RED queue discipline, namely Gentle RED, Nonlinear RED, Self-Configuring RED and Adaptive RED Queue Discipline, are reviewed. The Random Early Detection (RED) method is selected for further investigation based on criteria such as robustness, adaptability to load changes, and traffic management efficiency. The work investigates the effectiveness of using the active RED queue management mechanism in conditions of traffic congestion in a multi-service IP network. When performing the research, modeling in the NS2 environment is used to determine the impact and effectiveness of the RED mechanism on countering traffic congestion in a multi-service IP network. This makes it possible to obtain specific data on the effectiveness of the proposed method in the real conditions of a multi-service IP network. As a result of the study, it was found that the random early detection (RED) method is the optimal solution for preventing traffic congestion in multi-service IP networks, which is reflected in the obtained simulation results in the NS2 environment. This allows us to draw a conclusion about the practical applicability and effectiveness of the proposed method in the real conditions of multiservice IP-networks.

Key words: congestion, multiservice IP network, method, queueing, simulation, random early detection (RED).

УДК 621.396.96
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/03>

Бойко Ю.М.

Хмельницький національний університет

Пятін І.С.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж Національного університету «Львівська політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ LDPC КОДІВ ЗАСОБАМИ HDL В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI 6

Розгортання бездротових мереж з підтримкою Wi-Fi основна тенденція сьогодення та майбутнього. Основні вимоги до таких мереж пов'язані з підвищенням показників надійності, енергоефективності та підвищення швидкості інформаційних потоків. Стаття зосереджена на дослідженні оцінювання можливостей стандарту Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax). В цьому стандарті використовують нові методи формування сигнально-кодівих конструкцій (СКК) та коди з низькою щільністю перевірок на парність – Low-density parity-check code (LDPC), що дозволяє підвищити швидкість і завадостійкість передавання інформації. Актуальність роботи полягає у дослідженні кодів LDPC і їх реалізації на мові опису апаратури – Hardware description language (HDL). LDPC є кодами прямої корекції помилок передачі інформації, що близькі до теоретичної межі. Робота присвячена дослідженню залежностей коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з цифровою квадратурною модуляцією і кодуванням LDPC, побудові декодера LDPC за алгоритмом нормалізованої мінімальної суми (НМС) на HDL. Розглянута модель приймача цифрової системи зв'язку з кодами LDPC і Simulink-модель дослідження ефективності обробки сигналів у процесорах основної смуги частот передавача і приймача. Коди LDPC є популярними, оскільки мають дуже хорошу продуктивність і допускають нескладні апаратні реалізації. Розглянуті принципи їх кодування і декодування. Алгоритм нормалізованої мінімальної суми полягає в тому, щоб спочатку оновлювати вузли даних, потім перевіряти вузли на кожній ітерації і в кінці приймати “жорсткі” рішення декодування, які описують найбільш ймовірні кодові слова. Операція отримання мінімуму для кожного перевірконого вузла зводиться до обчислення значень першого мінімуму та другого мінімуму. В апаратній реалізації два мінімальні значення розраховуються з використанням дерева двох мінімальних компараторів. На вході декодера формуються значення логарифмічного відношення правдоподібності (ЛВП) Log-likelihood ratio (LLR), які отримані на виході демодулятора символів квадратурної амплітудної модуляції (КАМ); формуються управляючі сигнали, що визначають початок і кінець фрейму, а також логічний сигнал, що підтверджує вірність введених даних; формуються вектори індексу довжини блоку та індексу кодової швидкості.

Ключові слова: коди LDPC, мова опису апаратури HDL, модуляція, Wi-Fi, кодування.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток мобільних технологій вимагає використання завадостійких кодів, які дозволяють максимально знизити енергетичні витрати при передачі інформації із заданою ймовірністю помилок. Енергетичний вигреш кодування (ЕВК) показує, наскільки може бути знижена енергія, необхідна для передачі одного біта даних при використанні завадостійких кодів в порівнянні з передачею не кодованого потоку даних [1]. Коди низької щільності перевірок на парність (LDPC) є класом кодів прямої корекції помилок передачі, близької до теоретичної межі. Цей код може передавати повідомлення на частотах, схильних до сильного фонового шуму або шуму і який спотворює дані. Його використання істотно знижує ймовірність втрати інфор-

мації, що передається. Результатом застосування таких кодів є покращення швидкості передачі.

Враховуючи високу обчислювальну потужність, доступну сьогодні, коди LDPC були прийняті в багатьох сучасних стандартах зв'язку: IEEE 802.11, DVB-S2, кодування даних користувача в мобільному широкосмуговому зв'язку 5G [2].

Конструкція декодера LDPC залежить від пропускнуої спроможності обробки, затримки обробки, вимог до апаратних ресурсів, можливості виправлення помилок, енергоефективності обробки, ефективності використання смуги пропускання та гнучкості. Ці характеристики залежить від низки системних параметрів: архітектури, типу використаного коду LDPC, алгоритму і кількості ітерацій декодування.

Використання пристроїв з підтримкою Wi-Fi збільшується з кожним роком. Споживачам потрібно більшої швидкості, більшої надійності та більшої енергоефективності. Стандарт 802.11ac, або Wi-Fi п'ятого покоління надає кращий рівень зв'язку. Стандарт 802.11ac забезпечує гігабітну пропускну спроможність і працює в діапазоні 5 ГГц. Він використовує нові методи: формування сигнально-кодової конструкції (СКК) на боці передавача та використання кодів LDPC у приймачі.

Аналіз актуальних робіт [3–6] в предметній області статті вказує на відсутність досліджень завадостійкості кодів LDPC різної кодової швидкості, а також СКК з різною швидкістю передавання інформації. Таким чином, запропонована робота присвячена дослідженню залежностей коефіцієнту бітових помилок (BER) від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з цифровою квадратурною модуляцією і кодуванням LDPC, а також побудові декодера LDPC за алгоритмом нормалізованої мінімальної суми (НМС) засобами HDL.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо модель приймача цифрової системи зв'язку с кодами LDPC на основі концепції програмно-конфігурованого радіо SDR (Software-defined radio) [7], що приведена на рис. 1.



Рис. 1. SDR архітектура приймача: РЧП – радіочастотний приймач; АРП – автоматичне регулювання підсилення; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; КП – квадратурний перетворювач; УФПЧД – узгоджений фільтр з пониженням частоти дискретизації; ПОСЧ – процесор основної смуги частот; ПК – персональний комп'ютер

Радіочастотні сигнали перетворюються зі зниженням частоти в сигнали основної смуги частот в радіочастотному приймачі (РЧП). РЧП – це приймач прямого перетворення [1] з низьким коефіцієнтом шуму, містить малошумний підсилювач.

Блок автоматичного регулювання підсилення (АРП) [1] призначений для регулювання рівня сигналу, що приймається, і підтримки роботи приймача в межах нормального робочого діапазону з метою подолання потенційного завмирання сигналу і різкого збільшення потужності сигналів. Алгоритм АРП підвищує підсилення, якщо сигнал має слабку амплітуду, тоді як підсилення послаблюється, щоб уникнути обмеження сигналу і нелінійного погіршення, якщо сигнал має велику амплітуду. За допомогою алгоритму АРП середня пікова амплітуда динамічно регулюється до стабільного значення, необхідного для наступних модулів.

Процесор основної смуги частот складається з блоків «м'якої» демодуляції КАМ та декодування LDPC які реалізовані за допомогою інструментарію мови HDL.

Simulink-модель дослідження ефективності обробки сигналів у процесорах основної смуги частот передавача і приймача приведена на рис. 2.

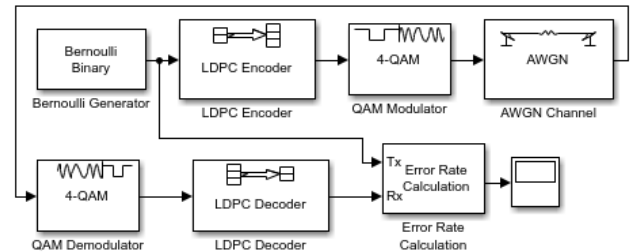


Рис. 2. Simulink модель дослідження ефективності обробки сигналів у процесорах основної смуги частот передавача і приймача: Bernoulli Binary Generator – блок який генерує випадкові двійкові числа за допомогою розподілу Бернуллі; LDPC Encoder – кодер LDPC; 4-QAM modulator – КАМ-4 модулятор; AWGN – канал зв'язку з адитивним білим Гаусівським шумом (АГБШ); 4-QAM Demodulator – КАМ-4 демодулятор; LDPC Decoder – декодер LDPC; Error Rate Calculation – підсистема Simulink для обчислення BER

Двійковий код LDPC представляє собою лінійний блоковий код, який визначається розрідженою $M \times N$ матрицею N перевірок на парність, де M представляє кількість перевірок на парність, а N представляє кількість бітів у кодовому блоці. Його можна представити дводольним графом Таннера [2, 8] з M контрольними вузлами і N змінними вузлами. Ребра з'єднують контрольний вузол m зі змінним вузлом n тоді, коли $H(m, n)$ не дорівнює нулю. Кількість одиниць у рядку називається вагою рядка, а кількість одиниць у стовпці – вагою стовпця. Код LDPC називається регулярним, якщо вага рядків та стовпців не змінюються вздовж структури матриці.

Структуровані коди LDPC є найпопулярнішими, оскільки мають дуже хорошу продуктивність і допускають нескладні апаратні реалізації. Ці коди генеруються шляхом розбиття матриці H на $M_b \times N_b$ квадратних підматриць розміром $z \times z$ з врахуванням того, що $M = M_b \cdot z$ і $N = N_b \cdot z$.

Позначимо множину (сусідніх) бітів які приймають участь у перевірці стану m , через $N_m = \{n : H(m, n) = 1\}$; а множину (сусідніх) перевірок у бітах n – через $M_n = \{m : H(m, n) = 1\}$. Нехай $N_{m \setminus n}$ позначає множину N_m з виключеним бітом n і $M_{n \setminus m}$ множину M_n з виключеною перевіркою парності m . Припустимо, що кодове слово $w = (w_1, w_2, \dots, w_N)$ передається каналом АГБШ

з нульовим середнім значенням та дисперсією σ^2 та використанням квадратурної фазової модуляції (ФМ-4). Нехай $r = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ буде відповідною прийнятою кодовою послідовністю.

На рис. 3 наведений приклад матриці H перевірки на парність і відповідний граф Таннера. Рядки матриці представлені квадратами і називаються контрольними вузлами, стовпці матриці представлені кружками і називаються вузлами даних, а одиниці представлені ребрами у графі на рис. 3 б.

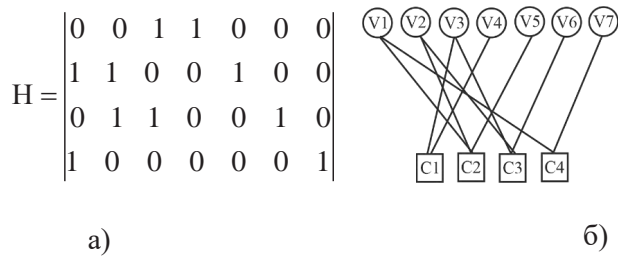


Рис. 3. Приклад матриці перевірки на парність (а) та відповідний граф Таннера (б)

Операція кодування полягає спочатку у знаходженні генераторної матриці G такої, що $G \cdot H^T = 0$. Перевірочна матриця має пройти попередню обробку перед операцією кодування. Мета цієї попередньої обробки полягає в тому, щоб представити цю матрицю у нижчій псевдо-трикутній формі, як показано на рис. 4. Така реалізація виконується перестановкою рядків або стовпців матриці. Ця матриця складається з 6 розріджених підматриць, позначених А, В, С, D, Е, та нижньої трикутної підматриці Т. О – це нульова матриця. Розмір підматриці Т дорівнює $(m - g) \times (m - g)$, причому g має мати якнайменше значення. Після завершення попередньої обробки H відбувається кодування у відповідності з рівнянням:

$$G \cdot H^T = 0^T, \quad (1)$$

Кодове слово C визначається з інформації u , що передається, наступним чином:

$$C = u \cdot G, \quad (2)$$

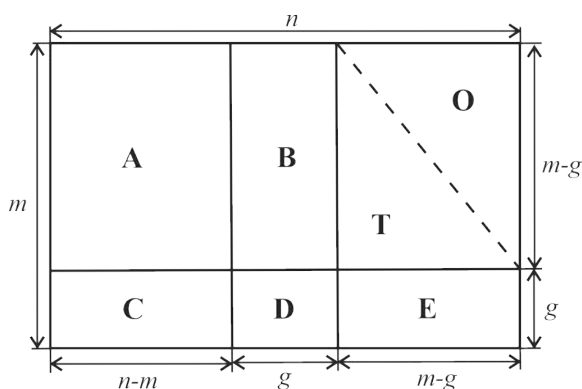


Рис. 4. Матриця перевірки парності, подана у нижній псевдотрикутній формі

Декодування кодів LDPC виконується за допомогою ітеративного алгоритму поширення довіри (Belief Propagation Algorithm – BPA) [9]. У роботі проведено дослідження алгоритму НМС, який адаптований до апаратної реалізації. Алгоритм полягає в тому, щоб спочатку оновлювати вузли даних, потім перевіряти вузли на кожній ітерації і в кінці приймати «жорстке» рішення декодування яке є найбільш ймовірним кодовим словом [10].

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел окреслив проблему яку потрібно вирішити, а саме провести процес конструювання декодера LDPC-коду який забезпечує задовільну обчислювальну складність, мінімальну затримку при його реалізації апаратними засобами для забезпечення високої пропускнуої спроможності бездротових мереж з підтримкою Wi-Fi.

Формулювання цілей статті. У статті буде приведена оцінка реалізацій та порівняння продуктивності LDPC-кодів засобами HDL в стандартах Wi-Fi. Це буде досягнуто методом математичного моделювання інформаційно-статистичних характеристик каналу з LDPC-кодуванням для різних конфігурацій коду. Для перевірки правильності прийнятих рішень буде наведено порівняльну характеристику переваг і недоліків алгоритмів декодування LDPC-кодів. Буде досліджено завадостійкість каналів з LDPC-кодами за умов зміни швидкості кодування, структури коду та форми СКК у бездротових мережах з підтримкою Wi-Fi.

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб вважати процедуру декодування успішною, на всіх перевірочних вузлах мають встановитись нульові значення (рис. 3, б). Алгоритм НМС є ітеративним двоступінним алгоритмом передачі повідомлень: на i -й ітерації спочатку обчислюються повідомлення від змінного до перевірочного вузла, які представляють оцінку апостеріорного ЛВП, і відправляються відповідному сусіду перевірочного вузла. По-друге, повідомлення від перевірочного до змінного вузла обчислюються та надсилаються назад сусіднім змінним вузлам. Алгоритм НМС виконується під час i, \dots, I_{\max} ітерацій в такий спосіб:

Ініціалізація: $\mu_{m,n}^{(i=0)} = 0, \forall m \in \{1, \dots, M\}, \forall n \in N_m$:

Крок 1 (оновлення вузла змінних): для $n \in \{1, \dots, N\}$ і $m \in M_n$

$$\lambda_{n,m}^{(i)} = I_n + \sum_{m' \in M_{n,m}} \mu_{m',n}^{(i-1)}$$

Крок 2 (оновлення вузла перевірки): для $m \in \{1, \dots, M\}$ і $n \in N_m$

$$\mu_{m,n}^{(i)} = \Gamma_{m,n}^{(i)} \cdot \min_{n' \in N_{m,n}} \left(|\lambda_{n',m}^{(i)}| \right)$$

$$\Gamma_{m,n}^{(i)} = \prod_{n' \in N_{m,n}} \text{sign} \left(|\lambda_{n',m}^{(i)}| \right)$$

Прийняття «жорсткого» рішення. В цьому випадку ітераційний процес зупиняється, коли досягається максимальне число ітерацій I_{\max} , чи коли всі перевірки на парність задовольняються за допомогою «жорстких» рішень, розрахованих наступним чином:

$$\lambda_n = I_n + \sum_{m \in M_n} \mu_{m,n}^{(i)}, z_n = \begin{cases} 1, & \lambda_n > 0 \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

На практиці операція отримання мінімуму для кожного перевірного вузла m зводиться до обчислення значень першого мінімуму та другого мінімуму, та вибору відповідного для кожного виходу n . В апаратній реалізації два мінімальні значення для k входів розраховуються з використанням дерева двох мінімальних компараторів [11], апаратна складність яких реалізується з $2 \cdot k - 3$ додавань/віднімань та $3 \cdot k - 4$ мультиплексорів.

В апаратній реалізації основною операцією оновлення перевіричних вузлів є знаходження мінімального та другого мінімального абсолютного значення. Ефективний спосіб знайти ці два значення – реалізувати трирівневе дерево компараторів, як показано на рис. 5. Є сім однакових блоків і кожен із них використовується для знаходження першого мінімального та другого мінімального значень із чотирьох вхідних даних. Коли мінімум та другий мінімум знайдені, відбувається множення на масштабний коефіцієнт 0,75. На рис. 6 приведена схема алгоритму НМС.

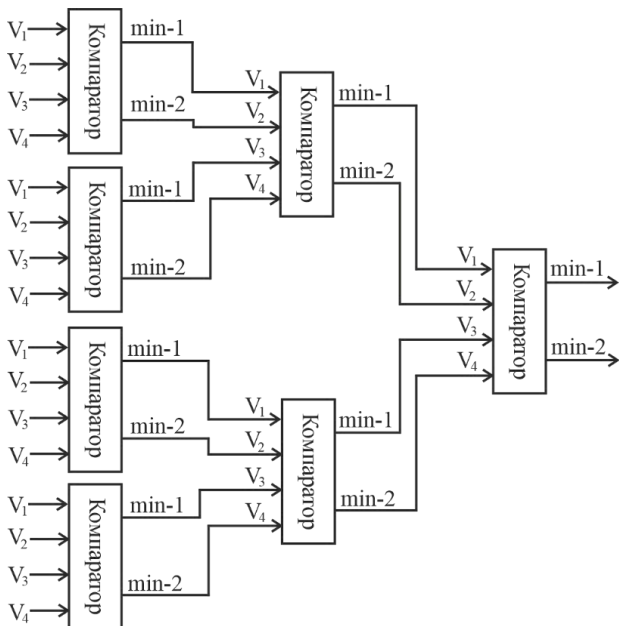


Рис. 5. Трирівневе дерево компараторів для знаходження першого і другого мінімумів

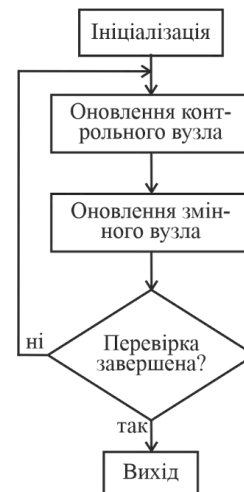


Рис. 6. Схема алгоритму нормалізованої мінімальної суми

Схеми, що використовуються для оновлення вузлів змінних та вузлів перевірки показано на рис. 7 та рис. 8 відповідно.

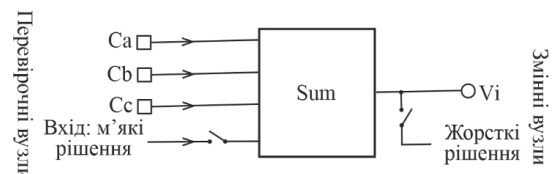


Рис. 7. Схема оновлення змінних вузлів

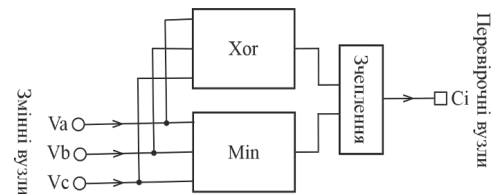


Рис. 8. Схема оновлення перевіричних вузлів

Simulink модель HDL-реалізації LDPC декодера представлена на рис. 9. Для роботи декодера на базі програмованої логічної інтегральної матриці FPGA (Field-Programmable Gate Array) відбувається перетворення вхідних фреймів на вибірки.

На вході (сигнал dataIn) діють значення ЛВП, які отримані на виході демодулятора символів КАМ; формуються управляючі сигнали, що вказують початок і кінець фрейму (сигнали startIn, endIn), а також логічний сигнал, що підтверджує вірність введених даних (сигнал validIn). Для змінних blockLenIdx та codeRateIdx формуються вектори індексу довжини блоку та індексу кодової швидкості.

Для врахування затримки блоку декодера LDPC для зазначеної довжини блоку, швидкості коду та кількості ітерацій використовується змінна decFrameGap. Вихідний сигнал nextFrame

використовується для визначення готовності блоку до початку обробки наступного фрейму. Затримка блоку дорівнює $r \cdot (t + 9m) + d$, де r – кількість ітерацій, t – подвоєна загальна кількість елементів у матриці контролю парності, відмінних від 1, m – кількість рядків у матриці перевірки на парність, а d – конвеєрні затримки. Величина конвеєрних затримок d дорівнює 35 тактів. Якщо кількість ітерацій дорівнює 8, то затримка блоку становить 1518 тактів.

Представимо результати експериментальних досліджень завадостійкості LDPC-декодера із врахуванням запропонованих схемотехнічних рішень.

Проведемо дослідження залежності коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з кодуванням LDPC і різною кодовою швидкістю (рис. 10–11).

З отриманих залежностей (рис. 10) можна зробити висновок, що при збільшенні швидкості коду зменшується завадостійкість системи зв'язку. При збільшенні кодової швидкості з 1/2 до 5/6 необхідно підвищувати відношення сигнал-шум на 4 дБ. З отриманих залежностей (рис. 11) можна зробити висновок, що використання багатопозиційної модуляції потребує підвищення відношення сигнал-шум: від 1 (ФМ-2) до 2 (ФМ-4) біт на символ модуляції – на 3 дБ; від 2 (ФМ-4) до 4 (16КАМ) біт на символ модуляції – на 5 дБ. І подальше збільшення позиційності модуляції до 6, 8 і 10 біт на символ – поступове підвищення відношення сигнал-шум на 5 дБ на кожні 2 біта на символ.

Стандарт Wi-Fi 6 використовує множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM) [12, 13], тривалість символу 12,8 мкс, інтервал між піднесучими складає 78,125 кГц.

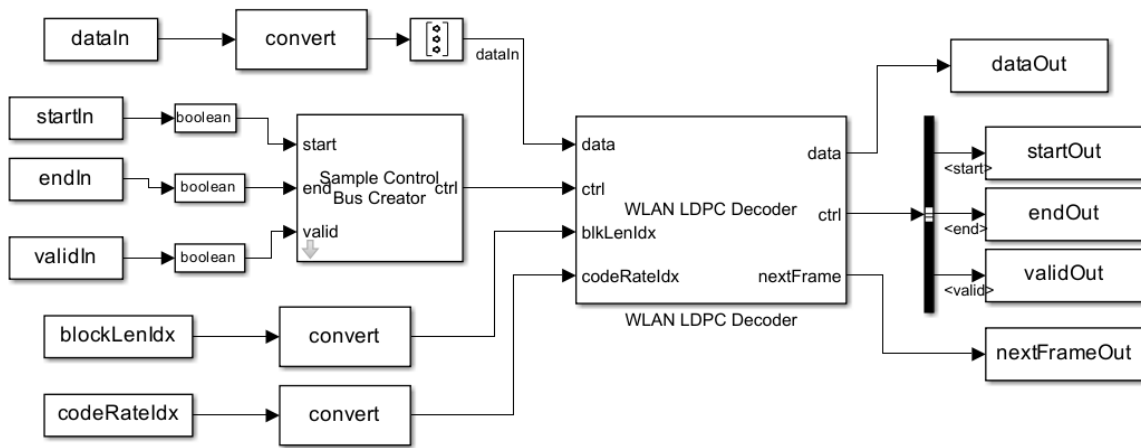


Рис. 9. Simulink-модель LDPC декодера

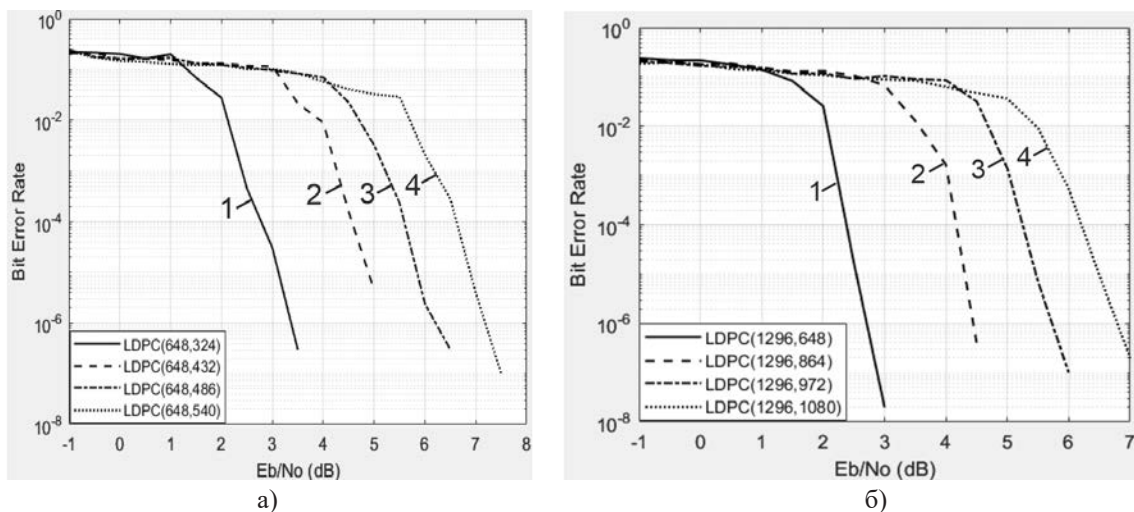
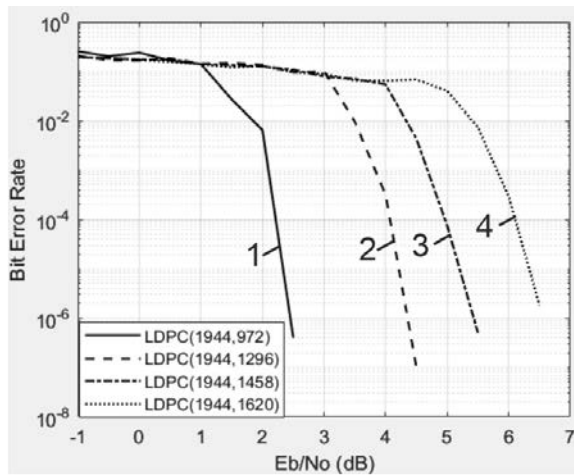
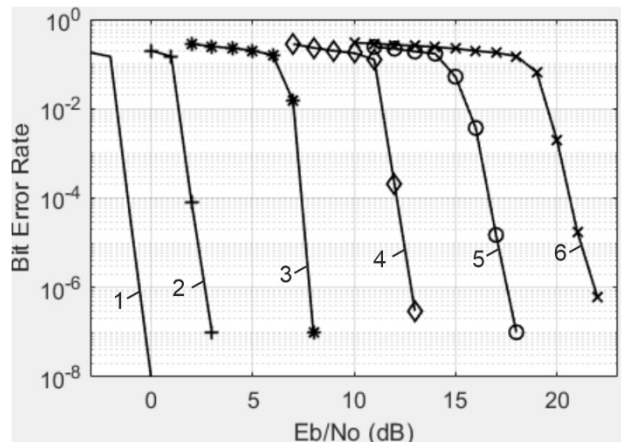


Рис. 10. Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з модуляцією ФМ-4 і кодуванням LDPC за алгоритмом НМС з кодовою швидкістю: 1 – 1/2; 2 – 2/3; 3 – 3/4; 4 – 5/6; довжина блоку: а – 648; б – 1296



а)



б)

Рис. 11. Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку: а – з модуляцією ФМ-4 і кодуванням LDPC за алгоритмом НМС з кодовою швидкістю: 1 – 1/2; 2 – 2/3; 3 – 3/4; 4 – 5/6; довжина блоку: а – 648; б – 1296; б – модуляцією: 1 – ФМ-2; 2 – ФМ-4; 3 – 16КАМ; 4 – 64КАМ; 5 – 256КАМ; 6 – 1024КАМ; довжина блоку 1944, кодова швидкість 1/2

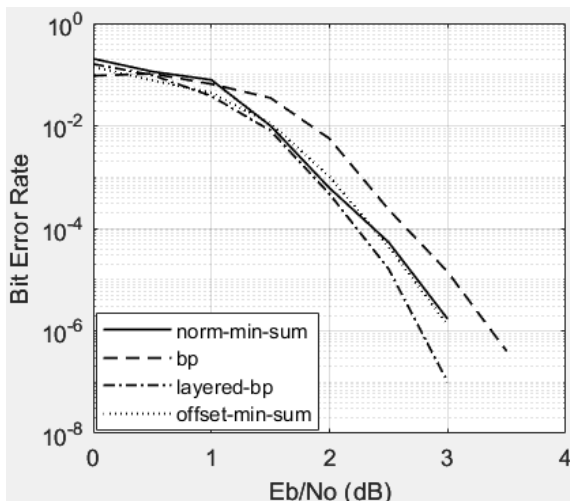
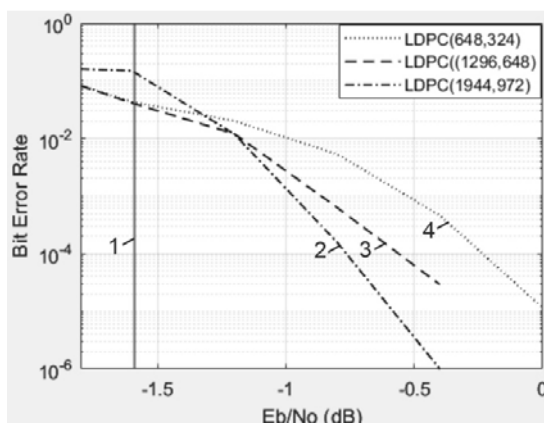


Рис. 12. Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум системи зв'язку з кодуванням LDPC(648, 324), алгоритм НМС, довжина блоку 648, кодова швидкість 1/2

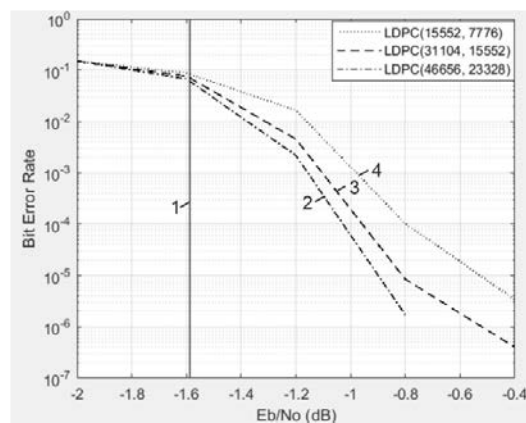
Менший інтервал між піднесучими забезпечує більшу надійність каналу зв'язку. Стандарт Wi-Fi 6 може використовувати модуляцію 1024КАМ, що підвищує швидкість передачі інформації.

На рис. 12 представлено результати оцінки продуктивності різних алгоритмів декодування LDPC-кодів. Порівнювались алгоритми декодування: НМС – «Norm-Min-Sum», «Offset-Min-Sum», «Layered-BP», «BP». З отриманих результатів можна зробити висновок, що алгоритм «Layered-BP» – багаторівневий алгоритм поширення довіри має найвищу завадостійкість, але його апаратна реалізація дуже складна. Тому для реалізації був обраний алгоритм НМС, який на 0,5 дБ має гіршу завадостійкість для BER = 1e-7, але займає менше ресурсів FPGA.

Проведемо дослідження близькості коду LDPC до межі Шеннона (рис. 13).



а)



б)

Рис. 13. Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум системи зв'язку з кодуванням LDPC, алгоритм НМС, кодова швидкість 1/2: а – 1 – межа Шеннона; довжини блоків: 2 – 1944; 3 – 1296; 3 – 648; б – 1 – межа Шеннона; довжини блоків: 2 – 46656; 3 – 31104; 3 – 15552

Для цього розглянемо коди, довжини яких затверджені стандартом IEEE 802.11 ax (Wi-Fi 6) і аналогічні коди, довжини яких збільшені у 24 рази. Була використана модуляція ФМ-2 та код LDPC швидкістю 0,5 різної довжини. Вертикальною лінією проведена межа Шеннона на рівні -1,59 дБ.

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що код LDPC для стандарту Wi-Fi 6, LDPC(1944,972) – з найбільшою довжиною блока даних, наближається до межі Шеннона на 1,2 дБ. При збільшенні довжини блока у 24 рази (код LDPC (46656,23328)), це наближення складає 0,8 дБ, але потребує значного збільшення ресурсів апаратного забезпечення FPGA.

Висновки. У представленій роботі наведено результати дослідження системи зв'язку за стандартом Wi-Fi 6. Приведено дослідження декодера

LDPC-коду з використанням алгоритму НМС. Представлено дослідження LDPC-декодера для стандарту Wi-Fi 6 в середовищі Simulink. Співвідношення BER і відношення сигнал-шум можна додатково покращити за рахунок збільшення розміру коду та збереження принципу паралелізму.

Сучасний стандарт Wi-Fi 6 використовує технологію просторового кодування (MIMO – Multiple Input Multiple Output) і Multi-User MIMO, вводиться режим OFDMA для покращення спектральної ефективності, а також застосовується модуляція 1024QAM для чотирикратного збільшення пропускної спроможності, що потребує збільшення відношення сигнал-шум на 5 дБ. Підтримуються наступні кодові швидкості LDPC: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; підтримуються наступні довжини блоків LDPC коду: 648, 1296 та 1944 біта.

Список літератури:

1. Бойко Ю. М. *Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад*: монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. Київ, 2018. 227 с. <https://elar.khmn.edu.ua/handle/123456789/6291>.
2. Bae J., Abotabl A., Lin H., Song K., Lee J. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. 2019. Vol. 8. Pp. E17. <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2019.10>.
3. Gao Y., Yao Y-F., Ma H. On the stopping distance of LDPC codes based on symplectic space over finite fields. *Applied Mathematics and Computation*. 2021. Vol. 391, Pp. 125625. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125625>.
4. Fang Y., Bi G., Guan Y. L., Lau F. C. M. A Survey on Protograph LDPC Codes and Their Applications. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17. №. 4. Pp. 1989-2016. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2436705>.
5. Panem C., Gad V. R., Gad R. S. Sensor's data transmission with BPSK using LDPC (Min-Sum) error corrections over MIMO channel: Analysis over RMSE and BER. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. Pp. 571-575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.039>.
6. Boiko J., Pyatin I., Druzhynin V. Possibilities of the MUSIC Algorithm for WI-FI Positioning According to the IEEE 802.11az Standard. *2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (Kyiv, 13-18 Nov. 2023). Ukraine, 2023, Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380354>.
7. Wang S-T., Wu J.-L. C., Hsu C.-Y., Ni W.-C. Software downloading in reconfigurable networks of open wireless architecture using SDR technology. *IEEE Communications Magazine*. 2006. Vol. 44, №. 4. 10. Pp. 128–134. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2006.1710424>.
8. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O. Design and evaluation of the efficiency of channel coding LDPC codes for 5G information technology. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. 2021. Vol. 9. №. 4. Pp. 867-879. <https://doi.org/10.52549/ijeie.v9i4.3188>.
9. Wang B., Zhu Y., Kang J. Two Effective Scheduling Schemes for Layered Belief Propagation of 5G LDPC Codes. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24. №. 8. Pp. 1683-1686. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2991473>.
10. Бойко, Ю., Семенко, А., П'ятін, І. Особливості формування кодової надлишковості у каналах передачі інформації. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2023. Т 2. №4, С. 12-25. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-01>.
11. Boudaoud A., El Haroussi M., Abdelmounim E. VHDL Design and FPGA Implementation of LDPC Decoder for High Data Rate. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2017. Vol. 8. Iss. 4, P.257-261. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080435>.
12. Pyatin, I., Boiko, J., Eromenko, O., Parkhomey, I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2023. Vol. 21. № 3. P. 496-505. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i3.22893>.
13. Kongara G., He C., Yang L., Armstrong J. A Comparison of CP-OFDM, PCC-OFDM and UFMC for 5G Uplink Communications. 2019. *IEEE Access*. Vol. 7. P. 157574-157594. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949792>.

Boiko J.M., Pyatin I.S. DETERMINING THE PERFORMANCE OF LDPC CODES USING HDL IN COMMUNICATION SYSTEMS WI-FI 6 TECHNOLOGY

The deployment of Wi-Fi-enabled wireless networks is a major trend of the present and future. The main requirements for networks are related to increasing reliability, energy efficiency and increasing the speed of information flows. The article focuses on a study evaluating the capabilities of the Wi-Fi 6 standard. This standard uses new methods for generating signal-code construction (SCC) and codes with low-density parity check codes (LDPC), which allows increasing the speed and noise immunity of information transmission. The relevance of the work lies in the study of LDPC codes and their implementation in the hardware description language (HDL). LDPC are forward error correction codes that are close to the theoretical limit. The work is devoted to the study of the dependence of the bit error rate on the signal-to-noise ratio for a communication system with digital quadrature modulation and LDPC coding, and the construction of an LDPC decoder using the normalized minimum sum algorithm on HDL. A model of a digital communication system receiver with LDPC and Simulink codes is considered – a model for studying the efficiency of signal processing in baseband processors of the transmitter and receiver. LDPC codes are popular because they have very good performance and allow for simple hardware implementations. The principles of their encoding and decoding are considered. The normalized min-sum algorithm is to first update the data nodes, then check the nodes at each iteration, and finally make hard decoding decisions that describe the most likely codewords. The operation of obtaining the minimum for each check node is reduced to calculating the values of the first and second minimum. In the hardware implementation, two minimum values are calculated using a tree of two minimum comparators. At the decoder input, the values of the logarithmic likelihood ratio (LLR), obtained at the output of the amplitude quadrature modulation (QAM) symbol demodulator, are formed; control signals are generated that determine the beginning and end of the frame, as well as a logical signal confirming the correctness of the entered data; vectors of the block length index and code rate index are formed.

Key words: LDPC codes, HDL, modulation, Wi-Fi, encoding.

Ветошко І.П.

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

Кравчук С.О.

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

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ГОЛОСОВИХ ПОСЛУГ VoNR В МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ 5G

З'ясовано, що розвиток сучасних технологій телекомунікацій спонукають операторів мобільного зв'язку модернізувати власну мережу та покращувати якість надання послуг та клієнтський досвід. Архітектура 5G має суттєві відмінності від своїх попередників. Визначено, що стандарт мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G, як і 4G, пропонується в якості основного прискорювача подальшого розширення послуг передачі даних із послугами eMBB (Enhanced mobile broadband), URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) і mMTC (massive machine-type communications), але при цьому послуги передачі трафіку голосу і відео залишаються ключовими для користувачів [1–3]. Встановлено, що за оцінками асоціації GSMA [4], у 2025 році кількість підписок на голосовий зв'язок у всьому світі зростає на 1,2 мільярда порівняно з 2020 роком. Тому операторам мереж мобільного зв'язку необхідно пропонувати і підтримувати все більшу кількість голосових послуг. Щоб досягти цього, стандартами партнерської асоціації груп телекомунікаційних компаній 3GPP (3rd Generation Partnership Project) визначено, що мережа 5G повинна надавати голосові послуги за допомогою поєднання 5G RAN (5G Radio access network), 5GC (5G Core Network) та IMS (IP Multimedia Subsystem). Радіотехнологія 5G відома як New Radio (NR), а голосові служби, що використовують 5G RAN, 5G Core та IMS, називаються VoNR (Voice over New Radio). З'ясовано, що основним і цільовим рішенням для розгортання голосових послуг в мережах 5G є VoNR, який забезпечує передачу голосу, відео та повідомлень на основі IMS через радіодоступ 5G.

Хоча впровадження мереж 5G відбувається поступово та з прийняттям 5GC, голосові послуги можуть продовжуватися надаватися через мережі 4G EPC (Evolved Packet Core) + LTE (Long Term Evolution), а EPS (Evolved Packet System) стає резервним рішенням для передачі голосу [5–7]. При цьому, встановлено, що важливо коректно інтегрувати домен 5G в діючу мережу постачальника телекомунікаційних послуг. Однак, тільки, впровадження функції VoNR в мережі 5G надасть найкращу якість голосового і відео зв'язку [8, 9].

Ключові слова: VoNR, 5G, MTSI, 5QI, IMS, EVS, VoLTE, 5GC, 5G NR, IWF, gNB, QoS, New Radio.

Постановка проблеми. У нинішніх умовах впровадження стандарту 5G в мобільних мережах створює нові можливості для швидкого та безперервного обміну даними, але все ще існують певні проблеми з якістю голосових послуг у таких мережах. Особливий інтерес викликає реалізація послуг передачі голосу по новому радіо (VoNR). Перехід на новий стандарт вимагає глибокого розуміння і вирішення низки технічних питань. Архітектурні особливості мереж 5G, такі як висока пропускна здатність і низька затримка, створюють унікальні виклики для ефективної інтеграції голосових послуг. Щоб забезпечити оптимальну якість обслуговування, протокольні рішення повинні бути адаптовані до нового середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Реалізація голосових послуг у мережах 5G є актуальним напрямком досліджень, який привертає увагу вчених та індустрії. Аналіз останніх публікацій та досліджень надає комплексне уявлення про сучасний стан цієї тематики. Один із ключових аспектів досліджень – розробка та впровадження стандарту 5G NR.

Архітектурні та технічні аспекти стандарту 5G NR висвітлені в роботі, що надає глибоке розуміння технологічних викликів та можливостей [1]. Це забезпечує комплексне розуміння компонентів системи та їх взаємодії в контексті голосових послуг. Важливо враховувати системні аспекти мобільних інфокомунікацій; різні публікації та посібники розкривають питання теорії систем та

системної архітектури [2–3]. Аналіз можливостей для покращення якості голосових послуг у мережах 5G виявляє фактори, які впливають на ефективність та надійність комунікацій [5–8]. Загалом, автори наукових публікацій акцентують увагу на впровадженні нових технологій та підходів для оптимізації голосового обміну в пакетних мережах мобільного зв'язку.

Метою роботи є представлення технічних рішень того, як голосові служби можуть бути включені в мережу 5G, та можливі методи реалізації VoNR із підтримкою IMS у системі 5G.

Виклад основного матеріалу дослідження

Підтримка IMS голосових послуг в 5G

5G підтримує мультимедійні телефонні послуги для IMS MTSI (multimedia telephone services for IMS), що представляє прикладний рівень. Медіа-потік (media flow) складається з аудіо, відео та «тексту» (тут відповідає загальним даним, як-от зображення, текст, веб-сайти тощо), що використовує сучасні інструменти співпраці та комунікації. Щоб зберегти підтримку QoS, протокол реального часу RTP (real-time protocol), протокол потокової передачі в реальному часі RTSP (real-time streaming protocol) і протокол керування в реальному часі RTCP (real-time control protocol) координують передачу медіа-файлів і усувають такі порушення, як затримка, невідповідність або неправильні пакети. Транспортний і мережевий рівні реалізуються за допомогою відомих протоколів TCP (Transmission

Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) і IP (Internet Protocol) (IPv4 і IPv6). Функції RAT (radio access technology) забезпечуються E-UTRA (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) або 5G NR. Протоколи ініціації сеансу SIP (session initiation protocol), опису сеансу SDP (session description protocol) і IKE (Internet Key Exchange) виконують площину управління голосового з'єднання. На рис. 1 показані мережні протоколи DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) і DNS (Domain Name System), оскільки вони пропонують додаткові послуги, наприклад послуги локального оператора [10].

Підтримка послуг IMS, включаючи мережеві інтерфейси, рівні протоколів і сценарії сигналізації, є необхідною умовою для голосових послуг, які пропонуються в 5G. Щоб використовувати аспекти QoS, між UE та мережею встановлюється так званий потік QoS, який супроводжується такими параметрами, як затримка, пріоритет, частота помилок пакетів і гарантована швидкість передачі даних. Щоб зменшити накладні витрати на сигналізацію, 5G призначає ідентифікатор потоку 5G QoS (5QI) кожному потоку QoS. Усі рівні протоколів і мережеві функції знають про цей 5QI. Існує рекомендація щодо застосування цих профілів 5QI: 5QI = 1 для розмовного голосу, 5QI = 2 для розмовного відео, що вимагає певних значень QoS, 5QI = 5 для сигналізації IMS і додатково 5QI = 6...9 для одночасних медіа-потоків із нижчими вимогами до QoS.

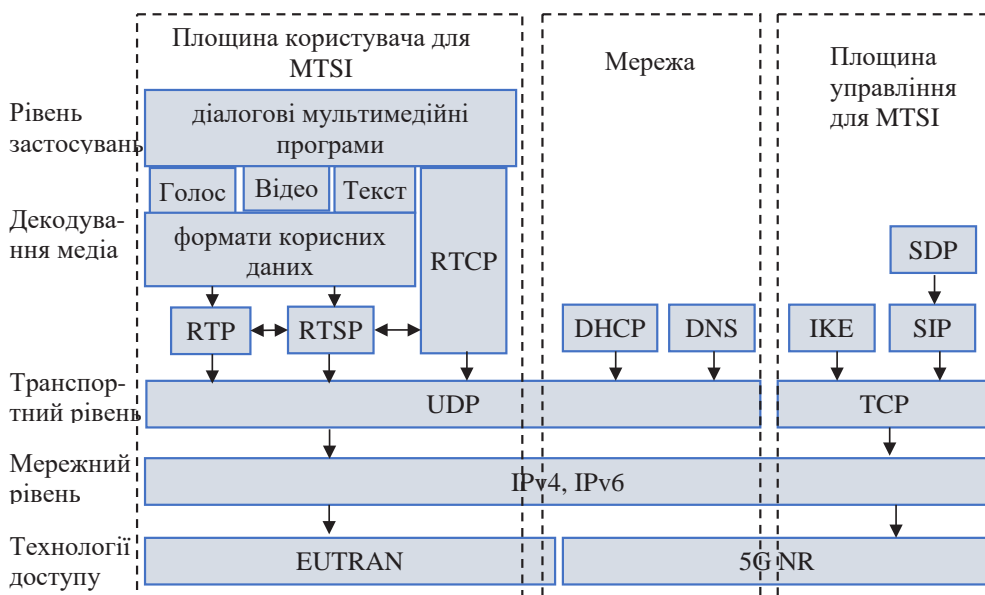


Рис. 1. Рівні протоколів MTSI: площина користувача, мережна площина та площина управління

Оскільки мережа розглядає передачу голосу як додаток у системі 5G, то немає обов'язкових конфігурацій рівнів протоколу, їх можна розглядати більше як рекомендації. Сервіс передачі голосу більше зосереджується на затримці, ніж на надійності підтримки потоку. У голосовому з'єднанні відіграють ключову роль аспекти ефективного використання радіоресурсів і споживання енергії. Механізми напівпостійного планування дозволяють квазі-постійне планування радіоресурсів із гарантованою швидкістю передачі даних із низькими накладними витратами на сигналізацію. Крім того, механізм агрегування слотів дозволяє автоматичному повторенню голосового пакету підвищити надійність, зосереджуючись на зменшенні затримки. Зменшення енергії вирішується за допомогою переривчастого прийому та передачі DRX і DTX (discontinuous reception і discontinuous transmission) [11]. Зосередженість на затримці перед надійністю зрозуміла. Тому встановлюємо рівень керування радіоканалом RLC (Radio link control) у непідтвердженій режим і пропускаємо перевірку цілісності на рівні протоколу конвергенції пакетних даних PDCP (Packet Data Convergence Protocol) з міркувань безпеки, увімкнувши лише шифрування.

Для проведення подальшого аналізу взаємодії 5GS та IMS на рис. 2 представлено спрощену структуру IMS з необхідним набором складових для реалізації голосових послуг і двома інтерфейсами підключення до мережі оператора (1 і 2):

Дотримуючись тенденції високоякісної передачі аудіо, 3GPP розробила кодек розширених голосових послуг EVS (enhanced voice services), який тепер є обов'язковим для передачі голосу в стандарті 5G. EVS продовжує традицію багатшвидкісних голосових кодеків (AMR), адаптованих до зв'язку. Використовуючи вимоги до покращеної якості аудіо та дозволяючи передавати аудіосигнали, окрім мови, наприклад музики, EVS використовує вищі швидкості передачі даних, запропоновані 5GS, для передачі покращених закодованих аудіосигналів. Технічно EVS збільшує смугу пропускання звуку та охоплює звуковий діапазон частот від 20 Гц до 20 кГц, що відповідає типовому діапазону людського вуха. Для перетворення аналогового аудіосигналу в цифровий сигнал EVS застосовує такі відомі методи, як амплітудне квантування та дискретна дискретизація. Як покращення, порівняно з голосовими кодеками старого покоління, EVS забезпечує точніший рівень квантування та вищу частоту дискретизації. Одним з важливих аспектів EVS є його режим кодека сумісності, який дозволить

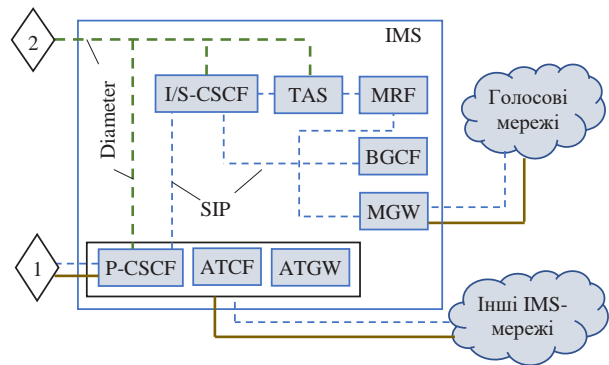


Рис. 2. Спрощена структура IMS з необхідним набором складових для реалізації голосових послуг і двома інтерфейсами підключення до мережі оператора (1 і 2): I-CSCF (Interrogating Call Session Control Function) – функція опитувального управління сеансом виклику (із зовнішніми мережами); S-CSCF (Serving Call Session Control Function) – обслуговуюча функція управління сеансом виклику; MGW (Multimedia Media Gateway) – медійний шлюз; P-CSCF (proxy-CSCF) – проксі-CSCF; BGCF (Breakout Gateway Control Function) – функція управління прикордонними шлюзами; MRF (Media Resource Function) – функція ресурсів мультимедіа; TAS (Telephony Application Server) – сервер телефонних застосувань; ATCF (Access Transfer Control Function) – функція керування передачею доступу; ATGW (Access Transfer Gateway) – шлюз передачі доступу, це опорна точка медіа, що доповнює роль сигналізації та керування медіа

налаштувати голосовий кодек EVS також відповідно до швидкості застарілих голосових кодеків, забезпечуючи плавне впровадження VoNR.

Впровадження голосових послуг потребує певної адаптації архітектури інфраструктури, а гнучка архітектура надає нові додаткові інтерфейси та функції. Оператор повинен вирішити, яка базова мережа включена і чи повинна вона підтримувати голосові послуги (запропонувати резервний EPS або VoNR). Також, базова мережа EPS або 5GC повинна бути підключена до IMS через кілька інтерфейсів для обміну даними користувача та сигналізації.

Різні методи реалізації VoNR. Опції для існуючих операторів.

Існують різні варіанти реалізації VoNR у мережі. З цих варіантів деякі з них підійдуть для існуючого оператора, а деякі – будуть найкращими для нового оператора. У діючого оператора (або нового оператора) може не бути розгорнутої мережі 5G Core, 5G NR та IMS. Тоді найкращим і доступним вибором буде — розгортання мережі IMS, яка підтримує інтерфейси HTTP, разом із новим розгортанням 5G Core та 5G NR.

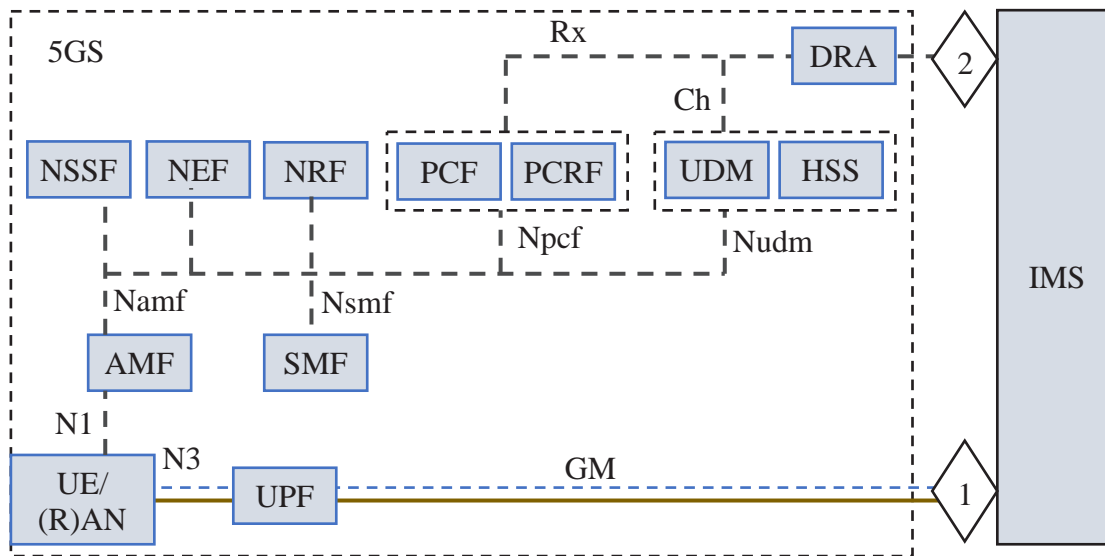


Рис. 3. Метод розгортання модуля управління даними користувачів UDM:
 (R)AN ((Radio) Access Network) – функція мережного доступу (радіодоступ, як одна з опцій);
 AMF (Access and Mobility Management Function) – функція управління доступом і мобільністю;
 SMF (Session Management Function) – функція управління сеансом; UE (User Equipment) –
 користувачське обладнання; UPF (User Plane Function) – функція передачі даних користувачів,
 або функція користувачької площини; NSSF (Network Slice Selection Function) – функція вибору
 мережного сегменту/слайсу; NEF (Network Exposure Function) – функція забезпечення взаємодії
 з зовнішніми застосуваннями; NRF (NF Repository Function) – сховище мережних функцій

Існуючий оператор, який прагне надавати голосові послуги, зрештою повинен запровадити VoNR. Для цього оператор повинен мати наступні передумови:

- в мережі вузли LTE eNB оновлено до gNB і підключено до нового 5GC;
- розгорнуті та працюють базова мережа IMS та голосовий сервіс VoLTE;
- по всій мережі оператора доступне нове покриття 5GC і 5G NR.

Тоді, оператор може розглянути наступні три методи реалізації VoNR:

1) розгортання модуля управління даними користувачів UDM (Unified Data Management) в ядрі 5G, яке також підтримує функції HSS (Home Subscriber Server) для IMS;

2) розгортання функції IWF (InterWorking Function), яка перетворює повідомлення протоколу сигналізації Diameter на HTTP та інтегрує існуючу мережу IMS із новим 5GC;

3) оновлення існуючого вузла IMS для підтримки нових інтерфейсів на основі HTTP та підключення вузла до нових основних мережних функцій 5G.

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки. Їх вибір залежить від прийнятої для них пріоритетності.

Так, перший метод включає вузли з подвійною функціональністю для плавного та швидшого роз-

гортання послуг 5G будь-яким оператором (рис. 3). Більшість постачальників розробили конвергентні програми, такі як UDM з HSS і PCF (Policy Control Function) з PCRF (Policy and Charging Rules Function). Це допомагає оператору підключити мережу IMS безпосередньо до нового 5GC без будь-яких змін у існуючій мережі IMS і з меншими додатковими витратами. Але при цьому за допомогою DRA (Diameter Routing Agent) необхідно відпрацювати процедуру контролю, що повідомлення через Diameter, пов'язане з користувачами 5G, правильно (по відношенню до узгодження різних протоколів сигналізації) направляється до 5G UDM і PCF.

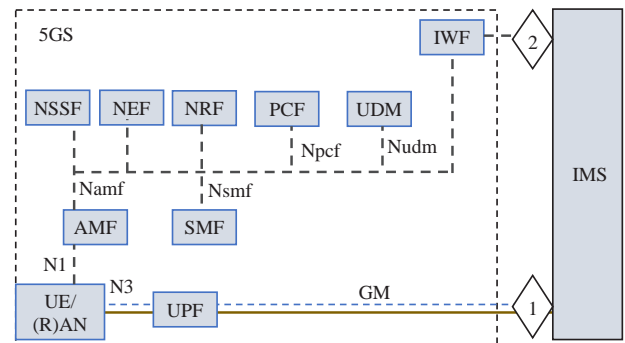


Рис. 4. Метод задіяння вузлу IWF

Для реалізації другого методу між мережевими функціями 5G і ядром IMS потрібно вста-

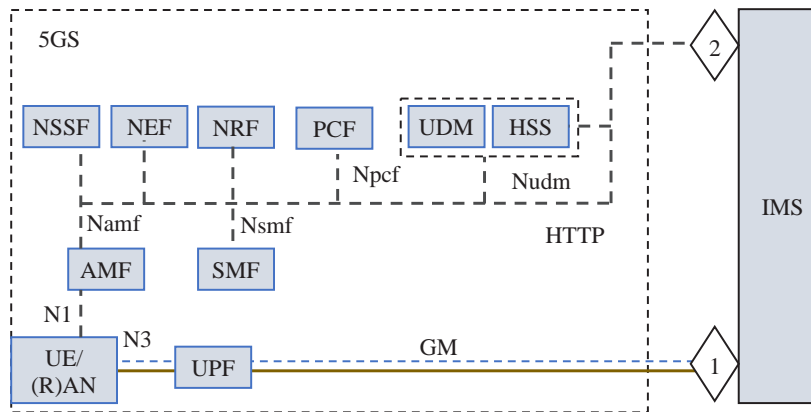


Рис. 5. Метод оновлення усіх вузлів до підтримки служб HTTP

новити вузол IWF, який може перетворювати HTTP-повідомлення в протокол Diameter і навпаки (рис. 4). Це потрібно, лише у випадку, якщо нові функції мережі UDM в ядрі 5G не підтримують протокол Diameter. Даний метод дозволяє оператору швидко впровадити рішення VoNR, не порушуючи існуючі вузли мережі IMS. Однак для впровадження та моніторингу нового вузла IWF знадобляться додаткові зусилля щодо розгортання та експлуатації.

Третій метод передбачає необхідність оновлення існуючих мережних вузлів IMS для підтримки служб HTTP, які підтримуються функціями мережі 5G (рис. 4). Усі вузли IMS у мережі повинні підтримувати службу/інтерфейс Nhss_ims (керування контекстом UE, керування даними користувачів і автентифікації UE для IMS), доступну функціям базової мережі 5G. Цей метод дозволяє оператору уникнути впливу старих технологій на ядро 5G. Це може бути найкращим методом для оператора, який розглядає розгортання нового ядра IMS як частину мережі 5G.

Потік виклику VoNR

Потік виклику (Call Flow) VoNR дуже схожий на виклик в VoLTE. Загальний потік викликів VoNR включає п'ять наступних етапів [12].

1) **Реєстрація NR gNB і 5GC.** UE буде зареєстровано в мережі 5G перед тим, як розпочне процес реєстрації в мережі IMS. Ця процедура підключення NR є загальною для всіх пристроїв 5G, незалежно від того, чи підтримується VoNR пристроєм чи ні.

2) **Встановлення сеансу PDU за замовчуванням.** Після успішного завершення початкового підключення UE розпочне процедуру встановлення сеансу PDU за замовчуванням до AMF. Після встановлення сеансу PDU за замовчуванням користувач 5G зможе використовувати послуги за

замовчуванням, призначені для його підписки, як правило, Інтернет-послуги.

3) **Встановлення сеансу IMS PDU за замовчуванням.** Етапи встановлення сеансу IMS PDU такі ж, як і під час встановлення сеансу PDU за замовчуванням. У встановленні сеансу IMS PDU значення DNN, надане UE, представлятиме мережу IMS. Крім того, якщо UE налаштовано для виявлення адреси P-CSCF під час встановлення з'єднання IMS, тоді UE має включити індикатор того, що воно запитує IP-адресу(и) P-CSCF. Після завершення процедури встановлення сеансу IMS UE буде знати адресу I-CSCF. Після того як UE встановлює шлях між CSCF, тоді UE починає процес реєстрації SIP/IMS.

4) **Реєстрація IMS.** Після того, як UE приєднається до мережі та успішно створено сесію PDU, UE має зареєструватися в мережі IMS. Процедура реєстрації IMS включає автентифікацію IMS та узгодження безпеки між UE та IMS. Процедура реєстрації IMS буде завершена за 2 спроби. Під час першої спроби мережа IMS кине виклик агенту користувача в UE, а під час другої спроби UE буде зареєстровано в мережі IMS. Після реєстрації SIP користувач зможе здійснювати дзвінки через 5G New Radio разом із додатковими послугами. Коли користувач здійснює дзвінки, для мережі IMS буде встановлено спеціальний сеанс PDU. Під час виклику MO/MT сигналізація SIP буде передаватися сеансом PDU за замовчуванням, тоді як справжні пакети голосових/відео даних будуть передаватися через спеціальну секцію (Dedicated section).

5) **Виклик виділеної сесії MO (Mobile Originated)/MT (Mobile Terminated).** Відбуваються процедури та мережні функції, пов'язані з встановленням виклику між двома користувачами, які знаходяться в зоні покриття 5G VoNR і зареєстровані в мережі IMS. Мережі IMS як

Затримки при сценарії виклику МО

Сценарій виклику МО	Затримка налаштування виклику з режиму підключення, с			Затримка налаштування виклику з режиму очікування, с		
	Середнє	Медіана	Режим	Середнє	Медіана	Режим
VoNR	4.02	3.20	2.60	4.64	3.80	3.40
EPSFB	4.96	4.65	4.00	5.17	5.00	4.80

користувача, так і іншого користувача, що викликається, зв'язуються з PCF, щоб ініціювати встановлення виділеного каналу для UE через інтерфейс New Radio. Усі потоки SIP для встановлення виклику між двома користувачами такі самі, як і для встановлення виклику VoLTE.

Потік виклику починається з виявлення 5G NR Cell і виконання реєстрації в 5G gNB і 5GC і встановлення сеансу PDU за замовчуванням з потоком QoS без GBR з 5QI=6-9 з DNN даних (DDN дорівнює APN у 4G LTE).

Після цього UE встановлює стандартний Інтернет-сеанс PDU з IMS DNN з потоком QoS без GBR і 5QI=5. Потім UE виконує процес реєстрації за допомогою IMS через обмін повідомленнями SIP через IMS PDU за замовчуванням і встановлює виклик VoNR MO/MT через виділений сеанс PDU з GBR QoS Flow і 5QI=1. Потік голосового трафіку з протоколом RTP через виділений сеанс PDU, і після завершення перетворення виклик VoNR можна припинити, звільнивши виділений сеанс PDU.

Аналіз продуктивності VoNR можна оцінити через характеристику затримки налаштування виклику МО, яку можна розділити на Delay_1 і Delay_2. Delay_1 називається затримкою доступу до виклику (від MO SIP_Invite до SIP_183_Session_Progress) і визначає затримки обробки IMS між MO та MT, наприклад. MT виконує пейджинговий виклик, MT встановлює виклик IMS або, затримку основного ядра MT для встановлення виділеного каналу. Delay_2 називається затримкою обробки виклику (від SIP_183_Session_Progress до SIP_180_Ringing) і також визначає затримки радіозв'язку, коли в цей період повідомлення радіоінтерфейсу NR у VoNR або LTE у VoLTE передаються між MO UE та мережею на додаток до базової мережі EPS/5GC затримки для налаштування виділеного носія на стороні MO до останнього етапу встановлення виклику між MO та MT на етапі виклику.

В [13] наведені результати досліджень (табл. 1), що представляють загальну затримку встановлення виклику IMS MO (з мобільного зв'язку), яка спостерігається в різних мережах, що включають VoNR і EPSFB (Evolved Packet Switched Fallback). Рішення EPSFB є проміжним, для якого потрібен рівень 4G під системою SA. На високому рівні EPSFB еквівалентний CSFB (Circuit Switched Fallback).

Значення та затримка встановлення виклику можуть відрізнитися від однієї мережі до іншої залежно від фактичного стану мережі (діапазону, пропускну здатності, площі покриття тощо). Тому метою аналізу даних є не порівняння фактичних значень, а розгляд відносних відмінностей. Так для проведення аналізу продуктивності в [13] було оброблено 18000 голосових викликів, але слід зазначити, що розмір вибірки для VoNR, зокрема, менший, ніж для EPSFB, через обмежену доступність комерційного розгортання на момент проведення аналізу.

Затримка встановлення виклику МО обчислюється від SIP_Invite до SIP_180_Ringing, які є повідомленнями протоколу SIP. Аналіз зосереджений на викликах МО, оскільки він також включає затримки виклику MT. Статистичні дані охоплюють різні тестові випадки, і аналіз проводився за всіма сценаріями (мобільність і стаціонарні умови). Як видно із табл. 1 затримки у всіх режимах були меншими тільки при VoNR, а у випадку проміжного рішення EPSFB, коли були задіяні елементи мережі 4-го покоління, затримки були значно вищими, а отже, і продуктивність системи нижчою.

Висновки. Голосові послуги в мережі 5G можуть бути реалізовані за допомогою існуючої мережі IMS шляхом внесення певних змін у функції базової мережі IMS або 5G. Мережі IMS широко використовується, тому впровадження голосових послуг у мережі 5G повинно бути впроваджене без значних труднощів.

Список літератури:

1. Ahmadi S. 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards. – Academic Press, 2019. -1020 p., ISBN: 978-0-08-102267-2

2. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура [Електронний ресурс]: навч. посіб. за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. О. Кравчук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 18,17 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 683 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198>
3. Ilchenko M., Kravchuk S. Mobile Infocommunication systems, Information and Telecommunication Sciences, Vol. 11, Number 1, pp. 11-19 (2020), (DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12020.11-19>)
4. The Mobile Economy 2020: GSM Association (2020), 62 p., https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf
5. Vetoshko I., Kravchuk S. Opportunities to Improve the Quality of Voice Services in 5G Networks // 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), ISBN: 979-8-3503-4848-4, 13-18 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380376>
6. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks // Information and Telecommunication Sciences. – 2023. – Vol.14, No 2. – P. 9-16, <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22023.9-16>
7. Attaran M. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – Vol. 14: p. 5977–5993 (2023), <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02521-x>
8. Ветошко І.П. Кравчук С.О. Розгортання голосових сервісів у мережах 5G // Grail of Science. – 2023. – № 24. – с. 278–281, <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.051>.
9. Li X., Wei M., Xie W. Practical Performance Analyses of 5G Sharing Voice Solution // Electronics. – Vol. 11, p. 2412. (2022), <https://doi.org/10.3390/electronics11152412>
10. Stuhlfauth R. Why voice over 5G relies heavily on LTE, <https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/white-paper-5g-voice-over-new-radio-vonr-254723.html>
11. Liu D., Wang C., Rasmussen L. Discontinuous Reception for Multiple-Beam Communication // IEEE Access, Vol. 7 (2019), <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909808>
12. Voice Over 5G. Post // <https://the5gzone.com/index.php/voice-over-5g/>
13. Verma D., Low C. L., El-saidny M. A. 5G NR Voice Solutions Overview and Deployment Guidelines. Network Performance Considerations. MediaTek, 16 p. (2021) // <https://newsletter.mediatek.com/hubfs/MediaTek-5G-Voice-Solutions-Whitepaper-PDF5GNRSWP-0821.pdf>

Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. STRUCTURAL FEATURES OF VONR VOICE SERVICES IMPLEMENTATION IN A 5G MOBILE NETWORK

It is found that the development of modern telecommunications technologies encourages mobile operators to modernise their networks and improve the quality of service and customer experience. The 5G architecture has significant differences from its predecessors. It has been determined that the fifth generation mobile communication standard 5G, like 4G, is proposed as the main accelerator for the further expansion of data services with eMBB (Enhanced mobile broadband), URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) and mMTC (massive machine-type communications) services, but voice and video traffic services remain key for users [1–3]. According to the GSMA [4], the number of voice subscriptions worldwide will increase by 1.2 billion in 2025 compared to 2020. Therefore, mobile network operators need to offer and support an increasing number of voice services. To achieve this, the standards of the 3GPP (3rd Generation Partnership Project), a partnership association of telecommunications groups, specify that a 5G network must provide voice services using a combination of 5G RAN (5G Radio access network), 5GC (5G Core Network) and IMS (IP Multimedia Subsystem). 5G radio technology is known as New Radio (NR), and voice services using 5G RAN, 5G Core and IMS are called VoNR (Voice over New Radio). It has been found that the main and targeted solution for deploying voice services in 5G networks is VoNR, which provides voice, video and IMS-based messaging over 5G radio access.

Although the introduction of 5G networks is gradual and with the adoption of 5GC, voice services can continue to be provided over 4G EPC (Evolved Packet Core) + LTE (Long Term Evolution) networks, and EPS (Evolved Packet System) becomes a backup solution for voice transmission [5–7]. At the same time, it has been established that it is important to correctly integrate the 5G domain into the existing network of a telecommunications service provider. However, only the implementation of the VoNR function in the 5G network will provide the best quality of voice and video communications [8, 9].

Key words: VoNR, 5G, MTSI, 5QI, IMS, EVS, VoLTE, 5GC, 5G NR, IWF, gNB, QoS, New Radio.

Дубина В.О.

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

Кононова І.В.

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

МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛЮ

Проблема надійності до цього часу не втратила своєї актуальності, а, навпаки, ще більше заострилася. Це пов'язано з дією ряду об'єктивних причин, зокрема, безперервним ростом складності і відповідальності функцій, які виконуються сучасними технічними системами, ускладненням структури цих систем, збільшенням кількості складових елементів і зв'язків між ними, а також значним розширенням діапазону умов експлуатації. Все це супроводжується підвищенням вимог до надійності функціонування таких систем. Ці та інші причини зумовлені бурхливим науково-технічним прогресом, який спостерігається за останні десятиріччя в багатьох галузях техніки: в комунікаційних технологіях, обчислювальній техніці, інформатиці і т.д. Визначено, що на ефективність функціонування складної системи значно впливає надійність складових її підсистем і елементів. Незважаючи на те, що до цього часу якість елементної бази суттєво підвищилась, все ж ріст складності системи випереджає темпи підвищення безвідмовності елементів, що не завжди дозволяє забезпечити високу (або задану) надійність функціонування системи в цілому.

Проведений аналіз особливостей функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання мереж зв'язку дозволив виявити ряд факторів, які суттєво впливають на ефективність та надійність цих систем. Деякі з найбільш суттєвих факторів можуть впливати на непродуктивне витрачання робочого (оперативного) часу та погіршення деяких показників надійності.

В моделях враховуються фактори, що впливають на надійність об'єктів в реальних умовах функціонування. Розглянуто процес функціонування відновлюваного об'єкту електронного комунікаційного обладнання з непоповнюваним резервом часу і ідеальним контролем працездатності.

Запропоновано моделі надійності, які встановлюють зв'язок між показниками надійності об'єкту (в нашому випадку – об'єкту електронного комунікаційного обладнання), характеристиками надійності елементів його структури та параметрами процесу функціонування об'єкту.

Ключові слова: моделі надійності, електронне комунікаційне обладнання, знецінюючі відмови, системи зв'язку, резервування.

Постановка проблеми. Об'єкти з непоповнювальним резервом часу утворюють великий клас систем, в яких резерв часу може створюватися по-різному. В одних випадках він утворюється за рахунок додаткового збільшення часу для виконання об'єктом завдання в ідеальних умовах, в інших – шляхом використання запасу продуктивності об'єкта. Відмови, що виникають в таких об'єктах, за своїми наслідками по-різному впливають на процес виконання завдання і можуть бути розділені на три групи: незнецінюючі, повністю знецінюючі і частково знецінюючі попереднє напрацювання.

На теперішній час є актуальною проблема побудови математичних моделей надійності об'єкта

з непоповнювальним резервом часу, незнецінюючими відмовами та урахуванням характеристик контролю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За цей час виконано велику кількість робіт у різних напрямках теорії та практики надійності і отримано велику кількість корисних, перевірених на практиці результатів, які в сукупності складають основи загальної теорії надійності [1–5]. Ця теорія дозволяє з достатньою для практики точністю вирішувати широкий спектр задач надійності і експлуатації: обирати раціональну (оптимальну) структуру систем різного цільового призначення і розраховувати показники їх надійності, обґрунтовувати раціональні режими технічного обслу-

говування і ремонту [3–5]. Але вимоги практики висувають перед теорією надійності велику кількість нових, все складніших задач, тому розвиток теорії продовжується. Цей розвиток проявляється не лише в отриманні нових теоретичних результатів, які збагачують наукові основи загальної теорії надійності, але і в поглибленому дослідженні відомими методами окремих, відносно мало вивчених розділів надійності, що мають важливе прикладне значення [6–8]. Одним із них є розділ пов'язаний з питанням використання різних методів резервування для підвищення надійності об'єктів, що досліджені та висвітлені недостатньо [7, 8].

Метою роботи є визначення аналітичних співвідношень для показників надійності об'єктів зі знецінюючими відмовами та урахуванням характеристик контролю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сформулюємо постановку задачі, допущення та обмеження та виберемо математичну модель випадкового процесу, що описує функціонування розглядаємої системи з відмовами, які забезпечують всю виконану роботу (повністю знецінюючими відмовами). Розглянемо відновлюваний об'єкт електронно комунікаційного обладнання (ЕКО) з непоповнюваним резервом часу (систему об'єкт-час), якому доручено деяке завдання (передача повідомлень різної тривалості між вузлами зв'язку в інформаційній мережі, вирішення задач розрахунковими комплексами ЕКО мережі зв'язку та інше), для виконання якого при безвідмовній роботі обладнання необхідний час t_3 [9]. Величина t_3 може бути випадковою або не випадковою. В подальшому для простоти міркувань будемо розраховувати випадок $t_3 = \text{const}$.

При виконанні завдання можуть виникати відмови, які призводять до затримки виконання завдання. Будемо вважати, що напрацювання між відмовами має такий самий розподіл $F(t)$, як і напрацювання до першої відмови, причому $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$. В об'єкті реалізовано ідеальний контроль працездатності, що виявляє будь-які відмови в моменти їх виявлення. Функція розподілу часу відновлення $F_v(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ і не залежить ні від числа попередніх відмов ні від напрацювання на момент відмови. Будемо також вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості об'єкта і після його закінчення негайно відновлюється виконання завдання.

Для поліпшення показників надійності функціонування системи їй виділяється резерв часу t_p . На відміну від системи, яка розглядалась в [10], тут будь-яка відмова об'єкта знецінює всю пророблену

роботу і тому резерв часу витрачається не тільки на відновлення працездатності, але й на повторення знеціненої роботи. Завдання виявляється виконаним, якщо протягом часу t_3 система пропрацює безвідмовно. Внаслідок затримок, обумовлених виникненням і усуненням відмов, а також повторенням попереднього напрацювання реальний час виконання завдання $T_{вз}$ стає випадковою величиною з невідомою функцією розподілу і складається з корисного часу t_3 та непродуктивного витраченого $T_{нп}$, тобто в загальному випадку

$$T_{вз} = t_3 + T_{нп} = t_3 + \sum_{i=1}^k \tau_i + \sum_{i=1}^k t_{вi}, \quad \tau_i < t_3, \quad k \geq 1, \quad (1)$$

де τ_i – інтервали знеціненого корисного навантаження; $t_{вi}$ – інтервали часу ремонту об'єкта після i -ї відмови.

Для сформульованих умов функціонування системи, що розглядається необхідно визначити показники надійності: ймовірність безвідмовного функціонування $P(t_3, t_p)$ протягом виділеного оперативного часу $t = t_3 + t_p$, інтенсивність відмов $\Lambda(t_3, t_p)$ і математичне очікування реального часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3)$. Наведемо математичну модель, що описує процес функціонування досліджуваної системи. Позначимо через t_{2j-1} і t_{2j} ($j \geq 1$) моменти відповідно j -го за рахунком відмови об'єкта і закінчення відновлення його працездатності. Нехай $t_0 = 0$, $\tau_n = t_n - t_{n-1}$, $n = 1, 2, \dots$, та нехай τ_n взаємно незалежні.

Поставимо у відповідність процесу функціонування даного об'єкта випадковий процес $\zeta(t)$, який побудуємо наступним чином. Процес $\zeta(t) = 0$, якщо в момент t об'єкт вільний (завдання відсутні), лінійно зростає на відрізках часу $[t_{2j-2}, t_{2j-1})$, постійний в інтервалах $[t_{2j-1}, t_{2j})$, а в моменти t_{2j} ($j \geq 1$) здійснює стрибок в 0. Для описання процесу функціонування даного об'єкта, очевидно, достатньо задати розподіли проміжків часу, протягом яких він вільний, дисципліну появи завдань різних типів та розглянути підпроцес (позначимо його $\zeta^*(t)$), що обривається в момент $T_{вз}$ першого досягнення рівня t_3 . Підпроцес $\zeta^*(t)$ повністю описує виконання одного завдання, яке в ідеальних умовах має тривалість t_3 . Тому надалі обмежимося розглядом випадкового процесу $\zeta(t) \in [0, \infty)$, який співпадає на відрізку $[0, T_{вз}]$ з підпроцесом $\zeta^*(t)$, але в момент $T_{вз}$ не обривається, а продовжує еволюціонувати за тим же законом, що і до моменту $T_{вз}$ (рис. 1, а).

Відмітимо, що $\zeta(t)$ не є марківським процесом, проте його можна перетворити на марківський за допомогою введення додаткових координат, тобто шляхом включення початкового процесу

$\zeta(t)$ у складніший марківський процес. Введемо випадковий процес

$$\eta(t) = t - \sup \{t_n : n \geq 0, t_n \leq t\},$$

де $\eta(t) = x$, якщо остання зміна траєкторії процесу $\zeta(t)$ (обумовлена виникненням відмови i -го типу або закінченням ремонту об'єкта) відбулася в момент $t_n = t - x$; $t = t_3 + t_p$ – інтервал оперативного часу (рис. 1, б).

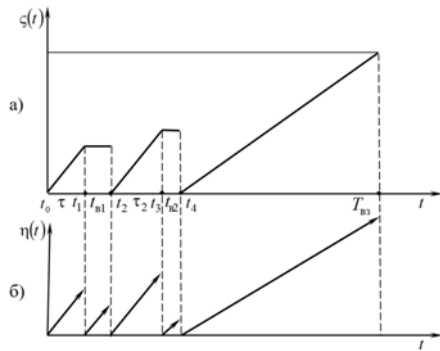


Рис. 1. Графічне зображення випадкового процесу $X(t) = \{\zeta(t), \eta(t)\}$

Тоді двовимірний випадковий процес $X(t) = \{\zeta(t), \eta(t)\}$ представляє собою однорідний марківський процес, ймовірності переходу якого за час Δt мають вид:

$$\left. \begin{aligned} P\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + \Delta t, y + \Delta t, 0)\} &= \frac{1 - F_0(y + \Delta t)}{1 - F_0(y)}, \\ P\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + o(\Delta t), o(\Delta t), i)\} &= \frac{F_i(y + \Delta t) - F_i(y)}{1 - F_0(y)} + o(\Delta t), \\ P\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (o(\Delta t), o(\Delta t), 0)\} &= \frac{F_w(y + \Delta t) - F_w(y)}{1 - F_w(y)} + o(\Delta t), \\ P\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (x, y + \Delta t, i)\} &= \frac{1 - F_w(y + \Delta t)}{1 - F_w(y)}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0$; $x, y \geq 0$.

Процес $X(t)$ відноситься до класу випадкових процесів з дискретним втручанням випадку, якщо «втручання випадку» в нашій схемі визначити як «знесення до нуля», що відбувається в моменти t_{2j} ($j \geq 1$).

Перейдемо до визначення показників надійності системи. Незавжди побачити, що формула (1) пов'язує реальний час виконання завдання $T_{вз}$ з відомими випадковими величинами, що дозволяє знайти невідому функцію розподілу $P\{T_{вз} < t\}$ і математичне очікування $\bar{T}_{вз}$ – першого досягнення процесом $\zeta(t)$ фіксованого рівня t_3 . Ця функція розподілу при заданих значеннях t_3 і t визначає ймовірність безвідмовного функціонування системи як ймовірність виконання завдання:

$$P\{t_3, t_p\} = P\{T_{вз} < t\}, \quad (3)$$

де $t = t_3 + t_p$ – інтервал заданого оперативного часу.

Аналіз можливостей відомих математичних методів для отримання аналітичних залежностей (3) в явному виді показав доцільність використання для вирішення цієї задачі диференційного методу, заснованого на складанні і подальшим розв'язанням диференційного рівняння відносно ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_p)$ [11].

Введемо декілька позначень, які надалі будуть необхідними. Нехай ϵ ряд невід'ємних чисел $C_i \geq 0$, таких що $\sum_i C_i = 1$ ($i \geq 1$) і послідовність випадкової величини Θ_i з функцією розподілу $A_i(t)$ ($i \geq 1$). Тоді під

$$\left\{ \begin{aligned} &\Theta_1 \text{ з ймовірністю } C_1 \\ &\Theta_2 \text{ з ймовірністю } C_2 \\ &\dots \\ &\Theta_i \text{ з ймовірністю } C_i \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Будемо розуміти величину Θ_i з функцією розподілу

$$A_0(t) = P\{\Theta_0 < t\} = \sum_{i \geq 1} C_i A_i(t). \quad (5)$$

Використовуючи перехідні ймовірності процесу $X(t)$ при $F_i(y) = 1 - \exp(-\lambda_i y)$, $F_w(y) = 1 - \exp(-\mu y)$, вирази (4), (5) і формулу повної ймовірності, запишемо наступне стохастичне співвідношення:

$$T_{вз}(x) = \Delta t + \begin{cases} T_{вз}(x + \Delta t) & \text{з ймовірністю } (1 - \lambda \Delta t) + 0(\Delta t), \\ T_{вз}(0) + t_n & \text{з ймовірністю } \lambda \Delta t + 0(\Delta t), \end{cases} \quad (6)$$

де $T_{вз}(x)$ – час виконання завдання за умови, що в момент t_0 початку розгляду процесу функціонування системи завдання вже виконувалося протягом часу x ($x \geq 0$); $T_{вз}(0) = T_{вз}$ – час виконання завдання за умови, що $x = 0$; $0(\Delta t)$ – величина другого порядку малості у порівнянні з Δt .

Позначаючи $\varphi(s, x) = M \exp(-s T_{вз}(x))$, $\varphi(s) = M \exp(-s T_{вз})$, і переходячи в (6) до перетворення Лапласа-Стільтьєсса, одержуємо

$$\varphi(s, x) = (1 - s \Delta t) [\varphi(s, x + \Delta t) (1 - \lambda \Delta t) + \varphi(s) \Delta t \lambda \tilde{F}_w(s) + 0(\Delta t)],$$

звідки після нескладних перетворень приходимо до диференціального рівняння:

$$\frac{\partial \varphi(s, x)}{\partial x} = \varphi(s + x)(s + \lambda) - \varphi(s) \lambda \tilde{F}_w(s), \quad (7)$$

де $\tilde{F}_w(s) = \mu / (s + \mu)$.

Застосовуючи метод варіації сталих [12] і враховуючи, що $\varphi(s, t_3) \equiv 1$, з (7) одержуємо співвідношення

$$\varphi(s, x) = \exp[(s + \lambda)(x - t_3)] + \varphi(s) [1 - \exp((s + \lambda)(x - t_3))] \frac{\lambda \mu}{(s + \lambda)(s + \mu)},$$

з якого, вважаючи $x = 0$ і $\varphi(s, 0) = \varphi(s)$, остаточно визначаємо вираз для перетворення Лапласа-Стільтьєсса функції розподілу часу виконання завдання:

$$\varphi(s) = \frac{(s + \lambda)(s + \mu) \exp[-t_3(s + \lambda)]}{s(s + \lambda + \mu) + \lambda\mu \exp[-t_3(s + \lambda)]}. \quad (8)$$

Застосовуючи до виразу (8) відомі методи обертання перетворення Лапласа-Стільтьєса отримаємо розрахункову формулу для ймовірності безвідмовного функціонування досліджуваної системи:

$$P(t_3, t_p) = \sum_{i=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} [A_i(t_p - it_3) - A_{i+1}(t_p - it_3)] e^{-(i+1)\lambda t_3}. \quad (9)$$

В формулі (9)

$$A_0 = 1, \quad A_i(t) = C_{2i-1}^i(pq)^i + \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(i+j-1)! p^j q^i (\lambda t)^{i-1-j}}{i! j! (i-1-j)!} \times \left[\frac{i(-1)^{i-j} \lambda t}{i-j} - (i+j) q e^{-(\lambda+\mu)t} \right], \quad i \geq 1, \quad (10)$$

де $p = 1 - q = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$; через $\lfloor t_p/t_3 \rfloor$ позначено ціла частина співвідношення t_p/t_3 .

Формули (9) і (10) помітно спрощуються якщо при підсумовуванні обмежитись значеннями $t_p \leq t_3$ і $t_3 \leq t_p \leq 2t_3$. При цих окремих випадках, які характеризують величину використовуваного резерву часу t_{\square} , отримаємо

$$P(t_3, t_p) = e^{-\rho} [1 - A_1(t_p)], \quad t_p \leq t_3, \quad \rho = \lambda t_3, \quad (11)$$

$$\text{де} \quad A_1\left(\frac{x}{\lambda + \mu}\right) = pq(1 - x - e^{-x}), \quad x = (\lambda + \mu)t; \quad (12)$$

$$P(t_3, t_p) = e^{-\rho} [1 - A_1(t_p)] + e^{-2\rho} [A_1(t_p - t_3) - A_2(t_p - t_3)], \quad (13)$$

$$\text{де} \quad A_2\left(\frac{x}{\lambda + \mu}\right) = \binom{2}{2} \left(\frac{x^2}{2} - 2x + 3 - (3+x)e^{-x} \right), \quad t_3 \leq t_p \leq 2t_3, \quad (14)$$

Розглянуті особливості функціонування об'єктів ЕКО зі знецінюючими відмовами дозволяють зробити важливий для інженерної практики висновок про більш слабкі, ніж при незнецінюючих відмовах, залежності $P(t_3, t_p)$ від часу відновлення працездатності t_b . Це можна пояснити тим, що зменшення часу відновлення таких об'єктів скорочує лише одну складову втрат робочого часу, що включає в себе інтервали ремонту, і не зачіпає інтервали корисного напрацювання, знецінені відмовами. Розрахунки показали, що максимальне зменшення часу відновлення t_b практично не призводить за вказаною вище причиною до помітного приросту ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_p)$ об'єкта зі знецінюючими відмовами.

Ця обставина дозволяє зробити два важливих висновка:

1. Основні зусилля щодо підвищення надійності функціонування об'єктів з повністю знецінюючими відмовами доцільно направити на захист ЕКО від вторинних наслідків відмов.

2. Для спрощення отриманих розрахункових формул (9) і (10) можна покласти в них $t_b = 0$. Тоді

$$P(t_3, t_p) = \sum_{i=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} (-1)^i \left[\frac{(\gamma - i\rho)^i}{i!} + \frac{(\gamma - i\rho)^{i+1}}{(i+1)!} \right] e^{-(i+1)\rho}, \quad (15)$$

де $\gamma = \lambda t_p$, $\rho = \lambda t_3$.

Розрахунки показали, що відносна похибка δ наближеної формули (15) не перевищують 10% навіть при відносно великому часі відновлення $\bar{t}_b/t_3 = 2$. При зменшенні цього відношення (при $\bar{t}_b/t_3 < 0,2$) відносна похибка δ не перевищує декількох відсотків (рис. 2).

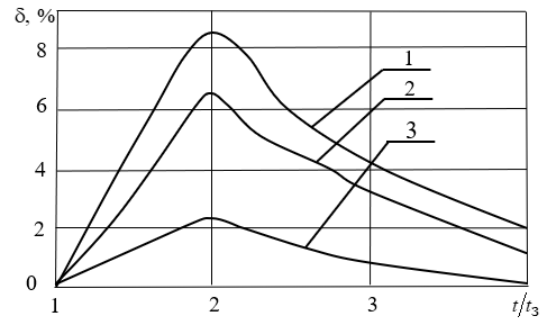


Рис. 2. Залежності відносної похибки δ наближеної формули (15) від величини резерву часу t_p при $t = t_3 + t_p$; $\lambda t_3 = 0,1$:
1 – $\bar{t}_b/t_3 = 2$; 2 – $\bar{t}_b/t_3 = 1$; 3 – $\bar{t}_b/t_3 = 0,2$

Отже, можна стверджувати, що формула (15) є цілком прийнятною для інженерних розрахунків помилкою в широкому діапазоні зміни вихідних умов.

Використовуючи неведений вище вираз для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_p)$, можна отримати розрахункові формули для інтенсивності відмов системи $\Lambda(t_3, t_p)$, оскільки ці два показника надійності пов'язані між собою відомими співвідношеннями:

$$\Lambda(t_3, t_p) = \frac{f(t_3, t_p)}{P(t_3, t_p)} = \frac{\partial}{\partial t_3} \ln P(t_3, t_p), \quad (16)$$

де $f(t_3, t_p)$ – щільність розподілу напрацювання до відмови.

Підставляючи в (16) загальну формулу (9) для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_p)$ і виконуючи необхідні операції, в результаті визначаємо $\Lambda(t_3, t_p)$:

$$\Lambda(t_3, t_p) = \sum_{i=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} e^{-(i+1)\lambda t_3} \left[\lambda(i+1)(A_i(t_p - it_3) - A_{i+1}(t_p - it_3)) + i(A_i^*(t_p - it_3) - A_{i+1}^*(t_p - it_3)) \right] / P(t_3, t_p), \quad (17)$$

$$\text{де} \quad A_i^*(t) = \lambda \binom{2i-2}{i-1} p^i q^{i-1} \left(1 - \frac{2i-1}{i} e^{-(\lambda+\mu)t} \right) + \lambda \sum_{j=0}^{i-2} \frac{(i+j-1)! p^j q^i (\lambda t)^{i-2-j}}{i! j! (i-1-j)!} \times \left[(-1)^{i-j} i \lambda t - (i+j)(q(i-j-1) - \lambda t e^{-(\lambda+\mu)t}) \right].$$

В окремих випадках при $t_p \leq t_3$ і $t_3 \leq t_p \leq 2t_3$ використовуючи вирази (11) – (14) і (16), визначаємо формули для $\Lambda(t_3, t_p)$:

$$\Lambda(t_3, t_p) = \lambda [1 - A_1(t_p)] e^{-\rho} / P(t_3, t_p) = \lambda, \quad t_p < t_3, \quad (19)$$

$$\Lambda(t_3, t_p) = \lambda P(t_3, t_p) + e^{-2\lambda t_3} \left[\lambda A_1(t_p - t_3) - \lambda A_2(t_p - t_3) + A_1^*(t_p - t_3) - A_2^*(t_p - t_3) \right] / P(t_3, t_p), \quad t_3 \leq t_p \leq 2t_3, \quad (20)$$

де $A_1^*(t) = -\lambda p(1 - e^{-x})$, $x = (\lambda + \mu)t$,
 $A_2^*(t) = -\lambda p^2 q(x - 2 + (2 + x)e^{-x})$.

Використовуючи вираз (15) для ймовірності $P(t_3, t_p)$ і формулу (16), отримуємо

$$\Lambda(t_3, t_p) = \lambda(1 + \gamma)e^{-\rho} + \lambda \sum_{i=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} (-1)^i \frac{(\gamma - i\rho)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-(i+1)\rho} \times \left[(2 + 1/i)(\gamma - i\rho) + i + \frac{(\gamma - i\rho)^2}{i} \right] / P(t_3, t_p), \quad (21)$$

де $\gamma = \lambda t_p$, $\rho = \lambda t_3$.

Формулу для математичного очікування часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3)$ в загальному випадку неважко визначити, якщо скористатися виразом (8) і співвідношенням:

$$\bar{T}_{вз}(t_3) = -\varphi'(s)|_{s=0}.$$

В результаті отримаємо

$$\bar{T}_{вз}(t_3) = (\bar{t}_0 + \bar{t}_b)(e^{\lambda t_3} - 1), \quad \bar{t}_0 = \frac{1}{\lambda}, \quad \bar{t}_b = \frac{1}{\mu}. \quad (22)$$

При $\bar{t}_b = 0$

$$\bar{T}_{вз}(t_3) = \frac{e^{\lambda t_3} - 1}{\lambda}. \quad (23)$$

Висновки. Таким чином, отримані моделі надійності системи з часовим резервуванням (резерв часу t_p непоповнюваний), в якій відмови об'єкта знецінюють все попереднє напрацювання, тобто визначені аналітичні співвідношення для ймовірності безвідмовного функціонування розглядаємої системи $P(t_3, t_p)$, для інтенсивності відмов $\Lambda(t_3, t_p)$ і для математичного очікування $\bar{T}_{вз}(t_3)$ при ідеальному контролі працездатності ЕКО об'єкта.

Отримані результати дозволяють перейти до наступного етапу вирішення задачі отримання моделей надійності об'єктів при комплексному використанні різних видів надлишковості, характеристик контролю працездатності елементів об'єкту.

Список літератури:

1. Jan H. Schmidt. Using Fast Frequency Hopping Technique to Improve Reliability of Underwater Communication System. *MDPI*. Basel. 2020. №10 (3). P. 2–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10031172>.
2. She Ch., Liu Ch., Tony Q., Quek S., Yang Ch., Li Y. Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in Unmanned Aerial Vehicle Communication Systems. *Transactions on Communications*. USA. 2019. № 67 (5). P. 3768 – 3781. DOI:10.1109/COMM.2019.2896184.
3. Sandelic M., Peyghami S., Sangwongwanich A., Blaabjerg F. Reliability aspects in microgrid design and planning: Status and power electronics-induced challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Belfast, 2022. № 2. P. 1 – 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112127>.
4. Князева Н.О., Колумба І.В. Використання базових структурних характеристик мережі невизначеної топології для оцінки її структурної надійності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. С. 130–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_6_27. (дата звернення: 8.01.24).
5. Лемешко О.В., Єременко О.С., Невзорова О.С. Поточкові моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість: посібник. Харків, 2020. С. 308.
6. Сенів М., Роїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87–91. DOI:10.36930/40310613.
7. Ahmed, N. O., Bhargava, B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. № 8(3), P. 847–860. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCC.2018.2814989>.
8. Li Ch, Qi P., Wang D., Li Z On the Anti-Interference Tolerance of Cognitive Frequency Hopping Communication Systems. *Transactions on Reliability*. USA. 2020. № 69 (4). P. 1453-1464. DOI:10.1109/TR.2020.30021.
9. Кононова І.В., Дубина В.О. Комплексне використання надлишковості для підвищення надійності комунікаційного обладнання. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 5. С. 40–45. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/08>.
10. Креденцер Б.П., Буточнов С.М., Міночкин А.І., Могилевич Д.І. Надійність системи з надлишковою: методи, моделі, оптимізація: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 342 с.
11. Mogylyevych D., Kononova I., Kredentser B., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. 2020. № 80. С. 39 – 47. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>.
12. Kredentser B., Mogylyevych D., Subach I., Kononova I. Taking into Account a Priori Uncertainty in the Model of Maintenance of Objects with Time Redundanc. *IT&I–2021 Information Technology and Implementation*. 2021. Vol. 1. P. 180–193. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3179/Paper_17.pdf. (дата звернення: 5.01.24).

Dubyna V.O., Kononova I.V. RELIABILITY MODELS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT OBJECTS TAKING INTO ACCOUNT CONTROL CHARACTERISTICS

The problem of reliability has not lost its relevance, but, on the contrary, has become even more acute. This is due to a number of objective reasons, in particular, the continuous growth in the complexity and responsibility of the functions performed by modern technical systems, the complexity of the structure of these systems, the increase in the number of components and connections between them, as well as a significant expansion of the range of operating conditions. All this is accompanied by increased requirements for the reliability of such systems. These and other reasons are due to the rapid scientific and technological progress that has been observed in recent decades in many fields of technology: communication technologies, computer science, informatics, etc. It has been determined that the efficiency of a complex system is significantly affected by the reliability of its component subsystems and elements. Despite the fact that by now the quality of the element base has significantly improved, the growth of system complexity is still ahead of the rate of increase in the reliability of elements, which does not always allow to ensure high (or a given) reliability of the system as a whole.

The analysis of the peculiarities of functioning of electronic communication equipment of communication networks has revealed a number of factors that significantly affect the efficiency and reliability of these systems. Some of the most significant factors may affect the unproductive use of working (operational) time and the deterioration of some reliability indicators.

The models take into account the factors that affect the reliability of facilities in real operating conditions. The paper considers the process of functioning of a restorable electronic communication equipment object with a non-replenishable time reserve and perfect performance control.

Reliability models are proposed that establish a link between the reliability indicators of an object (in our case, an electronic communication equipment object), the reliability characteristics of its structure elements, and the parameters of the object's functioning process.

Key words: *reliability models, electronic communication equipment, impairing failures, communication systems, redundancy.*

Єрохін В.Ф.

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

Толстова А.В.

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

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ СИНТЕЗУ ДЕМОДУЛЯТОРА ВЗАЄМНО НЕОРТОГОНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ВФМ-2

В останній час бурхливий розвиток одержала так звана Multiuser detection theory (MDT) – це один напрямок в подоланні проблеми повторного використання каналного ресурсу. Однак результати зазначеної теорії характеризуються експоненціальною залежністю складності синтезованих алгоритмів розділення-демодуляції від низки чинників – кількості взаємно неортогональних сигналів, їх асинхронізму, випадковості випромінювання. Підоптимальні підходи в Multiuser detection theory такої ваді не мають, але їм зазвичай припадні суттєві втрати в енергетиці у порівнянні з оптимальними.

В статті представлені методика і результати синтезу методами MDT алгоритму розділення-демодуляції двох взаємно неортогональних асинхронних за тактовими точками сигналів відносної двійкової фазової маніпуляції, оптимального за критерієм мінімуму імовірності помилки в оцінці кожного з їх дискретних інформаційних параметрів. Продемонстровано, що такий оптимальний алгоритм внаслідок асинхронізму за тактовими точками взаємно неортогональних сигналів виявляється надто складним. Наводяться перетворення синтезованого оптимального алгоритму до спрощених евристичних представлень, прийнятних з точки зору технічної реалізації. Висувається припущення про асимптотичну оптимальність спрощеного евристичного алгоритму розділення-демодуляції, який, до того ж, на відміну від синтезованого, припускає прозоре фізичне трактування. Тобто, пропонується технічно прийнятний асимптотично оптимальний алгоритм розділення-демодуляції двох взаємно неортогональних двійкових сигналів з протилежними інформаційними станами, асинхронних за тактовими точками. Показано також, що алгоритм розділення-демодуляції двох асинхронних взаємно неортогональних сигналів відносної фазової маніпуляції можна звести до незалежної обробки на суміжних тактових інтервалах. Продемонстровано, що складність алгоритму розділення-демодуляції, що породжується їх асинхронізмом, може бути подолана шляхом асимптотичних наближень нелінійних функцій типу $\text{th}(\bullet)$ за умови перевищення за одиницю абсолютних значень їх аргументів.

Ключові слова: цифровий сигнал, розділення-демодуляція, тактовий інтервал, асинхронізм, апостеріорна імовірність, кореляційний інтеграл, правило прийняття рішень, завадозахист, радіозасіб.

Постановка проблеми. В теорії багатокористувацького детектування (БКД) [1] існує відгалуження, яке передбачає можливість синтезу алгоритмів розділення – демодуляції, оптимальних за критерієм мінімуму імовірності помилки в оцінці окремо кожного з дискретних параметрів (ДП) взаємно неортогональних сигналів, що підлягають розділенню – так звана статистична теорія розділення цифрових сигналів (ЦС) [2, 3 та ін.]. На відміну від багатьох інших напрямків в теорії БКД це відгалуження дозволяє одержувати відповіді на питання про потенційні можливості розділення-демодуляції, що збагачує теорію потенційної завадостійкості.

Платнею за вибір вищезазначеного критерію оптимальності є експоненціальне зростання

складності відповідних алгоритмів від кількості ЦС, що підлягають розділенню [1]. Виявляється також, що навіть коли кількість взаємно неортогональних сигналів мінімальна (більше двох), алгоритми розділення-демодуляції виявляються нетривіальними (див, наприклад, [2, 3]). Тому актуальними є задачі пошуку підоптимальних (асимптотично оптимальних) алгоритмів, прийнятних за складністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експоненціальне зростання складності алгоритмів розділення-демодуляції взаємно неортогональних цифрових сигналів в залежності від їх кількості було вперше продемонстровано в [1]. Ця залежність була підтверджена значною кількістю робіт (див., наприклад [2, 3]), де виявилось, що за

критерієм мінімуму імовірності помилки в оцінці дискретних інформаційних параметрів кожного з сигналів, що підлягають розділенню, додаткове зростання складності алгоритмів розділення-демодуляції породжується асинхронізмом сигналів за тактовими точками. Водночас в реальних умовах тактовий синхронізм незалежних користувачів майже неможливий.

Метою статті є розробка методики і синтез алгоритму розділення-демодуляції двох взаємно неортогональних сигналів відносної фазової маніпуляції (ВФМ-2) асинхронних за тактовими точками.

Методика і результати синтезу алгоритму розділення-демодуляції

Модель спостереження (рис. 1, аналогічно [4]) можна представити у вигляді:

$$y_t = s_c [r_c^{k-2}, t \in [t_{k-3} + \tau, t_{k-2}]] + s_c [r_c^{k-1}, t \in [t_{k-2}, t_{k-1}]] + s_c [r_c^k, t \in [t_{k-1}, t_k]] + s_c [r_c^{k+1}, t \in [t_k, t_k + \tau]] + s_3 [r_3^{k-2}, t \in [t_{k-3} + \tau, t_{k-2} + \tau]] + s_3 [r_3^{k-1}, t \in [t_{k-2} + \tau, t_{k-1} + \tau]] + s_3 [r_3^k, t \in [t_{k-1} + \tau, t_k + \tau]] + n(t). \quad (1)$$

В моделі (1) s_c, s_3 – інтегровані з квадратом функції – несвіні коливання сигналу та завади;

$r_c, r_3 = \overline{0,1}$ – дискретні параметри сигналу і завади відповідно;

$\tau \in [0, T)$ – зсув між тактовими точками сигналу і завади;

$T = t_k - t_{k-1}$ – протяжність інформаційного тактового інтервалу; що відповідно моделі (1) у сигналу і завади співпадає;

$n(t)$ – адитивний білий гаусівський шум (АБГШ);

$$\tau \in [0, T).$$

Апостеріорні імовірності станів групового ДП $r_2 = (r_c^{k-2}, r_c^{k-1}, r_c^k, r_c^{k+1}, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k)$, що формально

утворюються станами індивідуальних ДП сигналу і завади, в каналі з постійними параметрами і АБГШ (див, наприклад [5] та ін.):

$$p(r_2 / y_t) = \frac{p(r_2) \exp B(r_2 / y_t)}{\sum_{r_2'} p(r_2') \exp B(r_2' / y_t)}. \quad (2)$$

У випадку рівноімовірних взаємно незалежних апіорних станів групового ДП $r_2 = \overline{0, 2^7 - 1}$ (для двійкових ДП $r_c, r_3 = \overline{0,1}$) вираз (2) спроститься:

$$p[r_2 = (r_c^{k-2}, r_c^{k-1}, r_c^k, r_c^{k+1}, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k) / y_t] \sim p[\hat{r}_2 = (r_c^{k-1}, r_c^k, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k) / y_t] \sim \exp B(r_c^{k-1}, r_c^k, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k / y_t) / \sum_{r_c^{k-1}=0}^1 \sum_{r_c^k=0}^1 \sum_{r_3^{k-2}=0}^1 \sum_{r_3^{k-1}=0}^1 \sum_{r_3^k=0}^1 \exp B(r_c^{k-1}, r_c^k, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k / y_t). \quad (3)$$

При спрощенні в (3) також враховано, що при висуванні гіпотез щодо пари суміжних станів ДП (r_c^{k-1}, r_c^k) і формуванні відповідних апостеріорних імовірностей беруться до уваги лише стани трійки ДП $(r_c^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k)$ завади, а попередній (r_c^{k-2}) та наступний (r_c^{k+1}) стани ДП корисного сигналу не враховуються, тобто $\hat{r}_2 = \overline{0, 2^5 - 1}$. Нас цікавить вплив завади на сигнал на суміжних двох тактових інтервалах $t \in [t_{k-2}, t_k)$, де формуються кореляційні інтеграли b_c^{k-1}, b_c^k та знаки при них відповідно гіпотез щодо пари станів ДП сигналу r_c^{k-1} та r_c^k .

Формування знаків у трійки кореляційних інтегралів $b_3^{k-2}, b_3^{k-1}, b_3^k$ також виконується відповідно до гіпотез щодо станів ДП завади $r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k$. Тобто, процедури формування знаків величин $b_c^{k-1}, b_c^k, b_3^{k-2}, b_3^{k-1}, b_3^k$ залежать лише від гіпотез про стани відповідних ДП $r_c^{k-1}, r_c^k, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k$. В загаль-

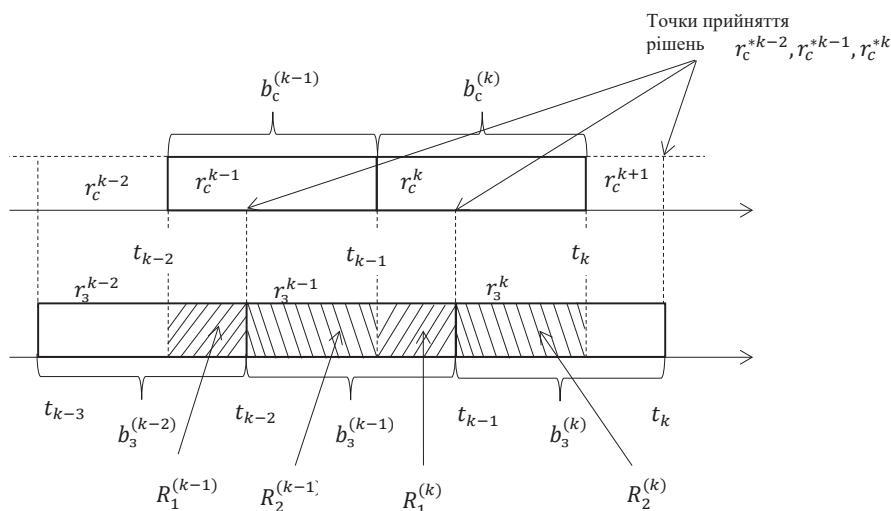


Рис. 1. Модель спостереження

ному випадку врахування впливу корисного сигналу на величини b_3^{k-2}, b_3^k на інтервалах $[t_{k-3} + \tau, t_{k-2})$ та $[t_k, t_k + \tau)$ відповідно можливе, але, очевидно, недоцільне, якщо енергетика завади суттєво перевищує енергетику корисного сигналу. Однак з метою уточнення оцінки впливу такого нехтування поведінку ДП сигналу r_c^{k-2}, r_c^{k+1} можна буде врахувати при оцінці завадостійкості розділення.

В (3) інтеграл від сигнальної функції

$$B(r_c^{k-1}, r_c^k, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k / y_i) = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-3}+\tau}^{t_k+\tau} |y_i - (-1)^{k-1} s_c(t) - (-1)^k s_c(t) - (-1)^{k-2} s_3(t) - (-1)^{k-1} s_3(t) - (-1)^k s_3(t)|^2 dt \sim \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-3}+\tau}^{t_k+\tau} [(-1)^{k-1} \times y_i s_c(t) + (-1)^k y_i s_c(t) + (-1)^{k-2} y_i s_3(t) + (-1)^{k-1} y_i s_3(t) + (-1)^k \times y_i s_3(t) - 2(-1)^{k-2+k} s_3(t) s_c(t) - 2(-1)^{k-1+k} s_3(t) s_c(t) - 2(-1)^{k-1+k} s_3(t) s_c(t) - 2(-1)^{k-2+k} s_3(t) s_3(t)] dt \sim (-1)^{k-1} b_c^{k-1} + (-1)^k b_c^k + (-1)^{k-2} b_3^{k-2} + (-1)^{k-1} b_3^{k-1} + (-1)^k b_3^k - 2(-1)^{k-2+k} R_1^{(k-1)} - 2(-1)^{k-1+k} R_2^{(k-1)} - 2(-1)^{k-1+k} R_1^{(k)} - 2(-1)^{k-2+k} R_2^{(k)}.$$

При одержанні (4) множники під інтегралом виду $y_i; s_c^2(t); s_3^2(t)$ спростовані як такі, що є однаковими для будь-яких комбінацій r_c, r_3 і тому не вплинуть на функціонування двійкового правила прийняття рішень (ППР), що синтезується.

В (4) використані позначення (див рис. 1):

$$b_c^{k-1} = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-2}}^{t_k-1} y_i s_c(t) dt; \quad b_c^k = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_i s_c(t) dt; \\ b_3^{k-2} = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-3}+\tau}^{t_k-2+\tau} y_i s_3(t) dt; \\ b_3^{k-1} = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-2}+\tau}^{t_k-1+\tau} y_i s_3(t) dt; \quad b_3^k = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}+\tau}^{t_k+\tau} y_i s_3(t) dt; \\ R_1^{k-1} = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-2}}^{t_k-2+\tau} s_c(t) s_3(t) dt; \quad R_2^{k-1} = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-2}+\tau}^{t_k-1} s_c(t) s_3(t) dt; \\ R_1^k = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k-1+\tau} s_c(t) s_3(t) dt; \quad R_2^k = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}+\tau}^{t_k} s_c(t) s_3(t) dt.$$

де N_0 – одностороння спектральна щільність потужності АБГШ в моделі (1).

Тепер, використовуючи (3), одержимо вирази для апостеріорних імовірностей станів ДП корисного сигналу (знаменник в (3) як позитивний і однаковий для всіх r_i при цьому спростуємо):

$$P(r_c^k = 1 / y_i) = p(r_c^k \neq r_c^{k-1} / y_i) = \sum_{r_c^k=1-r_c^{k-1}=0} \sum_{r_3^{k-2}=0} \sum_{r_3^{k-1}=0} \sum_{r_3^k=0} \rightarrow \\ \rightarrow \exp B(r_c^k = 1 - r_c^{k-1}, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k / y_i); \\ P(r_c^k = 0 / y_i) = p(r_c^k = r_c^{k-1} / y_i) = \sum_{r_c^k=r_c^{k-1}=0} \sum_{r_3^{k-2}=0} \sum_{r_3^{k-1}=0} \sum_{r_3^k=0} \rightarrow (5) \\ \rightarrow \exp B(r_c^k = r_c^{k-1}, r_3^{k-2}, r_3^{k-1}, r_3^k / y_i).$$

В результаті ППР $r_c^k = \text{rect}[p(r_c^{k-1} \neq r_c^k / y_i) - p(r_c^{k-1} = r_c^k / y_i)]$ із залученням (4), (5) та громіздких перетворень,

що не впливають на знак аргументу в ППР та після спростування невід’ємних множників, однакових для всіх складових аргументу ППР, а також перетворень комбінацій функцій $\exp(\odot)$ в комбінації гіперболічних функцій $sh(\odot), ch(\odot), th(\odot), Arth(\odot)$ одержуємо вираз для ППР у виді:

$$r^* = \text{rect}(-thath\beta - thathbthxthya.th\beta - thcthdthozthztha.th\beta - thathbthc \times thdthxthztha.th\beta - thathcthxthy - thbthc - thathdthxthz - thbthdthythz + thathxth\beta + thbthyth\beta + thathcthdthxthythzth\beta + thbthcthdthzth\beta + thcthytha + thathbthcthxtha + thdthztha + thathbthdthxthythztha).$$

Тут $\text{rect}(x \geq 0) = 1; \text{rect}(x < 0) = 0$.

В (6) і далі з метою скорочення записів застосовані позначення: $R_1^{k-1}=a, R_2^{k-1}=b, R_1^k=c, R_2^k=d, b_3^{k-2}=x, b_3^{k-1}=y, b_3^k=z, b_c^{k-1}=\alpha, b_c^k=\beta$.

ППР (6) виявилось доволі громіздким, тому знайдемо шлях до його менш складного представлення.

Спрощуючі перетворення і редукція розділення-демодуляції.

Для цього припустимо, що, аналогічно [3] для спостереження на двох суміжних тактових інтервалах аргумент ППР (6) можна представити в виді:

$$(-\alpha + Arth(thxtha) + Arth(thythb))(\beta - Arth(thythc) + Arth(thzthd)) = \\ = \left(-\alpha + Arth \frac{thxtha + thythb}{1 + thxthaythb} \right) \left(\beta - Arth \frac{thythc + thzthd}{1 + thythcthd} \right) - (-tha - thxthaythbtha + thxtha + thythb)(th\beta + thythcthdth\beta - thythc - thzthd)$$

При заміні в (7) $th^2 y = 1$, вважаючи, що $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} th^2 x = 1$, маємо представлення (6).

Також і навпаки – з аргументу ППР (6) можна одержати вираз (7), якщо помножити в (6) на $th^2 y$ ті складові, що співпадають зі складовими аргументу ППР (7) з точністю до цього множника.

Тоді з аргументу ППР (6) отримуємо (7).

Далі застосуємо загальновідому функцію $Sign(x \geq 0) = 1; Sign(x < 0) = -1$. Якщо $|x| \gg 1, |y| \gg 1, |z| \gg 1$ то $thx \rightarrow Signx; thy \rightarrow Signy; thz \rightarrow Signz$; Окрім того, $Sign^2(\odot) = 1$, як наслідок.

Тоді з (7) отримуємо:

$$-thath\beta - thcthdSignySignztha.th\beta + thcSignytha + thdSignztha - tha \times thbSignxSignytha.th\beta - thathbthcthdSignxSignztha.th\beta + thathbthc \times Signxtha + thathbthdSignxSignySignztha + thaSignxth\beta + thathcthd \times SignxSignySignzth\beta - thathcSignxSigny - thathdSignxSignz + thb \times Signyth\beta + thbthcthdSignzth\beta - thbthc - thbthdSignySignz.$$

Перевіримо тепер гіпотезу «з кінця» для цього випадку, коли аргумент ППР – виду:

$$[-\alpha + Arth(Signxtha) + Arth(Signythb)] \times [\beta - Arth(Signythc) - Arth \times (Signzthd)] = (-\alpha + a Signx + b Signy) \times (\beta - c Signy - d Signz) = -\alpha\beta + \alpha c Signy + \alpha d Signz + \beta a Signx + ac SignxSigny - bd SignxSignz + \beta b \times Signy - bc - bd SignySignz.$$

Тут не 16, як в (8), а лише 9 складових. Це тому, що застосовані перетворення, що не впливають на знак аргументу ППР, але вони – нелінійні:

$$Arth(thathb) \rightarrow Arth(Signathb) = bSigna.$$

Однак це позбавляє нас необхідності застосування представлень виду

$$Artha + Arthb = Arth \frac{tha + thb}{1 + thathb}.$$

Тепер перегрупуємо (8):

$$-tha.th\beta(1 + thcthdSignySignz + thathbSignxSigny + thathbthcthdSignx \times SignySignz) + tha(thcSignz + thdSignz + thathbthcSignx + thathbthdSignx \times SignySignz) + th\beta(thcSignx + thbSigny + thathcthdSignxSignySignz + thbthcthdSignz) - thathcSignxSigny - thathdSignxSignz - thbthd \times SignySignz - thbthc. \quad (10)$$

Далі, аргумент (10) може бути представлений у виді суми чотирьох добутоків:

$$-tha.th\beta(1 + thcthdSignySignz)(1 + thathbSignxSigny) + (thbSignx \times SignySignz + thaSignz)(thcSignxSignySignz + thdSignx) + tha(thathb \times Signz + SignxSignySignz)(thcSignxSignz + thdSignxSigny) + th\beta(thc \times thdSignx + SignxSignySignz)(thaSignySignz + thbSignxSignz). \quad (11)$$

Поділимо одержане представлення (11) аргументу ППР на позитивний вираз $(1 + thcthdSignySignz)(1 + thathbSignxSigny)$, що не вплине на його знак і, відповідно, на функціонування ППР:

Маємо:

$$-(tha - Signxth(a+bSignxSigny)) \times (th\beta - Signzth(d+cSignySignz)) \sim (-\alpha + aSignx + bSigny)(\beta - dSignz - cSigny). \quad (12)$$

Такимчином, громіздкий вираз (8) для аргументу ППР зводиться до достатньо простого виду (9), який, крім того, припускає прозоре фізичне пояснення – на кожному з двох тактових інтервалів вплив завади (взаємні енергії сигналу і завади) компенсуються незалежно. Окрім того, рішення r_1^* про значення ДП корисного першого сигналу можна приймати окремо на кожному з двох суміжних тактових інтервалів.

Остаточно, з урахуванням припущення (9) та представлень аргументу ППР у виді (7), (12) маємо наступні варіанти ППР (повернемось до введених раніше позначень):

При обробці на двох тактових інтервалах:

$$r_c^{*k} = \text{rectl}[-b_c^{k-1} + \text{Arth}(thb_3^{k-2}th2R_1^{k-1}) + \text{Arth}(thb_3^{k-1}th2R_2^{k-1})](b_c^k - \text{Arth}(thb_3^{k-1}th2R_1^k) - \text{Arth}(thb_3^kth2R_2^k)); \quad (13)$$

$$r_c^{*k} \in \{0, 1\}.$$

При прийнятті рішень r_c^* окремо на кожному з двох суміжних тактових інтервалів:

$$\hat{r}_c^{*k} = \text{Sign}[-b_c^k + \text{Arth}(thb_3^{k-1}th2R_1^k) + \text{Arth}(thb_3^kth2R_2^k)]; \quad (14)$$

$$\hat{r}_c^{*k} \in \{-1, 1\}.$$

За умови $|b_3| \gg 1$ згідно (12) маємо:

$$r_c^{*k} = \text{rectl}[-b_c^{k-1} + 2R_1^{k-1} \text{Sign}b_3^{k-2} + 2R_2^{k-1} \text{Sign}b_3^{k-1}](b_c^k - 2R_1^k \text{Sign}b_3^{k-1} - 2R_2^k \text{Sign}b_3^k). \quad (15)$$

Або при прийнятті рішень окремо на суміжних тактових інтервалах:

$$\hat{r}_c^{*k} = \text{Sign}(-b_c^k + 2R_1^k \text{Sign}b_3^{k-1} + 2R_2^k \text{Sign}b_3^k). \quad (16)$$

Відповідний зв'язок між рішеннями \hat{r}_c^{*k} і r_c^* в ППР (13)–(16):

$$r_c^{*k} = (1 - \hat{r}_c^{*k-1} \hat{r}_c^{*k}) / 2 \quad \hat{r}_c^{*k-1} \hat{r}_c^{*k} = -(-1)^{r_c^{*k}}$$

Запропоновані варіанти ППР (13)–(16) передбачають когерентну (квазікогерентну) завадозахищену обробку як завади, так і корисного сигналу. Однак одержаний результат аналогічно [6] може бути розвинутий на випадок квадратурної (некогерентної) обробки корисного сигналу за обов'язкової умови, що завада обробляється когерентно (квазікогерентно).

Варіант (13) спрощеного алгоритму розділення-демодуляції [7] на двох тактових інтервалах наведений на рис. 2.

Нагадаємо, що в моделі (1) передбачається, що тактові точки сигналу і завади не співпадають. Тому рішення r_1^* про стан ДП корисного сигналу слід приймати в точці $t_k + \tau$. Значення α і β треба запам'ятовувати на інтервал часу $T + \tau$, значення x і a – на інтервал часу $2T$, значення y і c треба запам'ятовувати на інтервал T до моменту прийняття рішення r_1^* в точці $t_k + \tau$.

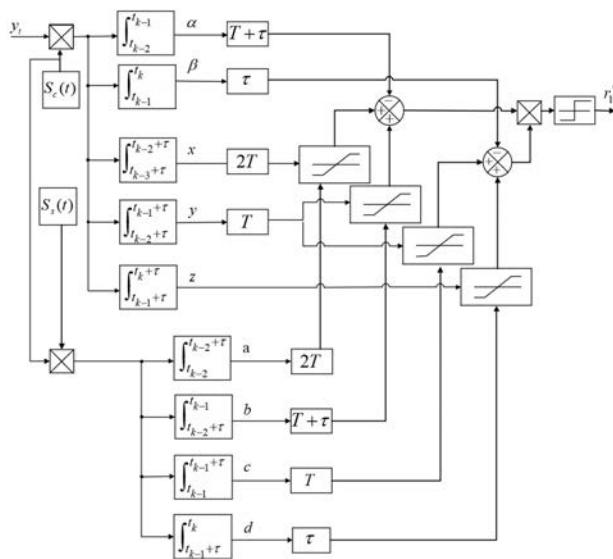


Рис. 2. Алгоритм розділення-демодуляції сигналу ВФМ-2 в умовах впливу подібної асинхронної завади

Висновки. Оптимальний алгоритм демодуляції ВФМ-2 сигналу за критерієм мінімуму імовірності помилки в оцінці r_1^* інформаційного ДП корисного сигналу в умовах впливу асинхронної подібної потужної завади внаслідок обробки на двох суміжних тактових інтервалах виявляється надто складним і тому представляється технічно неприйнятним.

За умов відмінності в миттєвих потужностях сигналу і завади в 6 дБ та більше (завада вважається потужнішою) апроксимація функцій виду $th(-)$

функціями $Sign(\cdot)$ ППР (5) радикально спрощуються – на заміну 64 функцій $\exp(\cdot)$ з 4–5 доданками в їх аргументах або після еквівалентних перетворень – 72 функцій виду $th(\cdot)$ з однією складовою в їх аргументах (6) – до 8 функцій виду $th(\cdot)$ та двох функцій виду $Arth(\cdot)$ (13).

Одержане перетворення аргументу ППР дозволяє звести алгоритм розділення-демодуляції ВФМ-2 сигналу і подібної завади до послідовної обробки окремо на суміжних тактових інтерва-

лах, що, в свою чергу, додатково спрощує ППР приблизно вдвічі.

Максимального спрощення аргументу ППР (6) можна одержати за умов відмінності між миттєвими потужностями ВФМ-2 сигналу і подібної завади не менше, ніж в 6 дБ (потужнішою передбачається завада) та значень кореляційного інтегралу завади орієнтовно від 10 дБ. За таких умов аргументи ППР (13)–(16) будуть містити лише тривіальні функції виду $rect(\cdot)$ та $Sign(\cdot)$

Список літератури:

1. Verdu S. Multiuser detection. Cambridge: Cambridge University Press. 1998. P. 474.
2. Єрохін В.Ф., Ірха М.С. Методики та результати синтезу і аналізу асинхронної переривчастої завади, подібної до корисного фазоманіпульованого сигналу. *Visnyk NTUU KPI Seria Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 2020. Iss. 82. P. 14–24. DOI: 10.20535/RADAR.2020.8.2.14-24.
3. Єрохін В.Ф., Карплюк В.В. Алгоритм компенсації подібної сигналу асинхронної завади з двійковою фазовою маніпуляцією. *Збірник наукових праць. Київ: ІСЗЗІ НТУУ КПІ*. 2017. Вип. 2(2). С. 27–35.
4. Ashwini A. Borkar. Asynchronous multiuser decorrelating detector for AWGN channel. Theses. New Jersey Institute of Technology. 1996. 31 p.
5. Долгов В.І. Основи статистичної теорії прийому дискретних сигналів. Харків вид. «Форт». 2013. 520 с.
6. Єрохін В.Ф., Крутофіст І.М. Алгоритм демодуляції, що забезпечує повторне використання частот цифрового радіомовлення. *Київ: ДУТ, Захист інформації*. 2005. № 25. С. 42–47.
7. Єрохін В.Ф., Толстова А.В. Технологічні представлення алгоритму розділення-демодуляції сигналів відносної PSK. *II Міжнародна науково-практична конференція «Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів»* (Київ, 25 травня 2023 р.), в 2 т. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Т. 1. С. 313–314.

Yerokhin V.F., Tolstova A.V. METHODOLOGY AND RESULTS OF THE SYNTHESIS OF A DEMODULATOR OF MUTUALLY NON-ORTHOGONAL SIGNALS VFM-2

Recently, the so-called Multiuser detection theory (MDT) has received rapid development – another direction in overcoming the problem of channel resource reuse. However, the results of the mentioned theory are characterized by the exponential dependence of the complexity of the synthesized separation-demodulation algorithms on a number of factors – the number of mutually non-orthogonal signals, their asynchrony, randomness of radiation. Suboptimal approaches in Multiuser detection theory do not have such a defect, but they usually have significant losses in energy compared to optimal ones.

The article presents the procedure and results of the synthesis by MDT methods of the separation-demodulation algorithm of two mutually non-orthogonal asynchronous relative binary phase manipulation signals based on clock points, optimal according to the criterion of the minimum probability of error in the estimation of each of their discrete information parameters. It is demonstrated that such an optimal algorithm is too complicated due to the asynchrony at clock points of mutually non-orthogonal signals. An assumption is put forward about the asymptotic optimality of the simplified heuristic separation-demodulation algorithm, which, moreover, unlike the synthesized one, assumes a transparent physical interpretation. Transformations of the synthesized optimal algorithm to simplified heuristic representations acceptable from the point of view of technical implementation are given. That is, a technically acceptable asymptotically optimal algorithm for the separation-demodulation of two mutually non-orthogonal binary signals with opposite information states, asynchronous in clock points, is proposed. It is also shown that the separation-demodulation algorithm of two asynchronous mutually non-orthogonal signals of relative phase manipulation can be reduced to independent processing on adjacent clock intervals. It is demonstrated that the complexity of the separation-demodulation algorithm, caused by their asynchrony, can be overcome by asymptotic approximations of nonlinear functions of the type provided that the absolute values of their arguments are exceeded by one.

Key words: digital signal, separation-demodulation, clock interval, asynchrony, posterior probability, correlation integral, decision-making rule, failure protection, radio device.

УДК 004.942

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07>**Кононова І.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тихонов М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена аналізу результатів комплексної оцінки показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання при відмовах і збоях технічних та програмних компонентів. Сучасні електронні комунікаційні мережі складаються з об'єктів електронного комунікаційного обладнання, які є інтегрованими системами, що включають в себе як технічні, так і програмні компоненти. Визначено, що об'єктом теоретичного дослідження є процеси функціонування електронного комунікаційного обладнання в умовах обмеженої надійності як технічних, так і програмних компонентів.

Проведено теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з використанням моделей, яке дозволило кількісно оцінити вплив на показники надійності обладнання різних факторів при їх сумісному урахуванні.

У статті наведено результати кількісної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання в умовах відмов та збоїв технічних і програмних засобів обладнання з урахуванням можливості розбиття виконуваних завдань на послідовно виконувані етапи з запам'ятовуванням проміжних результатів.

На основі аналізу результатів розрахунку виявлено деякі особливості та властивості комбінованого часового резервування, що показує ефективність використання цього методу для боротьби зі збоями та знецінюючими відмовами об'єктів комунікаційного обладнання.

Результати оцінки показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання дозволять в подальшому визначити оптимальні стратегії управління відмовами і збоями та підвищити стійкість комунікаційного обладнання.

Ключові слова: *технічні компоненти, показники надійності, збої, відмови, електронне комунікаційне обладнання, резерв часу.*

Постановка проблеми. У сучасному інформаційному суспільстві об'єкти електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної передачі та обробки інформації. З усильним зростанням обсягів даних та складності мережевих систем виникає загострення питань щодо надійності цих об'єктів, а також необхідність обґрунтування практичних рішень та розробці інтегрованих стратегій, які можуть бути використані для підвищення показників надійності ЕКО у реальних умовах функціонування. Надійність ЕКО залежить від надійності як технічних, так і програмних компонентів. Для підвищення надійності об'єктів ЕКО можна використовувати різні методи, включаючи комбіноване часове резервування. Для обґрунтування найбільш ефективних шляхів і методів забезпечення необхідного рівня показників надійності ЕКО в умовах комплексної взаємодії різних фак-

торів доцільно проводити кількісну оцінку надійності функціонування об'єктів ЕКО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні та зарубіжні вчені займалися розробкою математичних моделей і методів аналізу надійності як технічних систем, так і програмного забезпечення [1–7]. Але аналіз сучасних досліджень показав, що деякі з них обмежуються аналізом лише технічних аспектів та ігнорують вплив програмного забезпечення на показники надійності ЕКО в цілому, або ці роботи фокусуються на дослідженні програмних помилок, виявленні їх причин, проявів та наслідків. Проте, у цих дослідженнях практично відсутні результати, що сумісно описують вплив обмеженої надійності програмного забезпечення на надійність технічної компоненти та на надійність функціонування об'єкту ЕКО в цілому.

Метою роботи є оцінка результатів теоретичного дослідження впливу різних факторів на

показники надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах обмеженої надійності технічних та програмних засобів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінка надійності об'єктів з різними типами відмов. На рис. 1–3 наведено графіки залежності ймовірності відмови системи об'єкт-час $Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - P(t_3, t_d, t_p)$ від значень параметрів t_d і t_p використовуваного комбінованого резерву часу при виникненні в об'єкті різних типів відмов: незнецінюючих і (або) знецінюючих попереднє напрацювання ($0 \leq p \leq 1$). На рисунках прийнято позначення

$$\lambda^* = \lambda q = \lambda(1 - F_b(t_d)) = \lambda e^{-\mu t_d}. \quad (1)$$

Аналіз графіків дозволяє встановити наступне:

1. При невеликих кратностях непоповнюваного резерву часу $m_i = t_p / t_3$ і $q = \text{const}$ ймовірність відмови системи зменшується незначно. В цьому випадку ефективнішим виявляється збільшення поповнюваного резерву часу (зменшення ймовірності q). Так, зменшення ймовірності q на порядок призводить до зменшення приблизно в стільки ж разів ймовірності відмови системи $Q(t_3, t_p, t_d)$. При $m_i > 0,8 - 0,9$ ефективність часового резервування за рахунок збільшення непоповнюваної складової різко зростає (рис. 1).

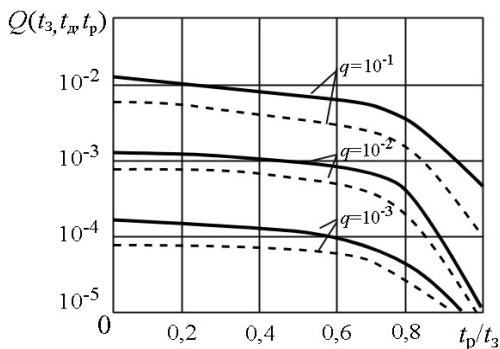


Рис. 1. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_p/t_3 ; $t_3 = \text{const}$; $\lambda^* t_3 = 0,1$ при заданих значеннях $q = \exp(-\mu t_d)$:
 ————— $p = 0$; - - - - - $p = 0,5$

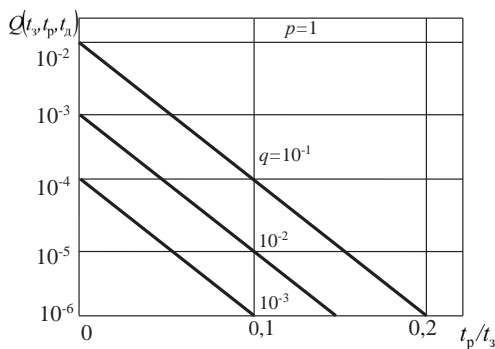


Рис. 2. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_p/t_3 при $p = 1$; $t_3 = \text{const}$; $\lambda^* t_3 = 0,1$ і різних значеннях ймовірності q .

Наприклад, збільшення кратності непоповнюваного резерву m_i з 0,8 до 1,0 дозволяє зменшити ймовірність $Q(t_3, t_p, t_d)$ приблизно в 100 разів. Такого ж ефекту можна досягти при $m_i = 0,8$, якщо зменшити ймовірність q на два порядки, тобто шляхом істотного збільшення поповнюваного резерву часу t_d .

2. Зі збільшенням p частки незнецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці ефективність часового резервування за рахунок збільшення кратності непоповнюваного резерву часу m_i при $q = \text{const}$ істотно зростає (рис. 1, 2), при цьому в системах з повністю незнецінюючими відмовами ($p = 1$) залежність $Q(t_3, t_p, t_d) = f(m_i)$ носить лінійний характер (рис. 2). Зокрема, при $m_i = 0,1$; $q = \lambda t_3 = 0,1$ і $p = 0; 0,5$ і $1,0$ значення ймовірності $Q(t_3, t_p, t_d)$ відповідно рівні 10^{-2} , $7 \cdot 10^{-3}$ і 10^{-4} . Зі збільшенням m_i до 0,2 за інших незмінних умов значення ймовірності відмови системи для $p = 0; 0,5$ і $1,0$ стають відповідно рівними $9 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-3}$ і 10^{-6} .

Отже, із зміною кратності непоповнюваного резерву m_i з 0,1 до 0,2 і збільшенням p з 0 до 1 ймовірність відмови системи $Q(t_3, t_p, t_d)$ зменшується майже в 10^4 разів.

3. Графіки рис. 3 ілюструють залежності ймовірності відмови системи від відносно мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при $p = 0$; $q = 0,1$, $\lambda^* = \text{const}$ і різних значеннях $m_i = t_p/t_3$.

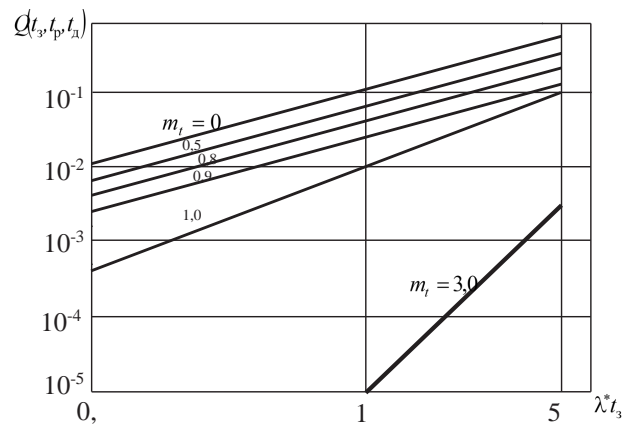


Рис. 3. Графіки залежності ймовірності відмови системи від відносно мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при $p = 0$; $q = 0,1$, $\lambda^* = \text{const}$ і різних значеннях $m_i = t_p/t_3$

З рисунка видно, що зі збільшенням мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ ефективність часового резервування за рахунок непоповнюваної складової резерву часу зменшується. Так, при $p = 0$; $q = 0,1$ і $\lambda^* t_3 = 0,1$ отримуємо відношення

$$Q(t_3, t_p, t_d) / Q(t_3, 3t_p, t_d) \approx 10^3,$$

а при $\lambda^*t_3 = 5$ це відношення рівне 30, тобто зменшується більш ніж в тридцять разів.

Ефективність часового резервування у випадку сумісного використання в системі поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових зручно оцінювати за допомогою функцій виграшу W , що характеризують відносних виграш в надійності у порівнянні з системою без часової надлишковості.

Так, для ймовірності відмови (зриву функціонування) $Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - P(t_3, t_d, t_p)$ системи функція виграшу має вид:

$$W_Q = \frac{Q(t_3, 0, 0)}{Q(t_3, t_d, t_p)} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - P(t_3, t_d, t_p)}, \quad (2)$$

$$Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_d \rceil} (-1)^j \frac{(\gamma - j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{(\gamma - j\rho)}{j+1}\right) e^{-(j+1)\rho}, \quad (3)$$

де $\rho = (1 - p)\lambda^*(t_3 - t_d)$; $\gamma = (1 - p)\lambda^*t_p$; $\lambda^* = \lambda q = \lambda e^{-\mu t}$.

На рис. 4 наведено графіки залежності $W_Q^{-1} = f(\lambda t_3)$, побудовані за допомогою виразів (2) і (3).

Аналіз графіків показує, що при малих значеннях λ^*t_3 виграш W_Q дуже високий, а зі збільшенням λ^*t_3 (при $\lambda^* = \text{const}$) він падає, наближуючись асимптотично до одиниці. Швидкість зменшення виграшу W_Q помітно зростає зі збільшенням частки знецінюючих відмов (при $p \rightarrow 0$). Все це свідчить про поступове зменшення ефективності комбінованого часового резервування (особливо непоповнюваною складовою t_p резерву часу) зі зростанням тривалості завдання t_3 .

Отже, в системах з комбінованим резервом часу виконується основна властивість резервування, полягає в тому, що виграш в надійності за основними показниками тим вище, чим менше величина $\rho = \lambda^*t_3$ нерезервованої системи.

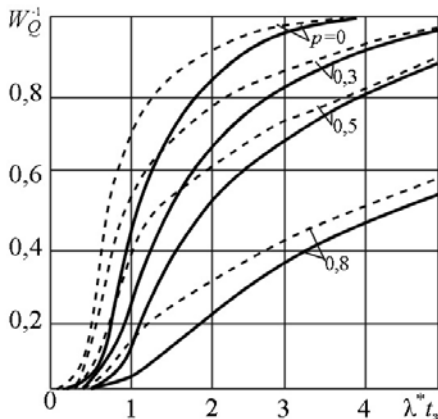


Рис. 4. Графіки залежності величини, зворотно виграшу в надійності за ймовірності зриву функціонування, від мінімального часу виконання завдання $\mu t_d = 0,5$ і різних значеннях ймовірності p : ----- $\gamma = 0,5$; ————— $\gamma = 1,0$, $\gamma = \lambda^*t_p$

Це дозволяє порівнювати ефективність часового резервування з іншими методами підвищення надійності, зокрема, зі структурним резервуванням, використовуючи еквіваленти [8].

Як було зазначено раніше, ймовірність безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу зростає зі збільшенням обох складових t_d і t_p часового резерву, наближуючись асимптотично до одиниці.

Однак при інших рівних умовах відбувається це значно повільніше в системах, в яких поряд з незнецінюючими виникають знецінюючі відмови, які вимагають відновлення працездатності об'єкта повторення всього або частини попереднього напрацювання. Це можна прослідкувати за графіками, зображеними на рис. 5.

Аналіз цих графіків дозволяє зробити і другий висновок, важливий для інженерної практики, який полягає в більш слабкій, ніж при незнецінюючих відмовах, залежності ймовірності безвідмовного функціонування від часу відновлення працездатності t_b об'єкта.

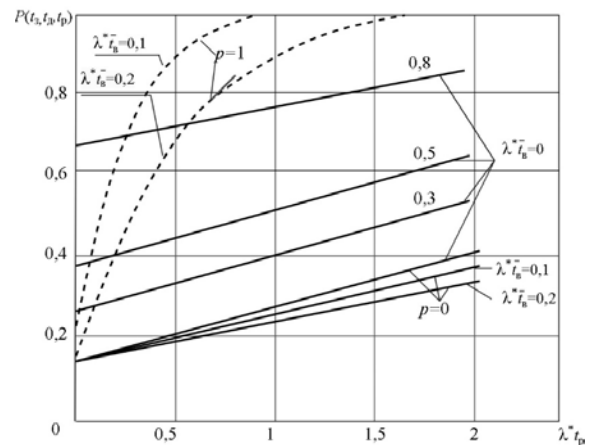


Рис. 5. Графіки залежності ймовірності безвідмовного функціонування від величини резерву часу t_p і мінімального часу виконання завдання t_3 при різних значеннях ймовірності p , середнього часу відновлення t_b , $\lambda^*t_3 = 2$ та $\mu t_d = 0,5$

Це можна пояснити наступним чином. Зменшення часу відновлення при знецінюючих відмовах скорочує лише одну складову втрат оперативного часу t , яка складається з інтервалів часу ремонту, і не зачіпає іншу, що включає в себе інтервали часу роботи, знеціненою відмовами та збоями об'єкта. При великих значеннях t_3 і t_p частка таких вторинних втрат настільки зростає, що навіть при зменшенні t_b до нуля не вдається помітно збільшити ймовірність $P(t_3, t_d, t_p)$.

Тому основні зусилля щодо підвищення надійності функціонування системи доцільно напра-

вити на захист об'єкта від вторинних наслідків відмов та збоїв, обумовлених необхідністю повторення частини або всієї проробленої до моменту знецінюючої відмови роботи.

Збільшення частки знецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці (при $p \rightarrow 0$) може призвести також до суттєвого збільшення середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3)$.

Дана характеристика корисна як допоміжна і зазвичай використовується для обчислення коефіцієнту використання виділеного резерву часу δ_3 , що обчислюється за формулою:

$$\delta_3 = \frac{\bar{T}_{вз} - t_3}{t_3}, \quad (4)$$

де t_3 – мінімальний час виконання завдання.

Цей коефіцієнт характеризує середні відносні витрати резервного часу до виконання завдання.

Розглянемо вплив кількості етапів виконання завдання n на показники надійності.

Розглянемо випадок $i = 1$, коли завдання розбивається на n ($n > 1$) етапів з однаковим мінімальним часом виконання $\Delta = \frac{t_3}{n}$, і будемо вважати, що таке розбиття не потребує витрат додаткового часу або ці витрати настільки малі, що ними можна практично знехтувати. В цьому випадку формула для оцінки надійності системи об'єкт-час приймає вид [9]:

$$\begin{cases} P(t_3, t_d, t_p, n) = 1, & p = 1, \\ P(t_3, t_d, t_p, n) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/t_d \rfloor} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda^* (1-p)t_3^j (1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda^* (1-p)(t_p - jt_3/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, & 0 \leq p_1 < 1, \end{cases} \quad (5)$$

де $n \geq 1$; $\lambda^* = \lambda q = \lambda [1 - F_b(t_d)]$; $t_3^* = t_3 - t_d$.

При $n = 1$ формула (5) зводиться до виразу [9]:

$$\begin{cases} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/(t_3-t_d) \rfloor} (-1)^j e^{-(j+1)p} \frac{(\gamma - j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{\gamma - j\rho}{j+1}\right), & 0 \leq p_1 < 1, \\ P(t_3, t_d, t_p) = 1, & p = 1. \end{cases}$$

Розрахунки за формулою (5) показують, що ймовірність безвідмовного функціонування системи суттєво залежить від кількості етапів виконання завдання n і ймовірності p збереження попередніх результатів (рис. 6).

При цьому вииграш в надійності за ймовірністю безвідмовного функціонування

$$W_p = \frac{P(t_3, t_d, t_p, 2)}{P(t_3, t_d, t_p, 1)}$$

при розбитті виконуваного завдання на два етапи, різко зростає із збільшенням резерву часу, а потім спадає (рис. 7). Отже, існує деяке оптимальне значення резерву часу, при якому забезпечується невеликий вииграш W_p при розбитті завдання на етапи.

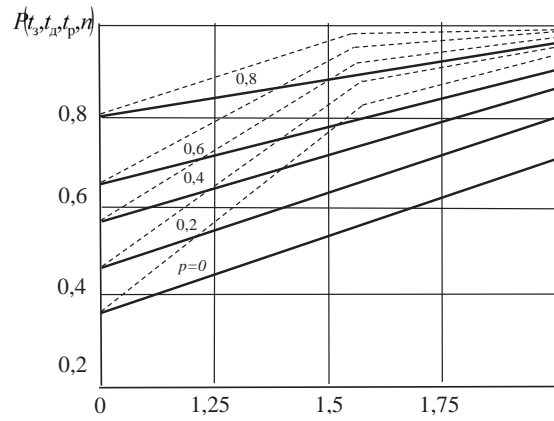


Рис. 6. Залежність ймовірності безвідмовного функціонування системи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів: ($t_b = 0$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$) при $n = 1$; ----- при $n = 2$

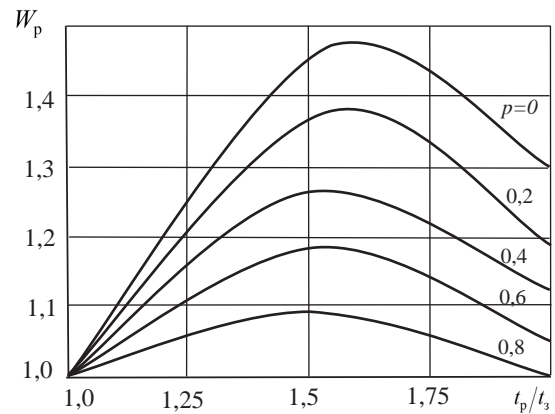


Рис. 7. Залежності виграшу в надійності при розбитті завдання на два етапи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів ($t_b = 0$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

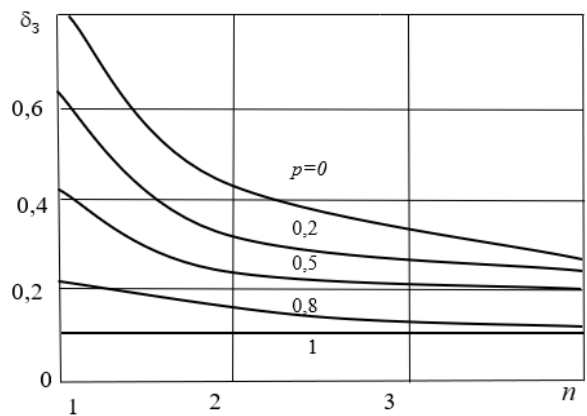


Рис. 8. Залежності середніх відносних витрат резерву часу від кількості етапів n при різних значеннях ймовірності збереження попередніх результатів ($\lambda q t_b = 0,1$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

Графіки рис. 7 показують також, що розбиття завдання на етапи дає помітно більший виграш для систем, в яких переважають частково знецінюючі відмови ($p \rightarrow 0$).

З графіків рис. 8 видно, що суттєве зниження відносного витрачання резерву часу δ_3 (формула 4) можна забезпечити при розбитті завдання навіть на невелике число етапів ($n = 3 \div 4$). При цьому ймовірність p збереження попередніх результатів чинить великий вплив на величину δ_3 , що свідчить про необхідність та доцільність прийняття спеціальних мір щодо зменшення частки знецінюючих відмов технічних та програмних засобів об'єкта.

Висновки. Проведене теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів ЕКО з використанням моделей оцінки надійності дозволило кількісно оцінити вплив на показники надійності різних факторів при їх сумісному урахуванні.

Такий комплексний підхід дав можливість виявити деякі важливі загальні та часткові властивості комбінованого часового резервування при суміс-

ному використанні поповнюваної t_d і непоповнюваної t_{\square} складових загального резерву, що дозволило зробити висновок про ефективності цього методу резервування і доцільності його використання для поліпшення показників надійності.

Показано, що ймовірність $P(t_z, t_d, t_p, n)$ завжди можна довести до необхідного значення, вибираючи відповідні значення t_d , t_p і кількість етапів n , на які доцільно розбивати виконуване завдання.

При цьому необхідно враховувати, що в даній моделі розбиття на етапи не пов'язано зі збільшенням мінімального завдання, тому будь-яке збільшення кількості етапів n доцільне, оскільки воно призводить до зменшення вторинних втрат оперативного часу, викликаних знецінюючими відмовами, і забезпечує підвищення ефективності часового резервування.

Вплив кількості етапів n можна прослідкувати і за середньою відносною витратою резерву часу до виконання завдання δ_3 . Суттєвого зниження коефіцієнта δ_3 можна досягти при невеликих значеннях n .

Список літератури:

1. Yakovyna V.S., Seniv M.M., Symets I.I. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science*. 2020. № 4. P. 163–177. DOI:10.15588/1607-3274-2020-4-16.
2. Трофімук А. В. Оцінка якості програмного забезпечення за показниками надійності: thesis. 2018. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/11471> (дата звернення: 28.04.2023).
3. Сенів М., Поїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87–91. DOI:10.36930/40310613.
4. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *SN Appl. Sci*. 2021. № 3(18). DOI: 10.1007/s42452-020-04015-z.
5. Pavlov N. Iliev A. Rahneva A. Kyurkchiev N. Some Transmuted Software Reliability Models. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*. 2019. № 2 (1). P. 64–70. DOI: 10.33187/jmsm.434277.
6. Zhong W., Wang L., Liu Z., Hou S. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020. № 8 (1). P. 111–123. DOI:10.35833/MPCE/2018.000666.
7. Hrytsiuk Yu. I., Mukha T. Methods for determining the quality of software. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. Vol. 30, no. 1, P. 158–167, DOI: <https://doi.org/10.36930/40300127>.
8. Mogylevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies*. Springer. 2018. №. 560, P. 101–117. 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.
9. Креденцер Б.П., Вишнівський В.В., Жердев М.К., Могилевич Д.І. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 336 с.

Kononova I.V., Tykhonov M.V. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT

The article is devoted to the analysis of the results of a comprehensive assessment of the reliability of electronic communication equipment in case of failures and malfunctions of hardware and software components. Modern electronic communication networks consist of electronic communication equipment, which are integrated systems that include both hardware and software components. It is determined that the object of theoretical research is the processes of functioning of electronic communication equipment in conditions of limited reliability of both hardware and software components.

A theoretical study of the reliability of the functioning of electronic communication equipment using models has been carried out, which allowed to quantify the impact on the reliability indicators of various factors when they are taken into account together.

The article presents the results of a quantitative assessment of the reliability of functioning of electronic communication equipment under conditions of failures and malfunctions of hardware and software, taking into account the possibility of dividing the tasks performed into sequential stages with the memorization of intermediate results.

Based on the analysis of the calculation results, some features and properties of combined time redundancy have been identified, which shows the effectiveness of using this method to combat failures and devaluing failures of communication equipment.

The results of the assessment of reliability indicators of electronic communication equipment will allow us to further determine the optimal strategies for managing failures and disruptions and increase the sustainability of communication equipment.

Key words: *technical components, reliability indicators, failures, failures, electronic communication equipment, time reserve.*

Мустафасєв О.В.Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВИХ ДИНАМІЧНИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто сучасні підходи, що використовуються при розробці методів оптимізації процесу передачі радіосигналу у середовищі бездротової динамічної мережі через вирішення задачі зв'язності інформаційних її вузлів. Показано, що актуальність задачі забезпечення зв'язності вузлів мережі пов'язана з необхідністю організації стабільної передачі даних за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури, що є актуальним при вирішенні широкого спектру практичних задач. У рамках дослідження формалізація особливостей організації бездротової динамічної мережі включала у себе визначення таких функціональних компонент як цільові показники, що оцінюються у відповідності до поставленого завдання по експлуатації мережі, загальна структура мережі, алгоритми збору даних з вузлів мережі, статистична модель передачі даних, алгоритми первинного розміщення вузлів мережі, методика імітаційного моделювання мережі з оптимізацією позиціонування вузлів. Зазначено, що основною перевагою систем передачі даних на основі бездротової динамічної мережі є відсутність складної інфраструктури, що надає можливість забезпечити оперативність виконання задачі комунікації між інформаційними вузлами мобільних електронних пристроїв та широкий інструментарій для організації надійного зв'язку на апаратному та програмному рівні. Були виконані завдання з розробки методик оптимізації протоколів маршрутизації, контролю доступу та управління ресурсами, а також формування захищених каналів передачі даних у відповідності до набору актуальних загроз. Проведений у рамках дослідження аналіз надав можливість виділити такі типові проблеми як виникнення помилок при передачі даних, локальні порушення з'єднання, погіршення якості зв'язку, пов'язане з мобільністю вузлів, затримка при автоматичній обробці і передачі потокових даних, пов'язана з обмеженістю обчислювального ресурсу і перепускної здатності мережі. Запропоновано комплексну методику вирішення зазначених проблем через забезпечення зв'язності інформаційних вузлів мережі на рівні побудови математичної моделі. На етапі математичного моделювання має бути з достатнім рівнем точності проведено формалізацію архітектури мережі і алгоритмів збору даних з урахуванням стаціонарних, мобільних та сенсорних вузлів мережі, їх технічних та комунікаційних характеристик, а також функцій часової залежності об'єму даних моніторингу. Таким чином, розроблена методика базується на визначенні оптимального алгоритму збору даних моніторингу з сенсорних вузлів через інформаційні вузли мережі та розрахунку швидкості і траєкторії переміщення мобільних платформ з метою підтримки належного рівня зв'язності.

Ключові слова: WANET, задача зв'язності, стаціонарні вузли, мобільні вузли, сенсорні вузли, протоколи маршрутизації, мобільні платформи.

Постановка проблеми. Протягом двох останніх десятиріч у зв'язку з широким впровадженням засобів безпілотної авіації (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) та, зокрема, систем висотних UAV дальнього радіусу дії (High-Altitude Long-Endurance; HALE) зростає актуальність вирішення задачі впровадження архітектури бездротової динамічної мережі (Wireless Ad Hoc Network; WANET), у рамках якої системи HALE-UAV розглядаються як аероплатформи, на основі яких реалізуються інформаційні вузли інфраструктури загального комплексу. Впровадження WANET визначає новий рівень у розвитку систем бездротового зв'язку, у рамках відповідної пара-

дигми здійснюється передача даних без забезпечення вимог на стабільне позиціонування як вузлів кінцевих користувачів, так і вузлів ретрансляторів радіосигналу. Технологія WANET найбільш актуальна при виконанні задач, які потребують забезпечення стабільної і конфіденційної передачі даних і відсутності комунікаційної інфраструктури на рівні традиційної наземної системи радіозв'язку. Серед типових задач, при виконанні яких є найбільш актуальним розгортання високофункціональних засобів WANET, можна відзначити наступні:

- збір даних розвідки та координування бойових дій поза міської інфраструктури;

- організація оперативного зв'язку для рятувальників у зоні природної чи техногенної катастрофи, або у зоні ліквідації наслідків теракту;
- оптимізація систем навігації у водному, наземно-повітряному й повітряному середовищі (зокрема, для безпілотних систем);
- впровадження та оптимізація інфраструктури інтернету речей (Internet of Things; IoT) та інтернету транспортних засобів (Internet of Vehicles; IoV).

Основною перевагою систем передачі даних на основі WANET є відсутність наземної комунікаційної інфраструктури, що надає можливість забезпечити оперативний комунікаційний процес між мобільними електронними пристроями та ретрансляторами, а також широкий інструментарій для організації надійного зв'язку на апаратному та програмному рівні. Водночас, слід вказати, що впровадження розподіленої мережі змінної топології не тільки розширює інструментарій та галузі застосування відповідної архітектури, але й призводить до ряду типових проблем у роботі відповідної інформаційної системи, таких як:

- нестабільність передачі та прийому радіосигналу;
- зростання ймовірності перехоплення радіосигналу зловмисниками або ворогом;
- затримка при обробці даних у зв'язку з обмеженим обчислювальним ресурсом інформаційних вузлів аероплатформ;
- низька пропускна здатність інформаційних каналів.

Таким чином, попри високу актуальність впровадження, технологія WANET вимагає уважного вивчення аспектів безпеки та ефективного керування ресурсами для забезпечення стійкої та ефективної роботи цієї радіомережі в умовах середовища, параметри якого обмежені та розглядаються як змінні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій за тематикою оптимізації процесу передачі сигналу у середовищі бездротових мереж радіозв'язку зі змінною топологією вказав на актуальність вирішення задачі зв'язності інформаційних вузлів багаторівневої бездротової мережі [1–4] та, зокрема, WANET [5]. Зазначено широкий спектр галузей застосування WANET на базі UAV [6–10]. При цьому слід зауважити, що у ряді досліджень розглядаються мережі з мінімальною кількістю інформаційних вузлів на основі UAV [11–13], що спрощує вирішення задачі інтерференції сигналу та контролю і позиціонування аероплатформ, але водночас надзвичайно

обмежує функціональні можливості розподіленої системи. Тому, основна увага була приділена дослідженням з організації сучасних WANET, що характеризуються багаторівневою структурою та масштабованістю [14–19]. Це надало можливість виділити такі проблеми як:

- втрата зв'язку через помилки у передачі даних;
- втрата зв'язку з інформаційними вузлами внаслідок неоднорідності мережі і недосконалої маршрутизації UAV;
- нерівномірне покриття зони через недостатню потужність сигналу аероплатформи;
- загроза безпеки на рівні перехоплення конфіденційних даних або атаки на протоколи зв'язку.

Було показано, що вирішення цих проблем може включати в себе використання оптимізованих протоколів маршрутизації, механізмів керування аероплатформами, адаптивних алгоритмів, технік антенної обробки сигналів та застосування протоколів безпеки [14–19]. У вищезазначеному дослідженні не вирішеною задачею залишається побудова цілісної аероплатформи WANET через вирішення задачі зв'язності інформаційних вузлів.

Метою статті є дослідження оцінки зв'язності інформаційних вузлів багаторівневої бездротової мережі зі змінною топологією за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Організація інфраструктури мережі радіозв'язку WANET з застосуванням аероплатформ. У рамках дослідження розглядається архітектура багаторівневої WANET, інформаційні вузли ретрансляторів якої представляють собою аероплатформи. Зазначена модель бездротової мережі зі змінною топологією складається з наступних рівнів: (i) рівень «А», що включає у себе вузли сенсорної мережі та наземні вузли кінцевих користувачів системи радіозв'язку $n \in [1; N]$; (ii) рівень «В», що включає у себе наземні вузли ретрансляторів низової ланки радіомережі; (iii) рівень «С», що включає у себе вузли ретрансляторів радіомережі на основі мобільних аероплатформ гелікоптерного типу; (iv) рівень «D», що включає у себе вузли базових станцій радіомережі на основі мобільних аероплатформ типу HALE-UAV; (v) рівень «Е» на базі систем супутникового зв'язку.

Задача зв'язності вузлів, як можна побачити зі схеми, має бути вирішена для рівнів «С» і «D» інфраструктури WANET, у зв'язку з тим, що рівні «А» і «Е» є некерованими, а рівень «В» є нерухомим, а отже не вносить змін у топологію мережі.

2. Постановка задачі оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET. Організація інформаційних вузлів WANET для рівнів, інформаційні вузли яких базуються на аероплатформах, має включати у себе визначення наступних функціональних компонент:

- формування набору цільових показників, що визначаються у відповідності до поставленого завдання по експлуатації мережі, спрямоване на систематизацію процесів оцінки продуктивності та ефективності мережі;
- представлення загальної архітектури мережі і побудова комплексної методики збору даних з вузлів мережі, спрямованої на створення єдиної інформаційної основи для аналізу та вдосконалення функціонування мережевих елементів;
- математичне моделювання процесу передачі даних, що базується на статистичних методах, спрямованих на розробку точних та ефективних інструментів для передбачення і оптимізації потоків даних у мережі радіозв'язку;
- розробка алгоритмів первинного розміщення вузлів мережі у відповідності до поставленого завдання, спрямованих на раціональне розташування вузлів для максимізації покриття та оптимізації енергоспоживання;
- побудова системи імітаційного моделювання мережі, що включає у себе оптимізацію позиціонування вузлів, що спрямована на використання віртуальних сценаріїв для тестування та вдосконалення стратегій функціонування в реальному часі;

- проведення комплексної оцінки ефективності роботи мережі у відповідності до набору цільових показників, спрямованої на надання інформації для прийняття обґрунтованих рішень з покращення якості та продуктивності мережі.

Завданнями, що при цьому мають бути виконані, є розробка та оптимізація протоколів маршрутизації, контролю доступу та управління ресурсами, а також формування захищених каналів передачі даних, оскільки мобільні платформи характеризуються широким спектром загроз, як природними перешкодами та інтерференцією корисного сигналу, так і зовнішніми загрозами з боку злоумисників та ворожої розвідки, перехопленням конфіденційних даних, тощо.

Зв'язок між етапами формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET представлено на рис. 2.

Для визначення цільових показників, що розраховуються у відповідності до поставленого

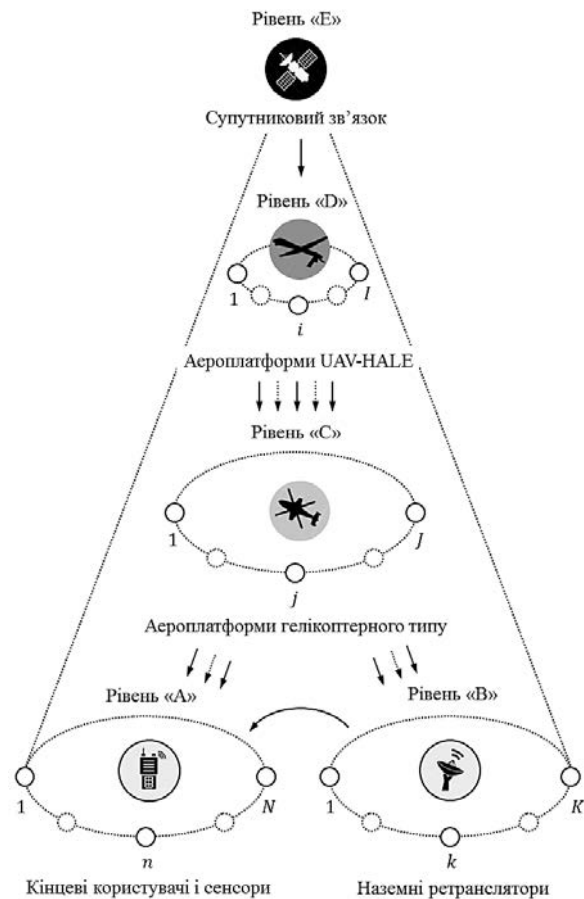


Рис. 1. Базова схема багаторівневої WANET з застосуванням аероплатформ для вузлів базових станцій та ретрансляторів

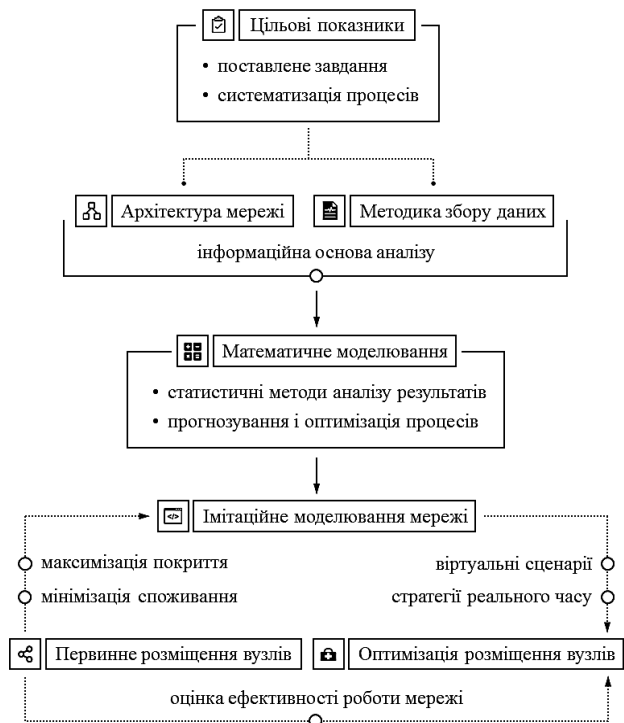


Рис. 2. Діаграма проведення етапів формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів WANET

завдання по експлуатації мережі, необхідно визначити задачі, що можуть бути вирішені при забезпеченні зв'язності вузлів. Проведений аналіз надає можливість виділити наступні типові проблеми, що розглядаються як найбільш характерні для мереж радіозв'язку класу WANET:

1. Виникнення помилок при передачі поточкових даних у зв'язку з фізичним явищем інтерференції сигналу за умов швидкого руху окремих аероплатформ або високою щільністю їх розташування для окремої області покриття.

2. Локальні порушення з'єднання кінцевих користувачів сервісу та погіршення якості зв'язку, пов'язані з мобільністю інформаційних вузлів ретрансляторів та базових станцій, що призводить до зміни топології мережі і, відповідно, ускладнює маршрутизацію у межах інформаційної системи радіомережі.

3. Велика затримка при автоматичній обробці і передачі поточкових даних, пов'язана з обмеженістю обчислювального ресурсу і пропускну здатності складових апаратно-програмної платформи мережі, які базуються на аероплатформах, що порушує функціонування сервісу у режимі реального часу.

Вирішення задачі зв'язності вузлів може включати в себе ряд технологічних та алгоритмічних підходів для покращення надійності та продуктивності функціонування мережі через динамічне керування маршрутами (використання алгоритмів маршрутизації, які адаптуються до змін у топології мережі та базуються на векторах відстаней), впровадження механізмів управління мобільністю для підтримки безперервного з'єднання та оптимізації якості зв'язку при переміщенні вузлів, а також розробку та використання енергоефективних протоколів та алгоритмів для зменшення споживання енергії вузлами мережі на аероплатформах.

3. Система оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET. Проведений аналіз показав, що вирішення задачі забезпечення зв'язності вузлів мережі на рівні побудови математичної моделі надає можливість з достатнім рівнем точності описати архітектуру мережі радіозв'язку і визначити принципи побудови протоколів та алгоритмів збору даних з можливістю внесення змін у відповідності до вирішення задачі оптимізації WANET за представленим набором цільових показників. Формалізація процедури організації забезпечення зв'язності вузлів мережі базується на введенні наступних ключових показників:

- кількість стаціонарних та інформаційних вузлів мережі радіозв'язку на основі аероплатформ як наборів $n \in [1; N_{st}]$ і $n \in [1; N_{mob}]$, а також набори констант і змінних, що визначають координати їх просторового позиціонування як $\{x_n, y_n, z_n\}$;

- кількість сенсорних вузлів мережі як набір $k \in [1; K]$, а також набори їх технічних та телекомунікаційних характеристик, функція часової залежності об'єму даних моніторингу, що передаються вузлом у одиницю часу як $A_k(t)$, причому кожен вузол характеризується власною системою управління.

Протокол, на якому базуються алгоритми збору даних, визначає процес взаємодії інформаційних вузлів з головними вузлами кластерів. При цьому необхідно вирішити завдання визначення кількості відповідних вузлів та позиціонування точок збору даних, оптимізацію порядку збору даних у відповідності до підтримки зв'язності на рівні оптимізації цільових функцій, що формалізується як:

- мінімізація часу збору даних (Data Collection Time; DCT) з інформаційних вузлів кінцевих користувачів та сенсорів мережі як $T_{DC} \rightarrow T_{DC}^{min} = f(n, x_n, y_n, z_n) / v$;

- максимізація часу стабільної роботи (Network Uptime, NU) мережі радіозв'язку $T_{NU} \rightarrow T_{NU}^{min}$ з урахуванням обмеження на обчислювальний ресурс, енергію батарей, зони покриття, а також висотний і швидкісний діапазон аероплатформ.

Визначення екстремумів цільових функцій проводиться у відповідності до етапів функціонування мережі (застосування процедури кластеризації рівня мережі, розрахунок маршруту аероплатформ і процес передачі даних) та способів реалізації інфраструктури мережі (оптимізація кількості та розмірів кластерів, зменшення рівня енергоспоживання, забезпечення однорідності розташування аероплатформ, ротація аероплатформ, що виконують роль головних вузлів, зменшення навантаження на обчислювальний ресурс).

Запропонована методика базується на визначенні оптимального алгоритму збору даних моніторингу з сенсорних вузлів через інформаційні вузли мережі, розрахунку швидкості і траєкторії переміщення мобільних платформ з метою підтримки зв'язності і, таким чином, оптимізації інфраструктури у відповідності до набору цільових показників ефективності передачі даних. Таким чином, організація WANET базується на визначенні особливостей функціонування апаратно-програмної платформи кожного з вузлів, що надалі використовуються у експертно-моделюючій системі прийняття рішень при керуванні відповідною інформаційною системою.

У відповідності до поставленої задачі дослідження, формування рівнів визначається через аналіз та врахування особливостей функціонування апаратно-програмної платформи кожного з вузлів. Врахування усіх аспектів функціонування вузлів у мережі дозволяє оптимально налаштувати процеси збору, обробки та передачі даних, забезпечуючи оптимальну пропускну здатність та забезпечуючи надійну зв'язність між всіма елементами мережі. Цей підхід сприяє ефективному використанню ресурсів мережі, забезпечуючи високу продуктивність та адаптуючись до змінних умов експлуатації.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було запропоновано методичні основи оцінки

зв'язності вузлів багаторівневої бездротової мережі зі змінною топологією за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури. Проведене дослідження включало розробку наступних етапів:

- базової схеми багаторівневої WANET із застосуванням аероплатформ для інформаційних вузлів базових станцій та ретрансляторів;
- діаграми формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів WANET;
- методичку оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET.

Запропонований підхід сприяє ефективному використанню ресурсів мережі радіозв'язку через забезпечення високої продуктивності та стабільності виконання базових процедур.

Список літератури:

1. Kumar P.V. Detection and prevention of drop attack in WANET using robust scheme method. *Research Square*, 8(1) 2021. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-417857/v1>.
2. Samuel, G.J., Paul, V.P. Maintaining connectivity of mobile nodes using MANET Gateway Nodes. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 19(3), 288 (2017).. <https://doi.org/10.1504/ijcnds.2017.086490>.
3. Improving network connectivity using trusted nodes and edges. 2017 American Control Conference. Abbas, W., Laszka, A., Vorobeychik, Y., Koutsoukos, X. <https://doi.org/10.23919/acc.2017.7962974>.
4. Connectivity of finite wireless networks with Random Communication Range Nodes. 2009 IEEE International Conference on Communications. Bermudez, S. A., Wicker, S. B. <https://doi.org/10.1109/icc.2009.5198844>.
5. Maintaining a permanent connectivity between nodes of an air-to-ground communication network. 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Rautu, D., Dhaou, R., Chaput, E. <https://doi.org/10.1109/iwcmc.2017.7986367>.
6. Grodi, R., Rawat, D. B., Bajracharya, C. Performance evaluation of unmanned aerial vehicle ad hoc networks. *Southeast Con 2015*. <https://doi.org/10.1109/secon.2015.7133020>.
7. Polo, J., Hornero, G., Duijneveld, C., García, A., Casas, O. (2015). Design of a low-cost wireless sensor network with UAV Mobile Node for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag>.
8. Quaritsch, M., Kruggl, K., Wischounig-Struel, D., Bhattacharya, S., Shah, M., Rinner, B. Networked UAVs as Aerial Sensor Network for Disaster Management Applications. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 127 (3), 56–63. <https://doi.org/10.1007/s00502-010-0717-2>.
9. Airborne WIFI networks through directional antennae: An experimental study. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Yixin Gu, Mi Zhou, Shengli Fu, Yan Wan. (2015). <https://doi.org/10.1109/wcnc.2015.7127659>.
10. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility. 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. Yanmaz, E., Kuschnig, R., & Bettstetter, C. <https://doi.org/10.1109/infcom.2013.6566747>.
11. AirGSM: An unmanned, flying GSM cellular base station for Flexible Field Communications. 2012 IEEE Aerospace Conference. Wypych, T., Angelo, R., Kuester, F <https://doi.org/10.1109/aero.2012.6187134>.
12. Bekmezci, İ., Sahingoz, O. K., Temel, Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): (2013). A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>.
13. Asadpour, M., Van den Bergh, B., Giustiniano, D., Hummel, K., Pollin, S., Plattner, B. Micro-Aerial Vehicle Networks: An experimental analysis of challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 52 (7), 141–149. (2014). <https://doi.org/10.1109/mcom.2014.6852096>.
14. Tsao, K.Y., Girdler, T., Vassilakis, V. G. A survey of cyber security threats and solutions for UAV Communications and flying ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 133, 102894. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102894>.
15. Masroor, R., Naeem, M., Ejaz, W. Resource management in UAV-Assisted Wireless Networks: An optimization perspective. *Ad Hoc Networks*, 121, 102596. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102596>.

16. Condomines, J.P., Zhang, R., Larrieu, N. Network intrusion detection system for UAV ad-hoc communication: From methodology design to real test validation. *Ad Hoc Networks*, 90, 101759. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.09.004>.

17. Tag: Trajectory aware geographical routing in cognitive radio ad hoc networks with UAV nodes. *Ad Hoc Networks*, 111–122. Harounabadi, M., Puschmann, A., Artemenko, O., Mitschele-Thiel, A. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25067-0_9.

18. Kolomvatsos, K. Time-optimized management of IOT nodes. *Ad Hoc Networks*, 69, 1–14. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.10.011>.

19. Tetsurō U. Location Tracking and location estimation of nodes in ad hoc networks: A test-bed implementation. *Enhancing the Performance of Ad Hoc Wireless Networks with Smart Antennas*, 91–112. (2016). <https://doi.org/10.1201/9781420013238-7>.

Mustafaiev O.V. ASSESSMENT OF SIGNAL TRANSMISSION QUALITY IN ACCORDANCE WITH CONNECTIVITY OF NODES IN WIRELESS DYNAMIC NETWORKS

Modern approaches used in developing methods to optimize the radio-signal transmission process in wireless dynamic networks through addressing the connectivity task of information nodes are considered. The relevance of ensuring network connectivity is highlighted due to the necessity of organizing stable data transmission in the absence of communication infrastructure, which is crucial for addressing a wide range of practical tasks. Within the research framework, the formalization of the organization features of a wireless dynamic network included the definition of functional components such as target indicators evaluated in accordance with the task of network operation, the overall network structure, data collection algorithms from network nodes, statistical models of data transmission, algorithms for the initial placement of network nodes, methodology for simulation modeling of the network with node positioning optimization. It is emphasized that a key advantage of data transmission systems based on wireless dynamic networks is the absence of a centralized infrastructure, providing operational communication between information nodes of mobile electronic devices and a wide toolkit for organizing reliable communication at the hardware and software levels. Tasks were performed to develop a methodology for optimizing routing protocols, access control, and resource management, as well as forming secure data transmission channels in accordance with a set of relevant threats. The analysis conducted within the research allowed identifying typical problems such as data transmission errors, local connection disruptions, degradation of communication quality associated with node mobility, and delays in automatic processing and transmission of streaming data due to the limitation of computational resources and network bandwidth. A comprehensive methodology for addressing these issues is proposed, focusing on ensuring the connectivity of information nodes in the network at the level of building a mathematical model. It is noted that during the mathematical modeling stage, the architecture of the network and data collection algorithms should be formalized with sufficient accuracy, taking into account stationary, mobile, and sensor nodes of the network, their technical and communication characteristics, as well as the time-dependent function of monitoring data volume. Thus, the developed methodology is based on determining the optimal algorithm for monitoring data collection from sensor nodes through information nodes of the network and calculating the speed and trajectory of movement of mobile platforms to support the required level of connectivity.

Key words: WANET, connectivity task, stationary nodes, mobile nodes, sensor nodes, routing protocols, mobile platforms.

УДК 621.39

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/09>**Романов О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Бурлака Г.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВЗАЄМОДІЯ КОНТРОЛЕРА Ryu З КОМУТАТОРАМИ SDN

У світі технологій мережевого управління контролер Ryu вибивається серед інших, відкриваючи шлях інноваційним застосуванням у сфері програмно-визначених мереж (SDN). Його гнучкість та розширювані можливості роблять його не лише потужним інструментом для створення та керування мережами, але і платформою для реалізації передових концепцій у сфері комунікації.

Ця стаття досліджує взаємодію між контролером SDN (Software-Defined Networking) Ryu та комутаторами у відкритому середовищі мережі. У статті розглянуто основні аспекти керування правилами OpenFlow, використовуючи контролер Ryu, і розкрито важливі етапи з'єднань між контролером та комутаторами. У статті розглянуто особливості побудови контролера Ryu, протоколи та інтерфейси, функціональний склад елементів та наведено приклади як можна отримати певну інформацію по різних елементах мережі з використанням OpenFlow.

Стаття присвячена Ryu Controller – це відкритий контролер мережі (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок посилення управління та адаптації способів обробки трафіку. В загальному, контролер SDN – це мозкова середовище SDN, що передає інформацію про комутатори та маршрутизатори за допомогою південних API, а також про програми та бізнес-логіку за допомогою північних API.

Структура Ryu відрізняється від інших рішень тим, що вона надає просту допоміжну інфраструктуру, яку користувачі платформи повинні написати для використання на власний розсуд. Хоча для цього потрібний досвід розробки, це також забезпечує повну гнучкість рішення SDN. Існуючі компоненти можна швидко і легко оновлювати і об'єднувати в існуючі мережі, щоб задовольнити потреби різних програм, що змінюються, використовуючи ці компоненти. Завдяки своїм характеристикам Ryu є відмінним рішенням для невеликих комерційних та експериментальних застосувань.

Ключові слова: mininet, Ryu Controller, OpenFlow, APP Manager, Ryu Libraries.

Постановка проблеми. У світі сучасних мережевих технологій поняття SDN (Software-Defined Networking, Програмно-визначена мережа) вже давно не є новизною. Цей підхід до мережевого управління революціонував спосіб, яким мережі налаштовуються та керуються. SDN розриває традиційні обмеження мережевих інфраструктур, надаючи можливість централізованого керування мережею та відокремлення управління від фізичних пристроїв. Однак основну роль у реалізації SDN відіграє SDN-контролер, який відповідає за збір, обробку та розподіл інструкцій у мережі. У цьому контексті контролер Ryu стає центральною фігурою у світі SDN, завдяки своїм функціональним можливостям та відкритості для розширень. Він відкриває перед собою безмежні можливості для створення різноманітних мережевих рішень та оптимізації мережевого трафіку.

В даній статті ми зосередимось на одному з найпопулярніших та потужних SDN-контролерів, а саме – контролері Ryu.

Контролер Ryu, який розробляється як вільне програмне забезпечення, став неодмінною складовою в світі програмно-визначених мереж. Цей контролер забезпечує взаємодію з комутаторами SDN, реалізуючи важливі функції керування мережею, встановлення правил маршрутизації та обробки трафіку.

У цій статті ми розглянемо ключові аспекти взаємодії контролера Ryu з комутаторами SDN. Ми розкриємо основні принципи комунікації між цими компонентами, дослідимо протокол OpenFlow як мову обміну даними, та проаналізуємо роль Ryu у реалізації програмно-визначених мереж.

Таким чином, ми розпочнемо наше подорож у світі віртуалізації мережі, де контролер Ryu відіграє ключову роль у досягненні гнучкості, масштабованості та ефективності мережевого управління.

Мета даної роботи – розібратися в архітектурі контролера Ryu та принципах взаємодії даного контролера з OpenFlow, розглянути можливості нала-

штування та отримання інформації по контролеру в мережі SDN з використанням емулятору Mininet.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день ведеться досить багато досліджень та розробок що до побудови та використання даної технології в проектах. Різні автори пропонують дуже багато рішень що до використання даної технології в яких одна з найбільших проблем це визначити який контролер краще використати в тих чи інших умовах.

Опубліковано ряд документів, що описують принципи побудови і функціонування мереж SDN.

У роботі [1–4] розглянуто загальні вимоги, системні підходи для архітектури мереж SDN. Наведено приклади структурної схеми загального виду контролерам SDN, також розглянуто різновиди контролерів та описано компоненти та структурні схеми контролерів та порівняльна характеристика ідеалізованою структурною схемою мережі SDN.

[5] У цьому документі представлено як порівняння на основі функцій, так і аналіз продуктивності найбільш часто використовуваних реалізацій контролерів Ryu та POX. Порівнюється їх пропускна здатність і затримка в мережевих топологіях на основі простого дерева, повного дерева та традиційної IP-мережі. Представлено що продуктивність контролера Ryu/POX залежить від багатьох різних факторів: апаратного забезпечення контролера та конфігурації алгоритму керування, базової мережевої інфраструктури, кількості комутаторів OpenFlow, кількості хостів, кількості потоків.

[6] У цьому документі аналізується оцінка продуктивності через контролер RYU, враховуючи один комутатор OpenFlow і три вузли. Для трьох різних шляхів між вузлами ми отримали результат після обширного дослідження моделювання, яке оцінювалося за параметрами пропускної здатності, часу проходження, тремтіння та втрати пакетів.

У роботах [7–11] описано основні компоненти та характеристики контролера Ryu. Також відображено архітектуру контролера та загальні принципи його роботи. Написано програму Ryu, яка змусить комутатори OpenFlow працювати як комутатори рівня 2. Відображено перспективи розвитку даного контролера та його майбутню популярність.

[12] У цьому дослідженні пропонується архітектура для ефективної передачі даних датчиків у мережах IoT на основі SDN. У запропонованій моделі було розраховано середню втрату пакетів і затримку, а також досліджено зміни відповідно до кількості перемикань і кількості переходів. Для ефективної комунікації було помічено, що кількість переходів була найефективнішою змінною,

але кількість переходів не мала лінійної залежності від загальної кількості комутаторів у мережі. Розташування датчиків виявилось важливим для ефективного зв'язку. Рекомендовано використовувати мережеві моделі, розробляти послуги IoT найкращим чином, контролювати мережу для втручання в різні ситуації, розробляти мережу за допомогою повномасштабного моделювання та робити необхідні виправлення.

У роботі [13] наведено загальні характеристики по вибраним критеріям таким як архітектура, модульність, мова програмування, масштабованість, інтерфейси, стійкість та інші. На основі даних критеріїв розглянуто найпопулярніші контролери (Open Network Operation System (ONOS), OpenDayLight (ODL), OpenKilda, Ryu and Faucet) та порівняння їх між собою оцінкою та відображенням результатів в таблиці.

Метою статті є розкриття особливостей побудови контролера Ryu, опис позитивних та негативних сторін та спроба побудувати мережу в емуляторі mininet з використанням даного контролера.

Виклад основного матеріалу. Протокол OpenFlow є критичним стандартом у світі програмно-визначених мереж (SDN), і контролер Ryu взаємодіє з комутаторами саме через цей протокол. В даному розділі ми розглянемо ключові аспекти протоколу OpenFlow та його ролі у взаємодії з контролером Ryu.

Сутність OpenFlow:

OpenFlow – це відкритий протокол, який розробляється і підтримується Open Networking Foundation (ONF). Він служить мостом між централізованим контролером (яким є контролер Ryu) і комутаторами, які можуть бути розроблені різними виробниками та виконувати відповідні реалізації протоколу.

Архітектура OpenFlow:

Протокол OpenFlow має просту архітектуру, що складається з контролера, який керує комутаторами. Контролер відправляє команди (повідомлення) на комутатори, які виконують ці команди відповідно до правил маршрутизації, встановлених контролером. Ця централізована архітектура дозволяє здійснювати гнучке управління мережею.

Роль контролера Ryu:

Контролер Ryu діє в якості розуміючого агента мережі. Він відправляє запити на налаштування комутаторів, встановлює правила маршрутизації, а також аналізує стан мережі. Протокол OpenFlow дозволяє контролеру Ryu динамічно керувати комутаторами, вносячи зміни в мережеву топологію та маршрутизацію.

Взаємодія за допомогою повідомлень:

Взаємодія між контролером Ryu і комутаторами відбувається через обмін повідомленнями OpenFlow. Контролер відправляє запити, наприклад, запити на додавання правил маршрутизації або видалення їх, і комутатори виконують ці запити та відправляють відповіді назад контролеру.

Підтримка версій:

OpenFlow має кілька версій, і контролер Ryu підтримує різні версії протоколу. Це дозволяє використовувати різні функціональні можливості та оптимізовані реалізації в залежності від конкретних потреб мережі.

Завдяки протоколу OpenFlow, контролер Ryu може забезпечувати централізоване та гнучке управління мережею, що робить його ідеальним інструментом для програмно-визначених мереж і дозволяє мережевим адміністраторам легко налаштовувати та оптимізувати свої мережі.

Архітектура та компоненти контролера Ryu

Контролер Ryu має гнучку та розширювану архітектуру, яка дозволяє розробникам створювати різноманітні додатки та модулі для програмно-визначених мереж (SDN). Давайте подивимося на ключові складові цієї архітектури:

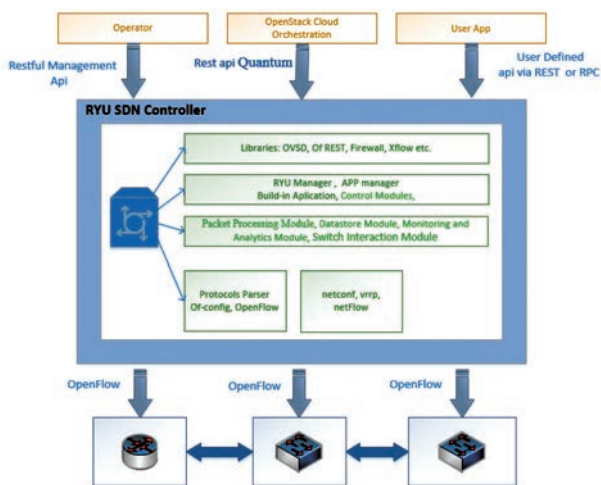


Рис. 1. Архітектура контролера Ryu

Керовані модулі (Control Modules). Це фундаментальні складові архітектури контролера Ryu, які відповідають за обробку різних аспектів управління мережею в середовищі програмно-визначених мереж (SDN). Кожен керований модуль виконує конкретну функцію та реалізує певну логіку обробки даних та подій. Керовані модулі реалізовані у вигляді окремих програмних компонентів або модулів, що дозволяє їх додавати та розширювати незалежно один від одного. Ця модульна

структура робить контролер Ryu дуже гнучким та розширюваним і дозволяє розробникам додавати нові функції та розширювати можливості системи без значних змін в існуючому коді.

Керовані модулі можуть виконувати різні функції, включаючи обробку маршрутизації, управління мережевими подіями, аналіз мережевого трафіку, обробку протоколів та багато іншого. Наприклад, модуль маршрутизації може визначати оптимальний шлях для передачі пакетів, в той час як модуль аналізу трафіку може виявляти аномалії в мережі.

Розробники можуть створювати власні керовані модулі та додавати їх до контролера Ryu за допомогою відповідного API. Це дозволяє розширювати функціональність контролера та адаптувати його до конкретних потреб мережі. Керовані модулі можуть взаємодіяти між собою для вирішення складних мережеских завдань. Наприклад, модуль маршрутизації може використовувати дані від модуля аналізу трафіку для прийняття рішень про оптимальний маршрут.

Керовані модулі діють під керівництвом централізованого контролера Ryu, який координує їх роботу та приймає рішення щодо управління мережею.

Приклади керованих модулів в контролері Ryu включають модуль маршрутизації, модуль аналізу трафіку, модуль обробки подій та багато інших. Кожен з цих модулів відповідає за певний аспект управління мережею та допомагає забезпечити гнучкість та функціональність контролера Ryu у середовищі SDN.

API для розширення. Це програмний інтерфейс, який надається контролером Ryu для того, щоб розробники могли створювати власні додатки (або плагіни) для розширення функціональності контролера. Основні аспекти API для розширення:

- Гнучкість та розширюваність: API для розширення робить контролер Ryu дуже гнучким та розширюваним. Розробники можуть створювати власні додатки, які взаємодіють з контролером через це API, додаючи нові можливості та функції до системи.

- Стандартизація інтерфейсу: API для розширення має чіткий та стандартизований інтерфейс, який описує, як взаємодіяти з контролером та як використовувати його функціональність. Це дозволяє розробникам легко розуміти, як користуватися API та як взаємодіяти з контролером.

- Підтримка різних мов програмування: API для розширення контролера Ryu підтримує різні мови програмування, зокрема Python, яка є осно-

вною мовою для розробки додатків для контролера Ryu. Це дозволяє розробникам використовувати мову програмування, з якою вони найкраще знайомі.

- Доступ до функціональності контролера: API для розширення надає доступ до різних функцій та служб контролера Ryu. Це включає в себе можливість додавати правила маршрутизації, обробляти мережеві події, аналізувати мережевий трафік, змінювати конфігурацію мережі та інше.

- Розширення можливостей SDN: API для розширення допомагає розширювати можливості SDN в цілому. Розробники можуть створювати додатки, які вирішують конкретні завдання та вимоги мережі, додавати нові функції та забезпечувати інновації в області програмно-визначених мереж.

- Забезпечення безпеки та автентифікації: API для розширення також може включати механізми безпеки та автентифікації, щоб забезпечити безпечну взаємодію між додатками та контролером.

Підтримка різних протоколів. У контексті програмно-визначених мереж (SDN) і контролера Ryu, підтримка різних протоколів означає, що цей контролер може взаємодіяти з різними комутаторами та мережевими обладнаннями, що підтримує різні мережеві протоколи і стандарти. Основні аспекти підтримки різних протоколів:

- OpenFlow: OpenFlow є ключовим мережевим протоколом у світі SDN. Контролер Ryu підтримує версії OpenFlow, такі як OpenFlow 1.0, 1.3 і інші, що дозволяє йому взаємодіяти з комутаторами, які підтримують ці версії протоколу.

- NETCONF: NETCONF є іншим протоколом, який використовується для конфігурації та управління мережевими обладнаннями. Контролер Ryu може підтримувати NETCONF для інтеграції зі сховищами конфігурації мережі.

- BGP (Border Gateway Protocol): Контролер Ryu може бути налаштований для роботи з протоколом маршрутизації BGP, що дозволяє керувати маршрутами в мережі та забезпечувати зв'язок з іншими мережевими областями.

- REST API: Контролер Ryu може використовувати RESTful API для взаємодії з іншими додатками та системами через HTTP-запити. Це дозволяє створювати інтегровані рішення та додатки, які взаємодіють з контролером через стандартні HTTP-запити та відповіді.

- SNMP (Simple Network Management Protocol): Для моніторингу та управління мережевими обладнаннями, яке підтримує SNMP, контролер Ryu може використовувати цей протокол для отримання статистики та інформації про мережу.

- Інші протоколи: Крім вищезазначених, контролер Ryu може бути налаштований для роботи з іншими мережевими протоколами та стандартами в залежності від конкретних потреб мережі.

Підтримка різних мережевих протоколів дозволяє контролеру Ryu бути універсальним інструментом для управління різними типами комутаторів і обладнаннями у різних мережевих середовищах. Вона дозволяє побудовувати багатофункціональні та гнучкі мережі, а також інтегрувати SDN-рішення в існуючі мережеві інфраструктури.

Модуль обробки пакетів (Packet Processing Module). Модуль обробки пакетів є однією з ключових складових архітектури контролера Ryu в системі програмно-визначених мереж (SDN). Він відповідає за обробку та аналіз мережевих пакетів, які прокладають свій шлях через комутатори в мережі.

Основні аспекти модуля обробки пакетів:

- Перехоплення та аналіз пакетів: Модуль обробки пакетів може перехоплювати мережеві пакети, що проходять через комутатори, та аналізувати їх заголовки та вміст. Це дозволяє контролеру Ryu приймати рішення щодо маршрутизації, фільтрації, пересилання пакетів та інших мережевих операцій.

- Прийняття рішень на основі правил: Модуль обробки пакетів використовує набір правил, які визначають, як слід обробляти певні типи пакетів. Ці правила можуть бути встановлені адміністратором мережі або генеруватися автоматично на основі політики мережі.

- Маршрутизація та пересилання: Модуль обробки пакетів може визначати оптимальний шлях для пересилання пакетів в мережі. Він враховує інформацію про маршрутизацію та стан мережі для прийняття рішень про маршрут пакета.

- Фільтрація та політика безпеки: Модуль може використовувати правила фільтрації для відокремлення пакетів, які не відповідають політиці мережі, а також для застосування політики безпеки, включаючи виявлення та блокування потенційно небезпечних пакетів.

- Взаємодія з іншими модулями: Модуль обробки пакетів може взаємодіяти з іншими керуваними модулями контролера для вирішення складних мережевих завдань. Наприклад, він може використовувати модуль маршрутизації для визначення оптимального маршруту для пакета.

- Оптимізація мережевого трафіку: Модуль може використовувати аналіз мережевого трафіку для виявлення паттернів та можливостей оптимізації трафіку, таких як згортання пакетів або видалення надлишкових повідомлень.

- Діагностика та моніторинг: Модуль може збирати статистику та інформацію про мережевий трафік для цілей моніторингу та діагностики мережі.

Модуль обробки пакетів грає критичну роль у функціонуванні контролера Ryu та управлінні мережею в середовищі SDN. Він дозволяє контролеру приймати розумні рішення щодо маршрутизації, безпеки та оптимізації мережевого трафіку на основі поточних потреб мережі і політики управління.

Модуль зберігання даних (Datastore Module).

Модуль зберігання даних є важливою складовою архітектури контролера Ryu в системі програмно-визначених мереж (SDN). Його основна функція полягає в збереженні та управлінні інформацією, яка стосується мережевого стану, конфігурації та статистики. Основні аспекти модуля зберігання даних:

- Зберігання мережевого стану: Модуль зберігає інформацію про стан мережі, включаючи топологію, статус комутаторів, маршрути, VLAN, адреси MAC і багато іншої інформації.

- Конфігурація мережі: Він також зберігає дані про конфігурацію мережі, такі як правила маршрутизації, правила фільтрації, параметри якості обслуговування (QoS), VLAN-и, IP-адреси і інші параметри мережі.

- Статистика мережі: Модуль може збирати статистику про мережевий трафік, яка може бути використана для моніторингу та аналізу використання мережі, виявлення проблем та оптимізації ресурсів.

- Історія подій: Деякі модулі зберігання даних також можуть зберігати історію подій, яка відстежує, що відбувалося в мережі в минулому. Це може бути корисно для відновлення подій та відлагодження проблем.

- Інтерфейс для отримання та зміни даних: Модуль зазвичай надає програмний інтерфейс для контролера та інших модулів для отримання та зміни даних в збереженому стані мережі.

- Синхронізація з комутаторами: Модуль може взаємодіяти з комутаторами для синхронізації мережевого стану та конфігурації, забезпечуючи єдність управління мережею.

- Захист та безпека даних: Модуль повинен забезпечувати захист конфіденційної інформації та запобігати несанкціонованому доступу до даних.

- Модуль зберігання даних грає важливу роль у впорядкуванні та керуванні мережевими ресурсами в середовищі SDN. Він допомагає контролеру Ryu забезпечити надійне та ефективне функціонування мережі, забезпечуючи доступ до актуальних даних про стан мережі та конфігурацію.

Модуль моніторингу та аналізу (Monitoring and Analytics Module).

Контролер Ryu надає можливості моніторингу та аналізу мережевого трафіку. Цей модуль дозволяє відстежувати стан мережі у реальному часі, виявляти аномалії та здійснювати мережевий аналіз.

Основні аспекти модуля моніторингу та аналізу:

- Збір даних: Модуль активно збирає дані про мережевий трафік, включаючи інформацію про пакети, їхні заголовки, джерела і призначення, порти, протоколи та інші характеристики.

- Аналіз та обробка даних: Зібрані дані проходять через аналізатор, який виконує обробку даних та виявляє важливі паттерни, аномалії та потенційні проблеми.

- Моніторинг мережевого стану: Модуль відслідковує стан комутаторів, підключених до мережі, стан з'єднань, пропускну здатність та інші параметри для нагляду за працездатністю мережі.

- Генерація звітів та відомостей: Модуль може створювати звіти та відомості про використання мережі, стан комутаторів, аналіз трафіку та інші аспекти мережевої діяльності.

- Візуалізація даних: Зібрані та оброблені дані можуть бути візуалізовані у вигляді графіків, діаграм, теплових карт і інших графічних елементів для полегшення розуміння та аналізу мережевого стану.

- Виявлення аномалій і проблем: Модуль може автоматично виявляти аномалії та проблеми в мережі, такі як витоки трафіку, перевищення обсягу мережевого навантаження і т. д.

- Інтеграція з іншими модулями: Зібрані дані можуть бути використані іншими модулями контролера для прийняття рішень щодо управління мережею.

Модуль моніторингу та аналізу є критично важливим для вирішення завдань моніторингу, аналізу та діагностики в сучасних програмно-визначених мережах. Він допомагає адміністраторам мережі відстежувати мережевий стан, виявляти проблеми та оптимізувати ресурси для забезпечення надійності та ефективності мережі.

Модуль взаємодії з комутаторами (Switch Interaction Module). Основна функція цього модуля – взаємодія з комутаторами через протокол OpenFlow або інші мережеві протоколи. Він відповідає за встановлення правил маршрутизації, обробку подій від комутаторів та надсилання команд комутаторам.

Основні аспекти модуля взаємодії з комутаторами:

- Підключення до комутаторів: Модуль ініціює підключення до фізичних або віртуальних комутаторів в мережі, встановлюючи зв'язок із ними через протоколи зв'язку, такі як OpenFlow.

- Посилання на комутатори: Модуль зберігає інформацію про кожен підключений комутатор, включаючи ідентифікатори, IP-адреси, порти, стан з'єднань та інші параметри.

- Керування правилами пересилання: Модуль взаємодіє з комутаторами для встановлення правил пересилання пакетів та потоків даних. Він передає інструкції комутаторам щодо того, як обробляти мережевий трафік відповідно до політики мережі.

- Оновлення конфігурації: Модуль може оновлювати конфігурацію комутаторів, включаючи VLAN-и, параметри якості обслуговування (QoS), правила безпеки та інші налаштування.

- Моніторинг та відлагодження: Модуль дозволяє контролеру відстежувати стан комутаторів, визначати події, які стосуються комутаторів, і відлагоджувати можливі проблеми.

- Синхронізація стану: Модуль може синхронізувати стан мережі та конфігурацію між контролером і комутаторами, щоб забезпечити єдність управління мережею.

- Обробка подій від комутаторів: Модуль взаємодіє з подіями, які відправляються комутаторами, і реагує на них відповідно до політики мережі та потреб.

- Оптимізація пересилання: Модуль може оптимізувати пересилання мережевого трафіку, встановлюючи правила пересилання, які дозволяють ефективно використовувати ресурси мережі.

Модуль взаємодії з комутаторами є ключовим для забезпечення взаємодії контролера Ryu з фізичними та віртуальними комутаторами в мережі. Він дозволяє контролеру керувати мережею та впливати на шляхи пересилання пакетів для досягнення бажаних мережевих цілей.

Узагальнюючи, архітектура контролера Ryu дозволяє створювати гнучкі та розширювані програмно-визначені мережі, а також сприяє активному розвитку та інноваціям у світі SDN.

Взаємодія Контролера Ryu з комутаторами за допомогою OpenFlow. Спробуємо побудувати топологію SDN мережі в емуляторі mininet з використанням контролера Ryu. Для такої топології потрібно написати конфігураційний файл мережі з вказанням кількості хостів, свічів та запустити та підєднати до цієї топології контролер Ryu.

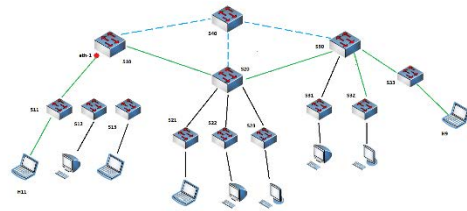


Рис. 2. Топологія SDN мережі

Конфігураційний файл мережі/топології має наступний вигляд:

```
#!/usr/bin/python
from mininet.topo import Topo
from mininet.net import Mininet
from mininet.link import TCLink
from mininet.node import Controller, OVSSwitch, RemoteController
from mininet.cli import CLI
from mininet.log import setLogLevel

def multiControllerNet():
    net = Mininet(controller=Controller, switch=OVSSwitch, link=TCLink)
    print "*** Creating (reference) controllers"
    c1 = RemoteController('c1', ip='172.0.0.1', port=6033)
    c2 = RemoteController('c2', ip='172.17.0.6', port=6033)
    c3 = RemoteController('c3', ip='172.17.0.7', port=6033)
    print "*** Creating switches"
    s10 = net.addSwitch('s10', dpid='000000000000010', mac='00:00:00:00:00:01')
    s20 = net.addSwitch('s20', dpid='000000000000020', mac='00:00:00:00:00:02')
    ...
    print "*** Creating hosts"
    h1 = net.addHost('h1', ip='10.0.0.1/24', mac='00:00:00:00:00:01')
    h2 = net.addHost('h2', ip='10.0.0.2/24', mac='00:00:00:00:00:02')
    ...
    print "*** Creating links"
    net.addLink(s10, s20, bw=100)
    net.addLink(s10, s40, bw=100)
    net.addLink(s20, s30, bw=100)
    net.addLink(s30, s40, bw=100)
    net.addLink(s10, s11, bw=100)
    ...
    print "*** Starting network"
    net.start()
    net.start()
    c1.start()
    s10.start([c1])
    s20.start([c1])
    s30.start([c1])
    ...
    CLI(net)
    if __name__ == '__main__':
        setLogLevel('info') # For CLI output
        multiControllerNet()
```

Рис. 3. Приклад конфігураційного файлу

Зазначений код описує процес запуску основних елементів мережі. Цей процес складається з наступних етапів:

- імпорт бібліотек python, що надають змогу компілятору python розуміти синтаксис опису саме топології Mininet;

- додання мережевих елементів: комутаторів з підтримкою OpenFlow, хостів, а також задання їм унікальні адреси та ідентифікатори в мережі, описання розташування контролера та порт на якому він приймає включення;

- додання мережевих зв'язків – підключення комутаторів між собою, а також підключення хостів до комутаторів;

- запуск мережевих компонентів, Mininet консолі, а також підключення кожного комутатора до контролера Ryu.

Потрібно скачати з GitHub файли контролера та встановити його на ОС, інструкція по встановленні описана в репозиторії який виграємо з сайту.

Для того щоб запустити контролер потрібно виконати команду в консолі:

Рис. 4. Приклад запуску контролера Ryu.

Після запуску контролера потрібно запустити саму мережу для цього виконаємо команду для запуску нашого файлу:

Рис. 5. Приклад запуску мережі mininet

В окремій консолі можна отримати різну інформацію по комутаторам.

`sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-desc s10` – Зі списку комутаторів можна отримати загальний опис кожного за допомогою «утиліти керування комутаторами OpenFlow» [14].

```
ryu@ryu-VirtualBox:~$ sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-desc s10
OFPT_DESC reply (OF1.3) (xid=0x2):
Manufacturer: Nicira, Inc.
Hardware: Open vSwitch
Software: 2.9.8
Serial Num: None
DP Description: s10
```

Рис. 6. Утиліти керування комутаторами OpenFlow

Якщо потрібно дізнатися детальний опис конкретного комутатора потрібно виконати команду `sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 show s10`:

```
ryu@ryu-VirtualBox:~$ sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 show s10
OFPT_FEATURES_REPLY (OF1.3) (xid=0x2): dpid:0000000000000010
n_tables:254, n_buffers:0
capabilities: FLOW_STATS TABLE_STATS PORT_STATS GROUP_STATS QUEUE_STATS
OFPT_PORT_DESC reply (OF1.3) (xid=0x3):
1(s10-eth1): addr:4e:33:8d:a0:icd:9e
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
2(s10-eth2): addr:d2:6c:d0:e8:8c:71
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
3(s10-eth3): addr:dc:fe:b7:8e:fs:rf
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
4(s10-eth4): addr:86:85:01:78:57:89
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
5(s10-eth5): addr:16:03:01:77:ca:4a
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
6(s10-eth6): addr:36:5d:9e:de:b9:f3
config: 0
state: LIVE
current: 10GB-FD COPPER
speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
LOCAL(s10): addr:2e:188:f1:fff:e0:47
config: PORT_DOWN
state: LINK_DOWN
speed: 0 Mbps now, 0 Mbps max
OFPT_SET_CONFIG_REPLY (OF1.3) (xid=0x7): frags:normal nls_send_len=0
ryu@ryu-VirtualBox:~$
```

Рис. 7. Детальний опис комутатора s10

Також можна отримати інформацію про порти на конкретному комутаторі `sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-ports s10`:

```
ryu@ryu-VirtualBox:~$ sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-ports s10
OFPT_PORT reply (OF1.3) (xid=0x2): 7 ports
port LOCAL: rx pkts=0, bytes=0, drops=198, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=0, bytes=0, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.257s
port "s10-eth0": rx pkts=35, bytes=3907, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=1041, bytes=68704, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.275s
port "s10-eth4": rx pkts=40, bytes=4207, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=1039, bytes=68591, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.277s
port "s10-eth1": rx pkts=145, bytes=13010, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=936, bytes=59901, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.277s
port "s10-eth5": rx pkts=40, bytes=4207, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=1037, bytes=68414, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.277s
port "s10-eth2": rx pkts=45, bytes=4742, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=1033, bytes=67966, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.277s
port "s10-eth3": rx pkts=857, bytes=53227, drop=0, errs=0, frame=0, over=0, crc=0
tx pkts=222, bytes=19561, drop=0, errs=0, coll=0
duration=1639.277s
```

Рис. 8. Інформація про порти на комутаторі s10

Дамп потоків OpenFlow для коммутатора `sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-flows s10`:

```
ryu@ryu-VirtualBox:~$ sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-flows s10
cookie=0x0, duration=1710.724s, table=0, n_packets=866, n_bytes=51960, priority=65535, dl_dst=01:80:c2:00:00:00 actions=CONTROLLER:65535
cookie=0x0, duration=1710.735s, table=0, n_packets=199, n_bytes=16779, priority=0 actions=CONTROLLER:65535
```

Рис. 9. Дамп потоків OpenFlow для коммутатора s10

Початкове узгодження встановлення зв'язку OpenFlow Як показано на малюнку 6, контролер Ryu та комутатор обмінюються повідомленнями OFPT_HELLO, кожен з яких може визначити версію OpenFlow іншого та працювати з найменшим спільним знаменником. Після цього початкового обміну, кожен пристрій може обмінюватися подальшими повідомленнями з використанням OpenFlow v1.3 [14].

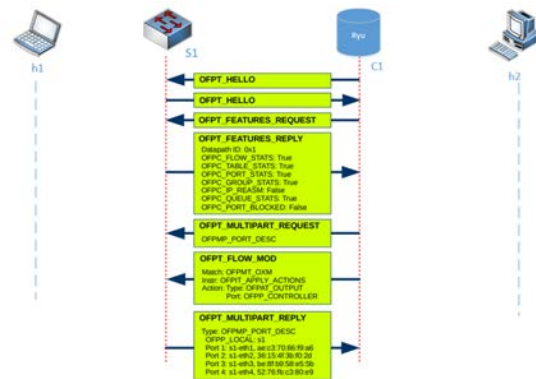


Рис. 10. Початкове рукостискання OpenFlow v1.3 [14]

Потім контролер Ryu відправляє повідомлення OFPT_FEATURES_REQUEST, щоб отримати ідентифікатор каналу даних (DPID) та можливості комутатора. DPID – це 64-бітове число, яке однозначно ідентифікує шлях передачі даних. Молодші 48 біт використовуються MAC-адреси комутатора, а старші 16 біт визначаються розробником, наприклад, для ідентифікатора VLAN. Комутатор відповідає OFPT_FEATURES_REPLY, який включає DPID та можливості, що підтримуються шляхом передачі даних. Потім контролер Ryu відправляє складовий запит на опис портів комутатора, який отримує відповідь з описом всіх портів комутатора, підтримують OpenFlow.

Контролер Ryu також відправляє комутатору модифікацію потоку OpenFlow, яка вказує на будь-який збіг, виведення на порт комутатора, підключений до контролера, іншими словами, відправку на контролер.

Це можна побачити і в OvS. Як тільки OvS отримує модифікацію потоку, він додає її до своєї таблиці потоків.

`sudo ovs-ofctl --protocols OpenFlow13 dump-flows s10`

```
cookie=0x0, duration=804.819s,
table=0, n_packets=416, n_bytes=24960,
priority=65535, dl_dst=01:80:c2:00:00:00
actions=CONTROLLER:65535
cookie=0x0, duration=804.830s, table=0,
n_packets=161, n_bytes=13601, priority=0
actions=CONTROLLER:65535
```



Рис. 11. Статус порту комутатора

Потім комутатор відправляє повідомлення PFPT_PORT_STATUS контролеру Ryu для кожного зі своїх портів, як показано на малюнку 7. Коли комутатор отримує пакети, наприклад, на малюнку 14, на комутаторі приймається пакет ICMP. Він виконує перевірку запису таблиці і виявляє, що вона має запис «промах таблиці» без потоку. Для обробки умов відсутності таблиці контролер Ryu відправляє запис потоку з знаками підстановки, яка багато в чому аналогічна маршруту за умовчанням в IP-маршрутизації. Вона відповідає всім полям і має пріоритет, рівний 0. Вона називається записом потоку таблиці-промаху і дає команду комутатору OpenFlow пересилати пакети в порт контролера (дія = вихід: порт контролера) [14].

Висновки. Ryu – це відкритий контролер мережі (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок посилення управління та адаптації способів обробки трафіку. Контролер Ryu надає програмні компоненти разом із певними інтерфейсами прикладних програм (API), які сприяють розробникам створення нових додатків керування та контролю мережі. Цей компонентний підхід допомагає організаціям налаштувати розвертання відповідно до своїх конкретних потреб; Розробники можуть швидко і легко змінити існуючі компоненти або видалити свої власні, щоб базовий набір відповідав змінним вимогам їх програм. У майбутньому планується вивчити більше контролерів, щоб зменшити їх вплив на продуктивність SDN.

В даній статті ми розкрили основні аспекти контролера Ryu, зараз досить важко знайти корисну інформацію про контролер що відповідає дійсності. Також ми навели приклад як можна запустити даний контролер в побудовану топологію і показали яким чином можна перевірити працездатність елементів мережі та описати процес взаємодії контролера з комутаторами за допомогою OpenFlow.

Основна проблема на сьогодні по даному контролеру це обмежена інформація по його роботі, тому в даній статті ми намагалися розкрити базові аспекти для розуміння та початку роботи з цим контролером.

Список літератури:

1. N. McKeown, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," in SDN: Software Defined Networks, O'Reilly Media, 2013, pp. 85-108. [Online]. Available: <https://www.oreilly.com/library/view/sdn-software-defined/9781449342425/ch04.html>
2. Arshad, M. A. Khan, T. A. Zia, and U. Farooq, "Performance Evaluation of SDN Controllers in Wireless Network," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338071223_Performance_Evaluation_of_SDN_Controllers_in_Wireless_Network
3. F. Lahmar and F. Lahmar, "Controllers in SDN: A Review Report," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/325706050_Controllers_in_SDN_A_Review_Report.
4. "SDN controller (software-defined networking controller)," TechTarget. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/SDN-controller-software-defined-networkingcontroller>.
5. M. Ali and H. Shamim, "Performance Analysis of Ryu-POX Controller in Different Tree-Based SDN Topologies," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354230822_Performance_Analysis_of_Ryu_POX_Controller_in_Different_Tree-Based_SDN_Topologies.
6. M. Uddin, M. Ali, and M. A. Rahman, "Node to Node Performance Evaluation through RYU SDN Controller," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338703576_Node_to_Node_Performance_Evaluation_thru_RYU_SDN_Controller/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic
7. J. Hurwitz, "SDN Series Part IV: Ryu, a Rich Featured Open Source SDN Controller Supported by NTT Labs," [Online]. Available: <https://thenewstack.io/sdn-series-part-iv-ryu-a-rich-featured-opensource-sdn-controller-supported-by-ntt-labs/>
8. "Comparison of Software Defined Networking (SDN) Controllers – Part 5: Ryu," Aptira. [Online]. Available: <https://aptira.com/comparison-of-software-defined-networking-sdn-controllers-part-5-ryu/>.
9. "Topics related to Ryu SDN Controller," GitHub. [Online]. Available: <https://github.com/topics/ryusdn-controller>

10. "Ryu SDN Framework Documentation," [Online]. Available: <https://ryu.readthedocs.io/en/latest/>.
11. D. O'Riain, "RYU SDN Controller: Soft Testbed," [Online]. Available: https://www.obriain.com/training/sdn/RYU_Soft_Testbed_v2.0.pdf
12. Романов, О., Бурлака, Г., Берестовенко, О., & Підпалій, О. (2023). ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ LI-FI МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ SDN. Вісник Черкаського державного технологічного університету, (3), 16–25. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2023.284893>
13. "Comparison of Software Defined Networking (SDN) Controllers – Part 7: Comparison and Product Rating," Aptira. [Online]. Available: <https://aptira.com/comparison-of-software-defined-networking-sdncontrollers-part-7-comparison-and-product-rat>
14. "Testbed Manual by Diarmuid Ó Briain is licensed under CC BY-SA 4.0," [Online]. Available: https://www.obriain.com/training/sdn/RYU_Soft_Testbed_v2.0.pdf.
15. Romanov, O., Korniienko, N., Obod, I., Svyd, I. Construction of the SDN Control Level Based on ONOS // UkrMiCo 2021 – 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Proceedings, 2021, страницы 127–132, doi: 10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716691.
16. Романов О.І., Нестеренко М.М., Фесьоха Н.О. Аналіз сучасних технологій віртуалізації для побудови інформаційно телекомунікаційних систем //Збірник наукових праць [Військового інституту телекомунікацій та інформатизації].-2019.-Вип. 1.-С. 82-90. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviti_2019_1_13.
17. Romanov, O., Nesterenko, M., Veres, L. Integration Of Modern Protocols Ip-Telephony In Ims Architecture, 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047587.
18. Romanov, O., Korniienko, N., Burlaka, H. Construction of the SDN Transport Network Model using the T-API Interface, 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2021, pp. 220-224, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628980.

Romanov O.I., Burlaka H.Yu. SDN NETWORK MANAGEMENT USING RYU CONTROLLER

In the world of network management technology, the Ryu controller stands out from the rest, paving the way for innovative applications in the field of software-defined networking (SDN). Its flexibility and extensibility make it not only a powerful tool for creating and managing networks, but also a platform for implementing advanced concepts in the field of communications.

This paper explores the interaction between Ryu's Software-Defined Networking (SDN) controller and switches in an open network environment. The article discusses the main aspects of managing OpenFlow rules using the Ryu controller, and the important stages of connections between the controller and switches are revealed. to various network elements using OpenFlow.

The article is about the Ryu Controller, an open-source network controller (SDN) designed to increase network flexibility by enhancing management and adapting the way traffic is handled. In general, an SDN controller is the brain of SDN, communicating information about switches and routers through southbound APIs, and applications and business logic through northbound APIs.

The Ryu framework differs from other solutions in that it provides a simple supporting infrastructure that users of the platform must write to use at their own discretion. While this requires development expertise, it also provides the full flexibility of an SDN solution. Existing components can be quickly and easily upgraded and integrated into existing networks to meet the changing needs of different applications using these components. Due to its characteristics, Ryu is an excellent solution for small commercial and experimental applications.

Key words: *mininet, Ryu Controller, OpenFlow, APP Manager, Ryu Libraries.*

Сайко В.Г.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Радзівілов Г.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Фомін М.М.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Солодовник В.І.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г.Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ВИБОРУ АБОНЕНТСЬКИМ ТЕРМІНАЛОМ СТІЛЬНИКА МЕРЕЖІ 5G МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано для реалізації попереджувального хендоверу, як нової послуги 5G, що можна охарактеризувати як процес забезпечення надійності функціонування мережі при блокуванні передачі прямої видимості при використанні терагерцового діапазону хвиль, удосконалений алгоритм адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку. Дане інноваційне рішення при якому встановлюють з'єднання абонентського терміналу мобільного абонента з довільною базовою станцією децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яке відрізняється від відомих тим, що при надсиланні повідомлення до довільної базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку про необхідність встановлення з'єднання в мобільній мережі базових станцій, одночасно надсилається повідомлення про створення тимчасового кластеру для забезпечення функціонування при блокуванні передачі прямої видимості. Крім того, для підвищення ефективності функціонування відомого алгоритму введені допоміжні технологічні операції: після проведення вибору базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка задовольняє технічні і фінансові потреби абонента, визначають значення параметра RSRP, який оцінює потужність сигналів на основі пілотних сигналів, що надходять від поточних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку за допомогою мобільних телефонів/терміналів, у зонах обслуговування ближнього і дальнього енергетичних полях базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку, а також налаштовують процедури для сеансу зв'язку тимчасового кластеру/кемпінгу операторів шляхом встановлення індивідуальних пріоритетів допоміжних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

Підвищення ефективності застосування удосконаленого алгоритму адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку для терагерцового діапазону довжин хвиль, що пропонується, у порівнянні з відомими, полягає в тому, що шляхом застосування інфраструктури блокчейну, забезпечується зниження складності мережі, значне зменшення експлуатаційних витрат оператора і, відповідно, підвищення надійності та оперативності управління алгоритму адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку, що пропонується, при блокуванні прямої видимості.

Ключові слова: *способи адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку, мережі зв'язку n-ятого покоління, інфраструктура блокчейну.*

Постановка проблеми. Сьогодні у світі 72 країни вже запустили сервіси мобільного зв'язку 5G, понад 460 операторів із 137 країн інвестують у пілотні розробки та проводять тестові запуски [1]. Технологія бездротового доступу 3GPP New Radio (NR) становиться основою систем 5G, що забезпечують високі швидкості передачі даних на інтерфейсі радіодоступу. Передача даних у таких системах вестиметься у терагерцовому діапазоні довжин хвиль, особливістю якого є необхідність прямої видимості між пристроями, що беруть участь у з'єднанні. Одним із завдань у мережах, побудованих на основі терагерцових точок доступу, є завдання знаходження оптимального розташування точок доступу для забезпечення зони покриття мережі стійким зв'язком. Системи NR функціонують у терагерцовому діапазоні частот, і у перспективі дозволять досягати високих швидкостей передачі до кількох гігабіт на секунду, й водночас значно менших затримок на рівні радіоканалу у порівнянні з сучасними системами четвертого покоління. В даний час оператори мереж та постачальники телекомунікаційних послуг вже проводять випробування цієї технології в умовах, наближених до реальних, і перед дослідницькою спільнотою постає ряд нових завдань, що вимагають методів аналізу продуктивності, доцільності та можливості впровадження тих чи інших послуг у системах 5G NR. Системи 5G NR не тільки дозволяють досягти нових унікальних можливостей, але й разом з цим ставлять перед розробниками телекомунікаційних мереж безліч складних задач, серед яких можна відзначити блокування радіопромінів рухомими об'єктами, необхідність в ефективних механізмах керування променем і т.д.

В реальних умовах найбільші труднощі системам 5G NR у більшості випадків привносять рухливі перешкоди, такі як люди і транспортні засоби, які є блокаторами поширення радіосигналу. У випадку якщо обладнання тимчасово потрапляє в стан блокування радіосигналу деяким об'єктом, то залежно від середовища розповсюдження сигналу та відстані між мобільним терміналом/пристроєм (MT) і базовою станцією NR BS (англ. New Radio Base Station) цей пристрій може або випасти із зони покриття базової станції (БС), або знизити свою схему модуляції та кодування таким чином, щоб ймовірність помилки на рівні каналу не перевищувала наперед визначеного цільового значення. Нещодавно консорціум 3GPP запропонував можливе вирішення проблеми виходу із зони покриття, яке полягає в механізмі «множинних з'єднань» (англ. multiconnectivity) [2].

При використанні цього принципу одночасно підтримується кілька активних каналів зв'язку пристроєм з допоміжними NR BS, і у разі блокування радіосигналу з'єднання передається на одну з них. В умовах блокування для того, щоб підтримувати необхідну швидкість передачі через основну та через резервну базові станції, необхідна більша кількість фізичних ресурсів. Якщо для підтримки необхідної швидкості радіо ресурсів недостатньо, то поточна сесія скидається, або послуга продовжується надається з нижчою швидкістю з'єднання, якщо це передбачено угодою про рівень обслуговування (SLA-Service Level Agreement). Але на сьогодні механізми реалізації даного підходу [2] знаходяться в стадії розробок і дослідження. Усе це загалом і визначило мету та завдання даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відоме рішення під назвою «Тимчасові ефекти мобільних блокаторів у міських стільникових сценаріях міліметрового діапазону», при якому здійснюють одночасне підключенням користувача до кількох базових станцій мережевої інфраструктури в умовах їх щільного розміщення, що враховує блокування каналу прямої видимості перешкодами при передачі на вкрай високих частотах [3].

До недоліків відомого способу [3] відноситься те, що існує складність його технічної реалізації на існуючій інфраструктурі мобільного зв'язку 5G, що призводить до додаткових затримок перемикання каналів, оскільки рішення приймаються віддалено, та відповідно знижує загальну ефективність системи. Це пов'язано з тим, що існуюча централізована архітектура інфраструктури мереж мобільного зв'язку на сьогодні є вразливою з точки зору перевантаження обчислювальних ресурсів і тому вона не гарантує безперебійне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення. Тому, зростаюча потреба в різноманітних додатках, що потребують високої пропускної здатності, таких як мобільне потокове відео та обробки великих даних, потребує зміни принципів управління радіо ресурсами в мережах мобільного зв'язку, щоб уникнути їх дефіциту ресурсів для забезпечення новітніх сервісів для абонентів.

В [4, 5, 6, 7] авторами розглядаються алгоритми оптимізації для підтримки багатоадресної передачі у високочастотній системі, що обслуговують тільки трафік багатоадресної передачі. Зокрема розглядається спільне обслуговування трафіку одноадресних і багатоадресних з'єднань,

пропонується досить проста аналітична модель обслуговування, а також зроблено висновок про досяжність балансу між показниками ефективності для одноадресних і багатоадресних сесій і числом елементів в антені, що застосовується в базовій станції. Але отримані дані малоефективні при застосуванні у терагерцовому діапазоні довжин хвиль, особливо при блокуванні передачі прямої видимості.

Відомий цикл публікацій по даній тематиці авторів даної статті [8, 9, 10].

Постановка завдання. В основу даного дослідження покладено задачу шляхом введення додаткових технологічних операцій, що передбачають визначення значення параметра RSRP, який оцінює потужність на основі щільних сигналів за допомогою мобільних терміналів абонентів, що надходять від поточних базових станцій, у зонах обслуговування ближнього і дальнього енергетичних полях базових станцій, доступного обсягу радіочастотного ресурсу терагерцового діапазону та налаштування процедур для сеансу зв'язку тимчасового кластеру (кемпінгу) базових станцій, забезпечити підвищення надійності функціонування системи адаптивного вибору абонентом оператора в режимі реального часу в децентралізованих мережах 5G мобільного зв'язку при блокуванні прямої видимості у терагерцовому діапазоні довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу

Аналіз відомого рішення по забезпеченню адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку

Найбільш близьким технічним рішенням [11], як за суттю, так і за задачею, що вирішується є алгоритм адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку при якому:

- встановлюють з'єднання абонентського терміналу мобільного абонента з довільною базовою станцією децентралізованої мережі мобільного зв'язку,
- надсилають повідомлення до довільної базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку про необхідність установа з'єднання в мобільній мережі базових станцій,
- обробляють в довільній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку інформацію щодо необхідності установа з'єднання,
- надсилають з базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку повідомлення абонента разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом,

- забезпечують підтвердження даних про абонента у блокчейні, що містить реєстр SLA (Service Level Agreement),

- відправляють з блокчейну за допомогою смарт-контракта повідомлення абонента усім базовим станціям децентралізованої мережі мобільного зв'язку, що знаходяться поблизу мобільного телефону/терміналу,

- отримують на базових станціях децентралізованої мережі мобільного зв'язку, що знаходяться поблизу мобільного телефону/терміналу, зазначене повідомлення,

- аналізують в кожній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку можливість виконати завдання та прийняти запит на встановлення з'єднання або відхилити запит, якщо його ресурсів виявиться недостатньо для виконання завдання,

- відправляють в зворотному напрямі до блокчейну відповідь, отримують в блокчейні відповіді, що надходять з базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку,

- надсилають з блокчейну відповіді у вигляді обраного варіанта запиту мобільного телефону/терміналу на реєстрацію у мобільній мережі базових станцій,

- отримують в мобільному телефоні/терміналі відповіді від базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку,

- проводять вибір базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка задовольняє технічні потреби і вартості відповідного сервісу абонента,

- відправляють запит на реєстрацію у вибраній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку мобільного телефону/терміналу,

- підтверджують реєстрацію мобільного телефону/терміналу в децентралізованої мережі мобільного зв'язку, а на підставі підтвердження реєстрації мобільного телефону/терміналу, оновлюють, реєстр SLA (Service Level Agreement) в мережі блокчейн.

Блокчейн в даному контексті виконує функції нотаріального засвідчення коректності даних, та прав доступу окремих абонентів чи операторів до їх зчитування або модифікації, що забезпечує технологічні передумови для автоматизованого регулювання ринку мобільного зв'язку на основі смарт-контрактів. Старт-контракт – це комп'ютерна програма, що зберігається та виконується в інфраструктурі блокчейн, із гарантією коректності виконання на основі протоколів консенсусу між валідаторами (майнерами) у мережі.

Використання смарт-контрактів дає змогу автоматизувати процес спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, шляхом продажу або обміну токенизованих активів, забезпечуючи при цьому належний рівень довіри між операторами. Крім того, використання розподіленої блокчейн інфраструктури забезпечує наскрізну автентифікацію абонентів у мережі будь-якого оператора на основі публічного ключа у мережі блокчейн. В свою чергу, оператори мають змогу обмінюватись даними, для забезпечення неперервного обслуговування абонентів при хендовері абонентів між своїми мережами. Абоненти можуть адаптивно перемикатися між мережами різних операторів в режимі реального часу, узгоджуючи угоди SLA на основі старт-контрактів.

До недоліків відомого алгоритму адаптивного вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку відноситься те, що його реалізація розрахована на обслуговування трафіку одноадресних з'єднань і тому являється малоефективним при застосуванні багатадресних з'єднань у терагерцовому діапазоні довжин хвиль.

Алгоритм інноваційного рішення по адаптивному вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку

Суть інноваційного рішення по адаптивному вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль **полягає в тому, що** при надсиланні повідомлення до довільної базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку про необхідність установа з'єднання в мобільній мережі базових станцій, одночасно надсилається повідомлення про створення тимчасового кластеру для забезпечення функціонування при блокуванні передачі прямої видимості, а після проведення вибору базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка задовольняє технічні потреби абонента, визначають значення параметра RSRP, який оцінює потужність на основі пілотних сигналів, що надходять від поточних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку за допомогою мобільних телефонів/терміналів, у зонах обслуговування ближнього і дальнього енергетичних полях базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку, та налаштовують процедури для сеансу зв'язку тимчасового кластеру/кемпінгу операторів шляхом встановлення індивідуальних пріоритетів допоміжних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

Таким чином, особливістю запропонованого рішення полягає в тому, що запит на реєстрацію у вибраній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку мобільного телефону/терміналу відправляють на підставі налаштованої процедури для сеансу зв'язку тимчасового кластеру/кемпінгу операторів

Алгоритм інноваційного рішення по адаптивному вибору абонентським терміналом стільника мережі 5G мобільного зв'язку, що пропонується, функціонує наступним чином.

На першому етапі встановлюють з'єднання абонентського терміналу мобільного абонента з довільною базовою станцією децентралізованої мережі мобільного зв'язку (далі – БС), що застосовує в своїй роботі терагерцовий діапазон довжин хвиль.

Далі надсилають повідомлення до довільної базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку про необхідність установа з'єднання в мобільній мережі базових станцій. При цьому, при надсиланні повідомлення до довільної базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку про необхідність установа з'єднання в мобільній мережі базових станцій, одночасно надсилається повідомлення про створення тимчасового кластеру для забезпечення функціонування при блокуванні передачі прямої видимості.

Даний процес пояснюється таким чином з використанням рис. 1 на якій позначено:

А – Зона обслуговування головної базової станції.

В – Зона обслуговування допоміжної базової станції № 1.

С – Зона обслуговування допоміжної базової станції № 2.

r_1, r_2, r_3 – радіуси ближнього поля зони обслуговування головної базової станції, допоміжних базових станцій № 1 і № 2 відповідно.

R_1, R_2, R_3 – радіуси дальнього поля зони обслуговування головної базової станції, допоміжних базових станцій № 1 і № 2 відповідно.

1 – блокатор.

2 – МТ без прямої видимості до головної базової станції.

3 – МТ з прямою видимістю до головної базової станції.

4 – головна базова станція.

5 – допоміжна базова станція № 1.

6 – допоміжна базова станція № 2.

Згідно з рис. 1 повідомлення, що передається, містить два основні поля: поле ідентифікації МТ і поле інформації про завдання. Поле ідентифікації

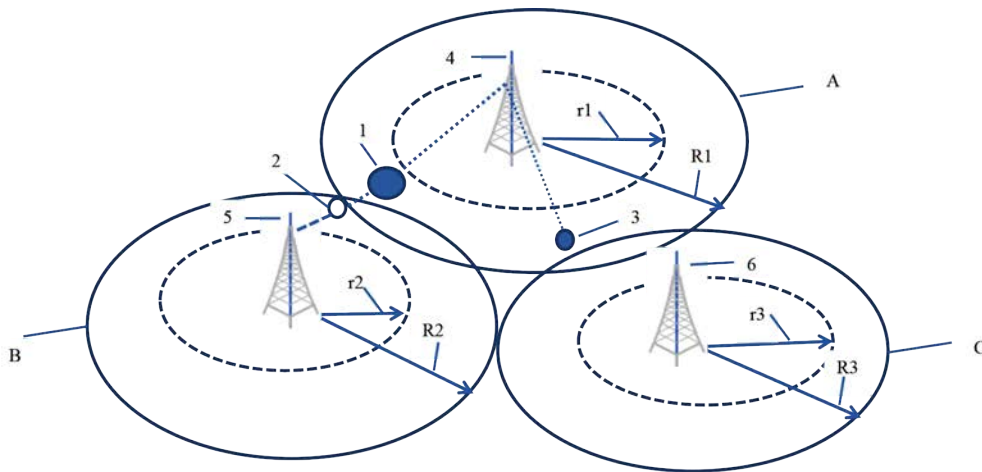


Рис. 1. Інфраструктура побудови з'єднань у кластері базових станцій при блокуванні прямої видимості у терагерцовому діапазоні довжин хвиль запропонованого рішення

містить ідентифікаційний номер MT 4, а також довготу, широту поточного розташування MT, вимірних значень потужностей прийнятих пілотних сигналів (RSRP) для усіх видимих базових станцій 5, 6. Поле інформації про завдання містить інформацію про техніко-економічні вимоги абонента, якості і вартості відповідного сервісу

Ця інформація включає мінімальну якість сервісу, з урахування показників якості при блокуванні передачі прямої видимості, яка задовольняє абонента, максимальну вартість, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс.

Далі обробляють в довільній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку інформацію щодо необхідності установа з'єднання.

Продовжують процес тим, що надсилають з базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку повідомлення абонента разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом та забезпечують підтвердження даних про абонента у блокчейні, що містить реєстр SLA (Service Level Agreement) [12].

Після підтвердження даних про абонента у блокчейні, що містить реєстр SLA (Service Level Agreement), відправляють з блокчейну за допомогою смарт-контракта повідомлення абонента усім базовим станціям децентралізованої мережі мобільного зв'язку, що знаходяться поблизу мобільного телефону/терміналу.

Далі базові станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, що знаходяться поблизу мобільного телефону/терміналу, отримують зазначене повідомлення. Після отримання зазначеного повідомлення в кожній базовій станції децентра-

лізованої мережі 5G мобільного зв'язку аналізують можливість виконати завдання та прийняти запит на встановлення з'єднання або відхилити запит, якщо його ресурсів виявиться недостатньо для виконання завдання.

Згідно з рис. 1 механізм прийняття рішень кожної найближчої БС 4, 5, 6 визначає таке:

1. Загальний час, необхідний для виконання завдання, визначеного у повідомленні запиту абонента з урахуванням поточних доступних ресурсів.

2. Загальну якість сервісу з урахуванням поточних доступних ресурсів.

3. Загальну вартість відповідного сервісу з урахуванням поточних доступних ресурсів.

Механізм прийняття рішень кожної БС 4, 5, 6 (див. рис. 1) обчислює якість сервісу і вартість відповідного сервісу для прийняття рішення по запиту на встановлення з'єднання шляхом порівняння якості сервісу і вартості відповідного сервісу з визначеними пороговими рівнями.

Якщо ці дані менше за пороговий рівень, механізм прийняття рішень відхиляє запит на встановлення з'єднання і змінна рішення встановлюється рівною нулю. В іншому випадку БС 4, 5, 6 (див. рис. 1) приймають запит на встановлення з'єднання і відправляють повідомлення у відповідь з рішенням на MT 3 (див. рис. 1). MT 3 також повинен перевірити мінімальну якість сервісу, яка задовольняє абонента, максимальну вартість, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс, необхідну для QoS для позитивних відповідей.

У відповіді повідомлення БС 4, 5, 6 (див. рис. 1) містить три основні поля: поле ідентифікації, поле рішення щодо якості і вартості відповідного

сервісу та поле специфікацій виконання. Поле рішення про якість і вартість відповідного сервісу є однобітовим полем, яке відноситься до угоди про запит на встановлення з'єднання та забезпечення функціонування тимчасового кластеру: одиниця для згоди і нуль для відхилення. Поле специфікації виконання заповнюється лише якщо поле двійкового рішення встановлено в одиницю. У цьому полі вказуються основні особливості процесу виконання показників якості і вартості відповідного сервісу, доступний обсяг радіочастотного ресурсу в терагерцовому діапазоні.

Потім БС 4, 5, 6 (див. рис. 1) відправляють в зворотному напрямі до блокчейну відповіді. Повідомлення, яке містить відповіді БС, при відправленні в зворотному напрямі до блокчейну, відноситься до угоди про запит на встановлення з'єднання та забезпечення функціонування тимчасового кластеру.

Далі відповіді отримують в блокчейні, що надходять з базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку, та надсилають з блокчейну відповіді у вигляді обраного варіанта запиту мобільного телефону/терміналу на реєстрацію у мобільній мережі базових станцій.

Потім отримують в мобільному телефоні/терміналі (МТ) відповіді від базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

Далі проводять вибір базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка задовольняє технічні потреби і вартості відповідного сервісу абонента.

Даний процес пояснюється таким чином.

Якщо поблизу знаходиться більше одної БС 5, 6 (див. рис. 1) з доступними ресурсами, що підходять для виконання завдання, та позитивною відповіддю на рішення про запит на встановлення з'єднання, МТ 3 розраховує показник якості сервісу, який задовольняє абонента, та вартість, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс з позитивною відповіддю.

Потім модуль прийняття рішень МТ 3 (див. рис. 1) обчислює рішення про встановлення з'єднання з найближчою БС 4 (головною БС) (див. рис. 1) з найменшим значенням відносно максимальної вартості, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс і найбільшим значенням відносно мінімальної якості сервісу, яка задовольняє абонента.

Після проведення вибору базової станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка задовольняє технічні потреби абонента, визначають значення параметра RSRP, який оцінює

потужність на основі пілотних сигналів, що надходять від поточних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку за допомогою мобільних телефонів/терміналів, у зонах обслуговування ближнього і дальнього енергетичних полях базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку, та доступного обсягу радіочастотного ресурсу в терагерцовому діапазоні, та налаштовують процедури для сеансу зв'язку тимчасового кластеру/кемпінгу операторів шляхом встановлення індивідуальних пріоритетів допоміжних базових станцій децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

Процедура формування тимчасового кластеру (кемпінгу) і налаштування процедур кемпінгу для забезпечення функціонування мережі при блокуванні передачі прямої видимості включає наступне.

Для обслуговування запиту користувача БС виділяє радіочастотний ресурс, розмір якого в загальному випадку є випадковою величиною і визначається місцем розташування МТ. Згідно з [13], згасання радіосигналу в просторі LdB визначається такими рівняннями:

$$L_{dB} = \begin{cases} 32,4 + 21 \log(x) + 20 \log f_c, & \text{при прямій видимості,} \\ 47,4 + 21 \log(x) + 20 \log f_c, & \text{без прямої видимості,} \end{cases} \quad (1)$$

де f_c – робоча частота, що вимірюється в ГГц, x – відстань між БС та МТ.

З цих рівнянь можна обчислити відстані, при яких з'єднання все ще може бути встановлено в умовах прямої видимості (LoS) та в умовах без прямої видимості ($nLoS$) відповідно. Для цього достатньо задати граничне значення LdB як мінімальне допустиме значення співвідношень сигнал-шум (англ. Signal-to-Noise Ratio, SNR), необхідне для успішного встановлення з'єднання.

Модуль прийняття рішень МТ 3 (див. рис. 1) обчислює відстані згідно рівнянь (1) та координат БС, які дали позитивну відповідь на рішення про запит на створення кластеру для забезпечення функціонування при блокуванні передачі прямої видимості, при яких з'єднання все ще може бути встановлено в умовах прямої видимості (LoS) та в умовах без прямої видимості ($nLoS$) для кластеру А, В, С БС 4, 5, 6, які знаходяться приблизно на дальності 1-2 км одна від одної. На основі цих даних назначаються пріоритети тимчасового кластеру при блокуванні передачі прямої видимості.

По закінченню зазначеного вище процесу, відправляють запит на реєстрацію у вибраній базовій станції та у мережах обраних операторів вибраного кластера децентралізованої мережі мобільного зв'язку мобільного телефону/терміналу.

Потім БС 4, 5, 6 (див. рис. 1) підтверджують реєстрацію МТ абонента в мережах обраних БС вибраного кластера і далі виконується налаштування процедур профіль-орієнтованого кемпінгу і установка індивідуальних пріоритетів вибору стільників, установлення багатоадресного віртуального з'єднання операторів вибраного кластера.

Запит на реєстрацію у вибраній базовій станції децентралізованої мережі мобільного зв'язку мобільного телефону/терміналу відправляють одночасно з запитом на реєстрацію у мережах обраних операторів вибраного кластера,

Після отримання запиту підтверджують реєстрацію мобільного телефону/терміналу на вибраній базовій станції та у мережах обраних операторів вибраного кластера децентралізованої мережі мобільного зв'язку, а на підставі підтвердження реєстрації мобільного телефону/терміналу, оновлюють, реєстр угоди про рівень обслуговування (SLA) в мережі блокчейн.

Результати моделювання показали, що запропоноване рішення дозволяє знизити ймовірність скидання користувацької сесії від двох і більше разів у порівнянні з базовим алгоритмом без включення.

Висновки

1. Підвищення ефективності застосування алгоритму адаптивного вибору/перевибору абонентським терміналом стільника мережі мобіль-

ного зв'язку при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль для реалізації нової послуги в мережах 5G під назвою «попереджувальний хендовер», що пропонується, у порівнянні з відомими, полягає в тому, що шляхом застосування інфраструктури блокчейну, забезпечується зниження складності мережі, значне зменшення експлуатаційних витрат оператора і, відповідно, підвищення надійності та оперативності управління способом адаптивного вибору/перевибору абонентським терміналом стільника мережі мобільного зв'язку при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль, що заявляється, при блокуванні прямої видимості.

2. Шляхом введення додаткових технологічних операцій, що передбачають визначення значення параметра RSRP, який оцінює потужність на основі пілотних сигналів за допомогою мобільних терміналів абонентів, що надходять від поточних базових станцій, у зонах обслуговування ближнього і дальнього енергетичних полях базових станцій, доступного обсягу радіочастотного ресурсу терагерцового діапазону та налаштування процедур, забезпечується підвищення надійності функціонування системи адаптивного вибору/перевибору абонентом оператора в режимі реального часу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку при блокуванні прямої видимості у терагерцовому діапазоні довжин хвиль.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
2. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 31.07.2019). (дата звернення 10.06.2023)
3. Gareyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S.A., Riza M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye. On the Temporal Effects of Mobile Blockers in Urban Millimeter-Wave Cellular Scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017. Vol. 66, no. 11. Pp. 10124–10138.
4. Feng W., Li Y., Niu Y., Su L., and Jin D. Multicast spatial reuse scheduling over millimeter-wave networks. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. 2017. Pp. 317–322.
5. Kim W., Song T., Pack S. Rate adaptation for directional multicast in IEEE 802.11 Ad Networks in Consumer Electronics. *IEEE International Conference*. 2012. Pp. 364–365.
6. Park H., Park S., Song T., and Pack S. An incremental multicast grouping scheme for mmWave networks with directional antennas. *IEEE Communication Letters*. 2013. Vol. 17, no. 3. Pp. 616–619.
7. Biazon A. and Zorzi. M. Multicast via Point to Multipoint Transmissions in Directional 5G mmWave Communications. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57, no. 2. Pp. 88–94.
8. Сайко, В., & Наритник, Т. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2023. 2(2). С. 166–181. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.16> (дата звернення 10.12.2023).
9. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Баховський П.Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. серія: технічні науки*. 2023. том 34 (73) № 1. С. 51–55.
10. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Застосування блокчейн системи для безпечного обміну повідомлень в гетерогенних мобільних мережах терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. серія: технічні науки*. 2023. том 34 (73) № 2 частина 1. С. 92–97.

11. T. Maksymyuk J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler. Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G. *IEEE Communications Magazine*, 2020. vol. 58, no. 9, pp. 86–92.
12. Кравченко П. Блокчейн і децентралізовані системи: частина 3. Харків: ПРОМАРТ, 2022. 380 с.
13. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. 2019. Німеччина: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing RU". 68 с.

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Fomin M.M., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. IMPROVED ALGORITHM FOR ADAPTIVE SELECTION BY THE SUBSCRIBER TERMINAL OF THE 5G MOBILE NETWORK

An improved algorithm for the adaptive selection of a 5G mobile network cell by a subscriber terminal is proposed for the implementation of a warning handover as a new 5G service, which can be characterized as a process of ensuring the reliability of the network operation when blocking the line-of-sight transmission when using the terahertz wave range. This is an innovative solution in which a connection is established between a subscriber terminal of a mobile subscriber and an arbitrary base station of a decentralized mobile communication network, which differs from the known ones in that when sending a message to an arbitrary base station of a decentralized mobile communication network about the need to establish a connection in the mobile network of base stations, a message is simultaneously sent about the creation of a temporary cluster to ensure functioning when line-of-sight transmission is blocked. In addition, to increase the efficiency of the well-known algorithm, auxiliary technological operations are introduced: after selecting a base station of a decentralized mobile communication network that meets the technical and financial needs of the subscriber, the value of the RSRP parameter is determined, which estimates the signal strength based on incoming pilot signals from the current base stations of the decentralized mobile communication network using mobile phones/terminals, in the service areas of the near and far energy fields of the base stations of the decentralized mobile communication network, and also configure the procedures for the communication session of the temporary cluster/camping of operators by setting individual priorities of auxiliary base stations of the decentralized mobile network. The improvement of the efficiency of the application of the improved algorithm of adaptive selection by the subscriber terminal of the cell of the 5G mobile communication network for the terahertz range of wavelengths, which is proposed, in comparison with the known ones, consists in the fact that by applying the blockchain infrastructure, a reduction in the complexity of the network is ensured, a significant reduction in the operating costs of the operator and, accordingly, increasing the reliability and efficiency of the control of the algorithm of adaptive selection by the subscriber terminal of the cell of the proposed 5G mobile communication network, when blocking the direct line of sight.

Key words: *methods of adaptive selection by the subscriber terminal of a cell of the 5G mobile communication network, the fifth generation communication network, blockchain infrastructure.*

Сайко В.Г.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Радзівілов Г.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Фомін М.М.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Солодовник В.І.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г.Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО БПЛА ЗА УМОВ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Наведено алгоритм визначення місцезнаходження несанкціонованого БПЛА за умов багатопроменевого поширення радіохвиль та модель його реалізації. Ключовою відмінністю інноваційного рішення від традиційних сучасних рішень, є те, що для забезпечення реалізації алгоритму визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль розгортається мережа приймальних пунктів (ПП) на базі цифрових приймально-передавальних радіорелейних систем (ЦРС) терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу базових станцій (БС) мобільного зв'язку та виконує функції сканування і мобільних гетерогенних ілюзів. На основі сформованого кластеру груп БС з ЦРС створюється безпроводова мережа, що швидко розгортається, для екстрених служб, яка дозволяє скоротити час, необхідний для виявлення несанкціонованого БПЛА, і зменшити кількість персоналу, що залучаються для операції з виявлення місцезнаходження. Крім того, у інноваційному рішенні визначають періодично на приймальних пристроях усіх ПП число і часові затримки компонент багатопроменевого сигналу, що дозволяє ефективно забезпечити прийом слабких променів в багатопроменевому сигналі шляхом адаптації до умов поширення, що змінюються, в каналі зв'язку, за рахунок періодичного відділення області багатопроменевої, періодичного пошуку і використання на кожному періоді оновлених променів. Завдяки використанню більш широкої смуги пропускання у терагерцовому діапазоні, роботі з декількома діапазонами забезпечується високоточна роздільна здатність для поділу багатопроменевого поширення та використання інформації про багатопроменеве поширення для кращої локалізації та визначення місцезнаходження несанкціонованого БПЛА.

Ключові слова: несанкціонований БПЛА, радіорелейні системи терагерцового діапазону, мобільні мережі, інтеграція сканування та зв'язку.

Постановка проблеми. Сьогодні основна мета проектування бездротової мережі – оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності і надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким

чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необ-

хідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні радіолокаційні і комунікаційні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання. Але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в майбутніх бездротових системах очікується значне зрушення у бік більш високих частот, таких як терагерцовий діапазон, з ширшим доступним спектром. Це дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, щоб зменшити, як потужність, деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності ці системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр. Це відкриє користувачам доступ до інших функцій таких систем, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань та підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (integrated sensing and communication, ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюючими функціями [1, 2].

Але на сьогодні механізми реалізації даного підходу [2] знаходяться в стадії розробок і дослідження. Усе це загалом і визначило мету та завдання даної роботи.

Сьогодні основна мета проектування бездротової мережі – оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності і надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необхідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні радіолокаційні і комунікаційні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання. Але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в майбутніх бездротових системах очікується значне зрушення у бік більш високих частот, таких як терагерцовий діапазон, з ширшим доступним спектром. Це

дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, щоб зменшити, як потужність, деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності ці системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр.

Це відкриє користувачам доступ до інших функцій таких систем, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань та підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (integrated sensing and communication, ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюючими функціями [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час розгорнуто широкі дослідження щодо використання комерційних передавачів FM і DAB – радіо, цифрового телебачення (форматів DVB-T, DVB-T2) та сигналів базових станцій стільникового зв'язку для виявлення повітряних об'єктів (ПО) [3–6]. При цьому такими фірмами, як Thales (Франція), Lockheed Martin (США), ERA (Чеська Республіка), Leonardo (Італія) та ін., проводяться інтенсивні дослідження з розробки та проектування радіолокаційних комплексів, що одночасно використовують кілька сторонніх передавачів різних діапазонів. На думку розробників, створення маловисотного радіолокаційного поля, що доповнює штатні засоби радіолокаційного спостереження, суттєво підвищить достовірність та надійність радіолокаційного спостереження ПО. У [6] наведені результати досліджень та експериментальні дані щодо застосування радіосистем стандарту бездротової передачі даних LTE для виявлення об'єктів, що рухаються.

Відомий спосіб зменшення помилок багатопроменевої при оцінюванні розташування джерела випромінювання далекомірним способом, який полягає в тому, що місцезнаходження джерела випромінювання (ДВ) знаходять алгоритмом зважених залишків оцінок координат, отриманих на основі далекомірних вимірювань від різних комбінацій приймальних станцій. [7].

До недоліків відомого способу зменшення помилок багатопроменевої при оцінюванні розташування джерела випромінювання далекомірним відноситься те, що для оцінювання місцезнаходження ДВ необхідно тривалий час, викликаний необхідністю накопичення і зважування проміжних оцінок протягом деякого інтервалу часу, що

не дозволяє використовувати зазначений спосіб для визначення координат ДВ, що рухаються.

Відомий також спосіб визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль, який полягає в тому, що приймають віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту (НПО) на кожному з множини приймальних пунктів з відомими координатами, вимірюють час приходу сигналу, формують набір проміжних оцінок координат НПО різницево-далекомірним способом для кожної можливої комбінації з трьох ПП, формують, на основі набору проміжних оцінок координат НПО, підсумкову оцінку координат НПО, а визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту здійснюють на підставі підсумкової оцінки координат НПО [8].

Недоліками способу визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль, який обрано за найближчий аналог для подальшого дослідження, є те, що під час проведення процедури пошуку сигналів променів не враховується вплив компонент багатопроменевого сигналу друг на друга. Внаслідок цього збільшується ймовірність помилкового виявлення сигналів променів. Крім того, не здійснюється оптимізація числа променів при використанні терагерцового діапазону хвиль, що призводить до підвищених вимог до апаратурної реалізації без збільшення точності визначення місцезнаходження. Також для отримання попередньо заданого порога автори використовують попередньо отриману емпіричну залежність дисперсії оцінки координат від відношення сигнал/шум. Ознакою її реалізації вимагає значної кількості попередніх вимірів і відповідно тимчасового терміну.

Постановка завдання. В основу даного дослідження покладено задачу шляхом введення додаткових технологічних операцій у [8] забезпечити підвищення ефективності мережі ПП, яка інтегрується в діючу мережу БС мобільного зв'язку, шляхом використання спільних часових, спектральних ресурсів і апаратних компонентів, підвищення точності вимірювань дальності щодо однопозиційних радіолокаційних систем, можливості прийому променів низького рівня у віддзеркаленому багатопроменевому сигналі.

Виклад основного матеріалу

Алгоритм інноваційного рішення визначення місцезнаходження несанціонованного БПЛА за умов багатопроменевого поширення радіохвиль

З урахуванням зазначених особливостей для реалізації алгоритму виконують таку послідовність дій:

- попередньо розгортають мережу приймальних пунктів на базі приймально-передавальних цифрових радіорелейних систем терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу базових станцій мобільного зв'язку з пунктом обробки вимірювань;

- синхронізують роботу усієї множини ПП зон обслуговування БС мобільного зв'язку за допомогою механізму синхронізації;

- проводять постійне сканування зон обслуговування базових станцій мобільного зв'язку системами сканування, що побудовані на основі радіорелейних систем терагерцового діапазону, за допомогою механізму сканування;

- приймають віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту на кожному з множини приймальних пунктів з відомими координатами;

- після приймання віддзеркаленого сигналу від низько літаючого повітряного об'єкту першим ПП з множини ПП від повітряного об'єкту, передають по каналам сигналізації інформацію про факт фіксації невідомого повітряного об'єкту у зоні функціонування першого ПП;

- формують тимчасовий кластер збору даних вимірювань з семи груп ПП для передачі даних сканування до пункту обробки вимірювань даного кластеру;

- випромінюють передавальним пристроєм радіорелейної системи першого ПП сигнал зондування на низько літаючий повітряний об'єкт для збору і обробки даних зондування;

- приймають ретрансляційний віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту одночасно першим і іншими шістьма групами ПП кластеру, що приводить до генерації запитних сигналів з цих ПП кластеру;

- запускають механізм сканування процесу випромінювання і прийому сигналів другої, третьої, четвертої, п'ятої, шостої та сьомої груп ПП, що дозволяє отримати додатково шість вимірювань похилої дальності і дванадцяти вимірювань суми відстаней;

- визначають періодично на приймальних пристроях усіх семи груп ПП число і часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу;

- вимірюють час приходу сигналу;

- складають з семи груп ПП кластеру усі можливі пари ПП для формування набору проміжних оцінок координат ПО;

– вимірюють для кожної пари ПП різницю часу приходу багатопроменевого сигналу від повітряного об'єкту до ПП цієї пари;

– обчислюють по вимірюваній різниці часу приходу сигналу від повітряного об'єкту у кожній парі різницю дальності від повітряного об'єкту до приймальних пунктів цієї пари;

– формують набір проміжних оцінок координат НПО різницево-далекомірним способом для кожної можливої комбінації груп з трьох ПП, при цьому формування набору проміжних оцінок координат НПО проводиться з урахуванням даних кластеру з усіх семи груп ПП;

– формують, на основі набору проміжних оцінок координат НПО, підсумкову оцінку координат НПО;

– оцінюють підсумкову оцінку координат НПО пунктом обробки вимірювань місцезнаходження невідомого повітряного об'єкту, коли сигнали від усіх семи груп ПП кластеру прийняти, які передаються на пункт обробки вимірювань по каналах діючої мережі БС мобільного зв'язку, з подальшим їх накопиченням та комплексуванням. А визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту здійснюють на підставі підсумкової оцінки координат НПО.

Модель реалізації алгоритму інноваційного рішення

Ефективність операцій з виявлення місцезнаходження несанкціонованого НПО у запропонованому методі підвищується за рахунок використання технологій автоматичного виявлення невідомого НПО із використанням інтегрованої існуючої мережі мобільного зв'язку (ПМС) для екстрених служб. ПМС включають одну або кілька БС мобільного зв'язку з ЦРС (БС з ЦРС), які виконують функції сканування і мобільних гетерогенних шлюзів. На основі групи БС з ЦРС створюється безпроводова мережа, що швидко розгортається, для екстрених служб, яка дозволяє скоротити час, необхідний для виявлення несанкціонованого НПО, і зменшити кількість персоналу, що залучаються для операції з виявлення місцезнаходження.

У такій мережі всі БС з ЦРС взаємодіють як один з одним, так і зі екстрених службами одночасно. БС з ЦРС не тільки миттєво доставляє агреговані дані на засоби екстрених служб по каналам мобільної мережі, але також має можливість обмінюватись даними один з одним. Більш того, пориста топологія мережі дозволяє багаторазово гарантувати надійність і збіжність мережі, тому що під час виявлення несанкціонованого НПО деякі ЦРС можуть бути відключені по різним при-

чинам, а дані все одно можуть бути передані до базової станції мережі мобільного зв'язку через інші БС шляхом ретрансляції. Крім того, завдяки групам БС з ЦРС можуть бути вирішені такі проблеми, як мала зона радіопокриття, збої в роботі мережі через відмову вузлів ретрансляторів та обмежене керування, що виникають при використанні одиночних радіолокаційних станцій.

У операціях з виявлення місцезнаходження несанкціонованого НПО групи БС з ЦРС можуть використовувати різні технології. Серед бездротових технологій, що використовуються для визначення місцезнаходження несанкціонованого НПО, можна виділити мережі 2/3/4/5G [9, 10]. Технології виявлення можуть застосовуватися разом із системою комп'ютерного зору, що підвищить ефективність запропонованого способу за наявності прямої видимості між НПО та БС з ЦРС, а також за відсутності опадів природного та штучного походження.

На рис.1 наведено схему організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління мережею ЦРС терагерцового діапазону через вузлову приймально-передавальну ЦРС та приймально-передавальні модулі на 0,13 ТГц.

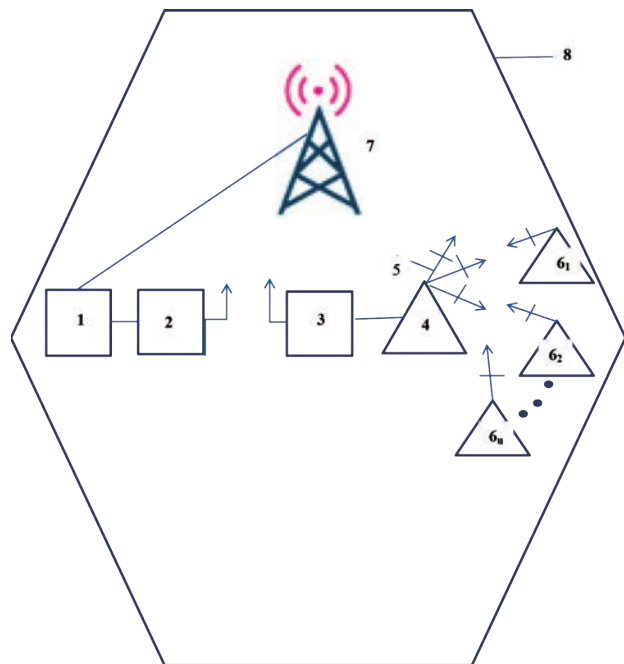


Рис. 1. Схема організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління мережею ЦРС терагерцового діапазону через вузлову приймально-передавальну ЦРС та приймально-передавальні модулі

Даний процес пояснюється таким чином з використанням рис. 1 на якій позначено:

1 – пункт управління мережею цифровою РС терагерцового діапазону;

- 2, 3 – приймально-передавальні модулі терагерцового діапазону частот;
- 4 – вузлова цифрова радіорелейна станція;
- 5 – фазована антенна решітка з електрично керованими діаграмами спрямованості;
- 6_{1...u} – цифрові радіорелейні станції;
- 7 – базова станція;
- 8 – зона обслуговування базової станції.

Вузлова ЦРС 4 «точка-багатоточка» являється пакетною та має на кожному з N – напрямків пропускну здатність 2,4 Гбіт/с. Пакетна технологія дозволяє «попередньо» передавати потоки зі швидкістю 2,4 Гбіт/с на приймально-передавальний модуль терагерцового діапазону частот 2, 3, який весь трафік N*2.4 Гбіт/с передає на пункт управління мережею 1 ЦРС 6_{1...u} терагерцового діапазону, тому передача мультимедійної, графічної та іншої інформації здійснюється в терагерцовому діапазоні. Висока скритність передачі інформації забезпечується особливостями терагерцового діапазону хвиль.

Для проведення процесу сканування зон обслуговування 8 БС мобільного зв'язку 7 вузлова ЦРС «точка-багатоточка» 4 має у своєму складі фазовані антенні решітки з електрично управляємими діаграмами спрямованості 5 та приймально-передавальні модулі терагерцового діапазону частот 2, 3 [9, 11].

Рис. 2 пояснює геометричний підхід до визначення координат.

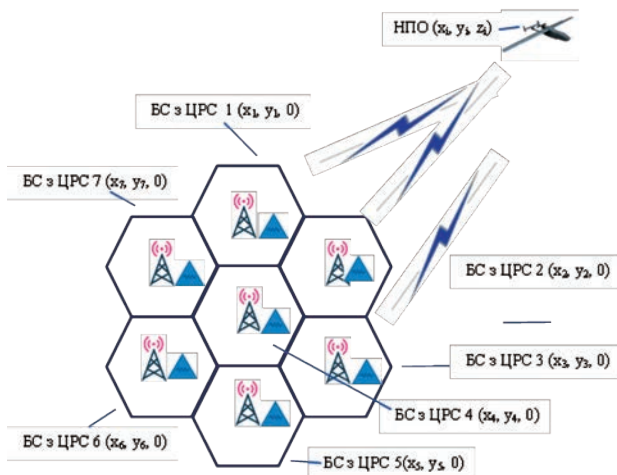


Рис. 2. Геометричний підхід до визначення координат НПО на основі груп з трьох ПП кластеру

Припускаючи, що несанкціонований НПО знаходиться в повітрі, необхідно знайти координату розташування несанкціонованого НПО (x_i, y_i, z_i) та i-ю позицію на землі БС з ЦРС (x_i, y_i, 0) при отриманні віддзеркаленого сигналу від НПО. Якщо

БС з ЦРС отримують m сигналів від несанкціонованого НПО, координати точки визначення місцезнаходження повинні задовольняти рівнянням (1):

$$\begin{cases} (x_1 - x_0) + (y_1 - y_0) + (z_0)^2 = (d_1)^2 \\ (x_i - x_0) + (y_i - y_0) + (z_0)^2 = (d_i)^2 \\ (x_m - x_0) + (y_m - y_0) + (z_0)^2 = (d_m)^2 \end{cases} \quad (1)$$

де d_i – відстань від БС з ЦРС до несанкціонованого НПО.

З практичної точки зору тимчасовий кластер БС з ЦРС у запропонованому способі складається з семи груп БС з ЦРС.

У бездротовій мережі з урахуванням моделей поширення радіохвиль оцінюють втрати потужності сигналу під час поширення через середовище. Так, потужність сигналу, що приймається менше потужності переданого. Для прогнозування різниці між сигналами, що передаються і приймаються [12, 13], потужність кожного прийнятого радіосигналу вимірюють за допомогою показника рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI). Відстань на базі показників RSSI, як правило, розраховується на основі моделі логарифмічної втрати потужності сигналу при поширенні в середовищі:

$$RSSI = A - 10 * n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (2)$$

де d – відстань від пристрою до передавача (м); A – потужність сигналу пристрою, виміряна на одиничній відстані d₀ від пристрою (дБм); n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при поширенні в середовищі, показник пов'язаний із конкретною технологією бездротового зв'язку; X_σ – Гауссовий розподіл випадкової змінної з нульовим середнім значенням та дисперсією σ².

Оскільки втрата потужності сигналу при поширенні в середовищі залежить від навколишнього середовища, для підвищення точності позиціонування в запропонованому рішенні необхідно оцінити параметри A, n перед розгортанням операції визначення місцезнаходження. Отже, у кожній конкретній операції визначення місцезнаходження, група БС з ЦРС 6_{1...u} (див. рис. 1) здійснює попереднє калібрування на основі даних сканування ЦРС 6_{1...u}, тобто показник RSSI розраховується, враховуючи відстань між НПО і початковою точкою, вимірювання проводиться кілька разів. Потім для знаходження оптимальних параметрів (A, n) використовується нелінійний метод найменших квадратів. При вимірах m ці параметри визначаються як:

$$(A, n) = \operatorname{argmin} \left(\sum_{i=1}^m 10^{\frac{A-RSSI}{10n}} - d_i \right)^2 \quad (3)$$

Після визначення відстані до НПО необхідно обчислити координати НПО.

Для цього припустимо, що позиція несанкціонованого НПО $p(x_i, y_i, z_i)$, а на землі БС з ЦРС отримують віддзеркалений від НПО сигнал позиції $p_i(x_i, y_i, 0)$. Відстань між цими двома точками розраховується з урахуванням похибки вимірювання, що встановлюється під час сканування. З кожним отриманим сигналом з несанкціонованого НПО, відстань від нього до БС з ЦРС:

$$d(p_i, p_0) = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_0)^2} + \varepsilon, \quad (4)$$

Таким чином, кількість сигналів, що приймаються, і похибка вимірювання ε впливають на точність процесу позиціонування. Позиція $p_k(x_k, y_k)$ визначається шляхом мінімізації виразу (5):

$$\arg \min \sum_{i=1}^m \left(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_0)^2} - d(p_i, p_k) \right) \quad (5)$$

де m – кількість сигналів, що приймаються від несанкціонованого НПО.

В результаті мінімізації стає можливим обчислити координати НПО та похибки.

Моделювання дозволяє визначити помилки місцезнаходження при зміні кількості виявлених сигналів. На рис. 3 показано залежність помилки місцезнаходження від кількості сигналів, що приймаються. Згідно з рис. 3 координати визначаються з меншою помилкою, коли виявляється більша кількість сигналів.

Висновки

1. Технічний результат в запропонованому методі визначення місцезнаходження низьколітаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль полягає в підвищенні точності вимірювань дальності щодо однопозиційних радіолокаційних систем, а також забезпеченні можливості прийому променів низь-

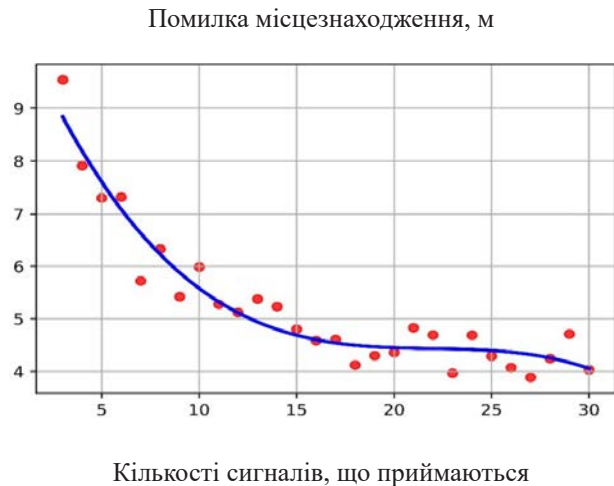


Рис. 3. Залежність помилки місцезнаходження від кількості сигналів, що приймаються

кого рівня у віддзеркаленому багатопроменевому сигналі.

2. Зазначений результат досягається тим, що у запропонованому рішенні застосовуються цифрові радіорелейні системи в терагерцовому діапазоні, які використовуються в якості високороздільних радарів, що виявляють несанкціонованих БПЛА, що швидко рухаються.

3. Інноваційне рішення дозволяє ефективно забезпечити прийом інформації слабких променів в багатопроменевому сигналі шляхом адаптації до умов поширення, що змінюються, в каналі зв'язку, за рахунок періодичного відділення області багатопроменевої, періодичного пошуку і використання на кожному періоді оновлених променів.

4. Інноваційне рішення може бути використано як міська система протиповітряної оборони, що забезпечує раннє попередження загрози, що надходять, шляхом модифікації БС мобільного зв'язку.

Список літератури:

1. M. Chafii, L. Bariah, S. Muhaidat, and M. Debbah. Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. vol. 25. no. 2, pp. 868–904.
2. A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T. X. Han, C. Liu, R. Du, D. K. P. Tan, J. Lu, Y. Shen, F. Colone, and K. Chetty. A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. vol. 24. no. 2. pp. 994–1034.
3. Bendjama L., Laroussi T. GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity. *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET)*. 2018. pp. 54–59.
4. Capria A. DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment. *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2010. pp. 3917–3920.
5. Howland P.E., Maksimiuk D., Reitsma G. FM radio based bistatic radar. *IEE Proceed – ings – Radar, Sonar and Navigation*. 2005. pp. 107–115.
6. Salah A. Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bi-static radar applications. *Electronics Letters*. 2014. pp. 545–547.

7. Chen, P.C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation. *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conference*. 1999. vol 1. pp. 316-320.
8. Європейський патент EP 3173809, ПМК кл. G01S 5/06, G0 5/02, опубліковано 31.05.2017.
9. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
10. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура. Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 682 с.
11. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing RU", 2019. 68 с.
12. Chung, W. Y. Enhanced RSSI-based real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments. In *2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, IEEE. 2007. pp. 1213–1218.
13. Zhu, X. RSSI-based algorithm for indoor localization. *Communications and Network*. 2013. vol. 5(02). pp. 37–42.

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Fomin M.M., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. ALGORITHM FOR DETERMINING THE LOCATION OF AN UNAUTHORIZED UAV UNDER THE CONDITIONS OF MULTIBEAM PROPAGATION OF RADIO WAVES

An algorithm for determining the location of an unauthorized UAV under the conditions of multi-beam propagation of radio waves and a model for its implementation are presented. The key difference between the innovative solution and the traditional modern solutions is that in order to ensure the implementation of the algorithm for determining the location of a low-flying aerial object under the conditions of multi-beam propagation of radio waves, a network of receiving points (PP) is deployed on the basis of digital receiving and transmitting radio relay systems (TRS) of the terahertz range, which is integrated into the existing network of base stations (BS) of mobile communication and performs the functions of scanning and mobile heterogeneous gateways. Based on the formed cluster of BS groups with the CRS, a rapidly deployable wireless network for emergency services is created, which allows to reduce the time required to detect an unauthorized UAV and reduce the number of personnel involved in the location detection operation. In addition, in the innovative solution, the number and time delays of the components of the multibeam signal are determined periodically on the receiving devices of all PPs, which makes it possible to effectively ensure the reception of weak beams in the multibeam signal by adapting to the changing propagation conditions in the communication channel, due to periodic separation multi-beam areas, periodic search and use of updated beams at each period. By using a wider bandwidth in the terahertz range, multi-band operation provides high-precision resolution for multipath separation and the use of multipath information to better localize and locate an unauthorized UAV.

Key words: *unsanctioned UAV, terahertz radio relay systems, mobile networks, scanning and communication integration.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

UDC 655.262.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/12>

Andriushchenko T.Yu.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Berezhna O.B.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

CURRENT TRENDS IN THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PUBLISHING INDUSTRY OF UKRAINE

The scientific article explores the contemporary role of publishing and technical editing in the informational space. The authors analyze the impact of technological innovations on the publishing process, emphasizing the importance of technical editing in ensuring content quality. The article highlights key aspects of utilizing modern technologies in the publishing industry and their influence on the information sphere. The research underscores the need to adapt the publishing process to modern requirements and examines the prospects for further development in the digital era. A crucial aspect of the article is the analysis of the influence of information technologies on changing reading habits and content perception. The study also considers the role of technical editing in ensuring accessibility and clarity of information. The authors illuminate the publishers' role in shaping the modern information space, discussing their responsibility for maintaining high quality standards and ensuring access to diverse and valuable content. The article aims to contribute to understanding the importance of the interaction between publishing and technical editing in the context of the contemporary information environment. An essential element is the examination of the impact of technologies on changing reading habits and information understanding. The article reveals how technical editing influences the creation of accessible and understandable content for diverse audiences. The concluding part of the analysis discusses the prospects for the development of the publishing industry, relying on identified trends and recommendations for optimal use of technical editing in the digital age. Overall, the article offers profound insights into the relationship between publishing and technical editing, emphasizing their crucial role in shaping the contemporary information landscape. The compilation of the main conclusions of this research allows for insights into publishing and technical editing. These conclusions and recommendations serve as the basis for further improvement and utilization of technical editing in the publishing industry.

Key words: publishing business, technical editing, information technologies, information space, IT in publishing.

Formulation of the problem. Due to the rapid development of information technologies and changes in readers' habits, the role of publishing and technical editing in the modern information space is gaining importance. Against this background, the problem arises of determining the impact of these areas on the formation, dissemination and perception of information.

In particular, it is important to determine how technical editing and publishing interact in the digital environment, where information is becoming more accessible, but also more vulnerable to the impact of technology. Another challenge is balancing the quality of output with the speed of publication, and

identifying effective strategies for engaging with audiences through new media.

This problem is relevant in the context of constant changes in the modern information environment and requires detailed analysis and scientific substantiation to highlight the essential aspects of the interaction between publishing, technical editing and the information environment. The relevance of the topic is determined by a number of key factors that affect the modern information society. Here are some arguments that emphasize the relevance of this topic:

– exponential growth in the volume of information, in which publishing and technical editing play a

key role in ensuring the quality and accessibility of information for users;

- technological transformation of the publishing industry, in which the introduction of the latest technologies changes the paradigm of content creation and distribution. Understanding these changes is important for the effective functioning of the publishing industry;

- competitive conditions require publishing houses and technical editors not only to be of high quality, but also to be efficient in the use of resources. Technical editing is becoming a crucial element in achieving these goals;

- in the context of information noise and infodemic, the ability to effectively edit and filter information becomes important for the perception and understanding of content;

- the growing popularity of online content requires new publishing and technical editing strategies to ensure efficiency and development in this dynamic environment of expanding internet space;

- the increasing importance of visual communication requires improving the technical aspects of editing to effectively communicate information through various channels;

- publishing houses and technical editors need to adapt to changes in consumer preferences and evolving expectations regarding the quality and form of information presentation.

These factors demonstrate the importance of studying and understanding the role of publishing and technical editing in the country's modern information space.

Task statement is to identify the importance of the impact of publishing and technical editing on the modern information space. The study aims to reveal key aspects of these areas, determine their contribution to the dissemination and formation of information, and identify technological improvements that contribute to the more efficient functioning of publishing houses and editorial offices in the digital age. The main tasks include analyzing current trends, studying the latest technologies, and considering the impact of these processes on changes in the information space.

Analysis of recent research and publications. Both domestic and foreign scholars are engaged in the study of publishing in Ukraine. Such scholars as O. Afonin [1], I. Baturevych [2], O. Khmelovska [2], O. Koval [5], I. Kopystynska, T. Krainikova, Z. Partyka, V. Rizun, V. Teremko [7], L. Cherednyk [8] and many others have studied the basics of the publishing and information sphere. Such scholars as N. Zelinska, M. Zhenchenko, M. Savky, M. Sheiko,

N. Chernysh, and A. Tokarchuk have studied the trends in the development of the publishing market of Ukraine.

Outline of the main material of the study.

Current trends in the development of Ukrainian publishing include, first of all, a conscious effort by publishers to publish high-quality literature, which leads to a decrease in the production of low-quality books, such as books on newsprint. Currently, more and more attention is being paid to creating high-quality translations into Ukrainian. According to foreign literary agencies, the activity of Ukrainian publishers in acquiring rights to publish foreign works is constantly growing.

The total circulation of Ukrainian books, according to the Book Chamber of Ukraine, amounted to 28,638.1 thousand copies at the beginning of 2022, with more than 1,000 translations in the period 1998–2021, including more than 135 in 2021, including 63 under the Translate Ukraine translation support program. The books were published in 24 countries covering four continents and translated into 21 languages, with a total circulation of over 66,500 copies [6].

This data shows that:

- market resilience even in wartime circumstances, with severe challenges associated with martial law, book publishing remains a stable and active segment of cultural life;

- book publishing in Ukraine shows impressive internal mobilization and support from domestic publishers, who, despite the difficulties, continue to work actively on new projects;

- publishing houses and booksellers are adapting to the difficult conditions and expanding their infrastructure, using modern technologies and online solutions to provide access to literary works;

- book publishing contributes to overcoming language and cultural barriers in the context of military operations by actively promoting Ukrainian literature internationally.

It's safe to say that there is a profound understanding of the importance of copyright. Another undeniable trend is that since 2015, there has been a definitive shift in reader preferences. An important achievement of Ukrainian publishing was the shift in readers' interests towards Ukrainian-language books. In response to this trend, many publishing houses began to pay increased attention to the quality of translation and printing, and to work more intensively with Ukrainian authors. As a result, the number of new releases has increased, and translation projects have started to appear faster. Some of the world's bestsellers are now available to Ukrainian readers in Ukrainian translation [3].

High-quality design, high-quality illustrations, and advanced printing technologies in Ukraine provide a significant basis for international cooperation, and the prerequisites for normal competition of the Ukrainian publishing product began to take shape, but were interrupted by Russia's full-scale invasion of Ukraine.

The importance of publishing and technical editing in today's information society lies in their key role in the formation, organization, and dissemination of information that determines the quality and accessibility of knowledge for a wide audience. Let us consider the functions of publishing and technical editing in modern Ukraine:

1) In a world saturated with a huge amount of information, publishing and technical editing perform an important function of filtering and verifying and curating content. This helps ensure that consumers receive high-quality and reliable information;

2) technical editing acts as a tool for normalizing and standardizing text and multimedia content. This helps to unify information products and ensure clarity for different audiences;

3) publishing determines the availability and distribution of access to knowledge. It plays a key role in the creation and distribution of books, magazines, electronic resources, etc., which allows society to acquire new knowledge and develop;

4) modern publishing houses contribute to the formation of information literacy, teach how to work effectively with information, adapt to new media formats and understand the importance of critical thinking;

5) publishing and editing, among other things, shape public opinion. Media and publications direct public attention to key issues and influence the formation of public opinion;

6) cultural values, history and identity are transmitted through books and media resources;

7) Ukrainian publishing houses promote the creation of interactive and user-friendly content that ensures effective perception of information in the online environment.

Technology plays an important role in improving the publishing process by speeding it up, making it more accessible and universal. Below are the key aspects of the role of technology in the publishing process:

1) technology allows automating a number of tasks in publishing production, including layout, printing, and packaging, which leads to increased efficiency and reduced costs;

2) the use of modern design technologies in the design and layout process allows creating high-quality and aesthetic content;

3) the use of artificial intelligence elements and analytical tools allows to better predict trends in reader preferences, predict the popularity of certain content and optimize the publishing strategy;

4) the introduction of interactive and multimedia elements, such as video, audio, and animations, makes the content more attractive and promotes more active perception of information;

5) online platforms and electronic sales systems allow for the distribution and sale of publications without significant costs for physical printing and delivery;

6) modern technologies of collective work with files create conditions for global networking of authors, editors, designers and other participants in the publishing process.

Modern information technologies not only enrich the content of publications for readers, but also simplify technical editing by offering editors new tools and methods. Comparison of the effectiveness of traditional and modern methods of technical editing includes a number of key aspects, which are presented in Table 1.

In general, modern technology-based methods of technical editing provide more opportunities for increasing efficiency, accuracy, and effective collaboration than traditional methods.

The review of best practices in the use of technical editing in publishing includes a number

Table 1

Comparison of traditional and modern methods of technical editing

Aspects	Traditional methods	Modern methods
Speed and efficiency	Manual editing, time-consuming and labor-intensive	Using editors and automation programs, faster and more efficiently
Accuracy and consistency	Prone to errors and style variations	High accuracy, consistency with automated tools
Scalability	Inefficient for large volumes	Easy scalability for large volumes
Interaction with the author	Limited by physical constraints	Virtual interaction through electronic means, effective collaboration
Use of artificial intelligence technologies	Not used	Use of AI technologies to automatically detect and correct errors
Cost	High costs for manual labor	Lower costs due to automation and reduced time

of innovative approaches and strategies that help optimize the editing process and improve the quality of publications. Some of the key practices in this context are:

1) automation of editing through the use of various editors and programs that use artificial intelligence technologies to automatically detect and correct grammatical, stylistic and other errors;

2) use of version control systems to effectively manage changes in text documents, which simplifies the process of teamwork and ensures the stability of publication versions;

3) integration of translation terminals to automatically check and improve translations in multilingual publications;

4) active cooperation between technical editors and designers to synergize with design and create harmonious and effective layouts;

5) use of digital editorial platforms to facilitate collaborative work on texts, increase productivity and reduce time for correction;

6) use of electronic tools to detect and eliminate spelling and grammatical errors, which greatly facilitates the process of technical editing;

7) conducting readability tests to determine the effectiveness of technical editing and identify questionable or “weak” areas in texts.

Modern information technologies can improve productivity, reduce costs, and improve content quality, making the publishing and technical editing process more efficient and innovative.

In a dynamic information medium, the role and importance of publishing and technical editing is undergoing significant changes due to technological, cultural and social transformations. Publishing is moving to a digital environment, which requires new strategies to engage audiences and monetize content. Let's look at examples of such strategies:

– using data analytics to understand users' interests and behavior and subsequently create personalized content that meets their needs and preferences;

– active presence of the publishing house in social networks to attract the audience through advertising, content marketing, interaction with subscribers and participation in viral trends;

– creation of streaming programs, webinars and other multimedia content that can be embedded in interactive publications to attract the attention of the audience and increase its engagement;

– development of audio content, such as podcasts, audio books, author commentaries or musical adaptations, which can be used by consumers in a multitasking mode;

– involving the audience in the content creation process through contests, voting on topics, or participating in the content formation through comments and discussions;

– transition to a subscription model, where users have access to premium content for a certain monthly or annual fee (special editions of books with additional materials, such as author's comments, illustrations, additional chapters or extended endings, editions with exclusive covers or signed by the author).

Publishing plays a significant role in the process of gradual modification, distribution and perception of information, which leads to an increase in its dynamics, diversity and accessibility to users.

Conclusions. In general, publishing and technical editing is a necessary link in the information society, affecting the formation, dissemination and perception of information, as well as the development of society as a whole. Given these aspects, technology not only improves the traditional publishing process but also provides new opportunities for development and adaptation.

Artificial intelligence has introduced a new dimension to editing practices, providing AI-powered software that can analyze and enhance writing quality. The ability of AI to understand context and tailor suggestions showcases its potential in aiding editors. However, the necessity of human judgment in assessing the appropriateness and overall impact of AI-generated improvements remains crucial [9].

The summary of the main results of this study allows us to draw the following conclusions and provide recommendations:

the use of automation technologies helps to remove much of the editorial routine, focusing efforts on the more creative and strategic aspect of editing; technical editing, using various tools, helps to identify and correct grammatical and stylistic errors, improving the overall quality of texts; the use of version control systems and editorial platforms promotes effective cooperation between editors and other participants in the publishing process; the use of translation terminals improves the quality of translations and contributes to the globalization of publishing products; close interaction between technical editors and designers ensures the creation of harmonious and effective layouts.

Bibliography:

1. Афонін О. Виступ на засіданні Міжвідомчої комісії з питань сприяння розвитку вітчизняного книговидання та книгорозповсюдження. *Вісник Книжкової палати України*. 2015. № 3. С. 3–4.

2. Батуревич І., Хмельовська О. 30 років незалежного книговидання в Україні URL: <https://chytomo.com/30-rokiv-knyhovydannia/> (дата звернення 19.11.2021).
3. Видавнича діяльність в умовах розвитку новітніх технологій: вивчення запитів фахівців : монографія / за заг. ред. Г. В. Горбенко; упоряд., наук. ред. Н. М. Вернигора; Інститут журналістики Київського університету імені Бориса Грінченка. Київ, 2019. 272 с.
4. Женченко М. І. Цифрові трансформації видавничої галузі : монографія. Київ. Жнець, 2018. 435 с.
5. Коваль О. Через бюрократичні перепони Український інститут книги не може використовувати кошти на діяльність, яка важлива зараз. *Дзеркало тижня*. Вип. № 34, 15–21 вересня 2018 р. URL: https://dt.ua/interview/oleksandra-koval-cherez-byurokratichni-pereponiukrayinskiy-institut-knigi-ne-mozhe-vikoristo-vuvati-koshti-na-diyalnist-yakavazhliva-zaraz-288431_.html. (дата звернення: 17.12.2023).
6. Річний звіт 2021. *Український інститут книги*. URL: <https://ubi.org.ua/storage/reports/fkFkibJHglHRN2i2EZdHKlv8BAdp4JzxCsHvFuAt.pdf> (дата звернення: 17.12.2023).
7. Теремко В. Видавництво – XXI. Виклики і стратегії : монографія. Київ. Академвидав, 2012. 328 с.
8. Чередник Л.А. Використання комп'ютерних технологій у видавничій справі. *Тези 68-ої наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Том 3. Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р. Полтава: ПолтНТУ, 2016. 335 с.
9. The Future of Editing: US Industry Predictions URL: <https://americanprofessionguide.com/future-of-editing/> (дата звернення: 21.12.2023).

Андрюшенко Т.Ю., Бережна О.Б. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИДАВНИЧІЙ СПРАВІ УКРАЇНИ

Розглянуто сучасну роль видавничої справи та технічного редагування в інформаційному просторі. Автори аналізують вплив технологічних інновацій на видавничий процес, розкриваючи важливість технічного редагування у забезпеченні якості контенту. Стаття висвітлює ключові аспекти використання сучасних технологій у видавничій галузі та їхній вплив на інформаційну сферу. Дослідження вказує на необхідність адаптації видавничого процесу до сучасних вимог, а також розглядає перспективи подальшого розвитку видавничої справи в цифрову епоху. Важливий аспект статті становить аналіз впливу інформаційних технологій на зміну читацьких звичок та способів сприйняття контенту. Дослідження також враховує роль технічного редагування у забезпеченні доступності та зрозумілості інформації. Автори також висвітлюють роль видавців у формуванні сучасного інформаційного простору, обговорюючи їхню відповідальність за збереження високих стандартів якості та забезпечення доступу до різноманітного та цінного контенту. Стаття ставить за мету сприяти розумінню важливості взаємодії між видавничою справою та технічним редагуванням у контексті сучасного інформаційного оточення. Важливим елементом є розгляд впливу технологій на зміну читацьких звичок та розуміння інформації. Стаття розкриває, як технічне редагування впливає на створення доступного та зрозумілого контенту для різних аудиторій. Заключна частина аналізу розглядає перспективи розвитку видавничої справи, спираючись на зазначені тенденції та рекомендації для оптимального використання технічного редагування в цифровій епохі. Загалом, стаття пропонує глибокий інсайт у взаємозв'язок між видавничою справою та технічним редагуванням, а також вказує на їхню важливу роль у формуванні інформаційного простору сьогодення. Сукупність основних висновків даного дослідження дозволяє зробити висновки щодо видавничої справи та технічного редагування.

Ключові слова: *видавнича справа, технічне редагування, інформаційні технології, інформаційний простір, ІТ у видавничій справі.*

Andriushchenko T.Yu.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

COMBINING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TECHNOLOGIES METHODOLOGY FOR EFFICIENT GRAPHIC INFORMATION PROCESSING

Contemporary innovative approaches to graphic information processing represent a significant research direction, considering the rapid development of technologies and the expanding applications of graphic data in various fields. This article explores the technological challenges associated with the need for efficient processing of large volumes of graphic information and the further development of computational methods in the publishing and printing industry in Ukraine.

The paper emphasizes the importance of improving algorithms for graphic data processing. Methods for enhancing graphic information are discussed, aiming at optimizing computational processes and ensuring processing accuracy. Attention is devoted to technical challenges related to the real-time processing of large volumes of graphic data, considering the needs of modern applications such as virtual reality and augmented reality.

In particular, the article examines the application of artificial intelligence in graphic information processing and its impact on improving image automation and analysis. The author explores the prospects for the development of these technologies in the publishing and printing industry in Ukraine, drawing conclusions about their potential in the future development of graphic information processing.

In the modern publishing and printing industry, the use of artificial intelligence combined with digital technologies can significantly enhance the efficiency and quality of processes involved in creating, editing, and printing graphic content. The presented methodology focuses on optimizing workflow processes and ensuring high-quality publishing products. Innovative approaches to graphic information processing in the context of the contemporary publishing and printing environment are discussed. In summary, the article aims to understand and address technological challenges in the field of graphic information processing, taking into account the prospects for its development and impact on various application domains.

Key words: *graphic information processing, technological challenges in the publishing and printing industry, artificial intelligence, development prospects of the publishing industry.*

Formulation of the problem. In the context of innovative approaches to graphic information processing, a range of technological challenges emerges, limiting the potential of this direction and complicating its development. One of the key issues is the need to enhance algorithms for processing graphic data to ensure efficiency and accuracy in diverse applications. This becomes particularly relevant due to the increasing volume of graphic information that needs real-time processing.

Another problem is addressing technical challenges associated with real-time processing of large volumes of graphic data. These challenges arise from the growing demands for interactivity and the speed of processing graphic elements in modern applications and systems.

Additionally, it is crucial to address the application of artificial intelligence and deep learning in graphic information processing. Defining effective methods and their successful implementation can be a complex task due to the high complexity of graphic data and the necessity to develop adaptive models.

These technological challenges require careful scientific analysis and the development of new approaches for effectively solving graphic information processing problems. Understanding and overcoming these challenges may open new perspectives for the development of innovative graphic data processing systems and expand their applications in various fields.

Analysis of Recent Research and Publications. Recent research in this field indicates a growing interest in using artificial intelligence and deep learning to improve algorithms for processing graphic data. There is a tendency to address efficiency and accuracy issues using intelligent methods such as neural networks.

Some studies also emphasize the resolution of technical challenges related to real-time processing of large volumes of graphic data. This may involve developing optimized algorithms and utilizing distributed computing to ensure speed and efficiency in processing.

Overall, research in this area aims to discover new, more efficient, and intelligent methods of graphic information processing for the development of novel applications in various domains, including computer games, virtual reality, medicine, and multimedia.

Both Ukrainian and foreign researchers are engaged in the issues of image processing, preparation, optimization, and encryption. Scholars such as Yu.M. Rashkevych, A.M. Kovalchuk, D.D. Peleshko [2], N.O. Kustra, N.D. Lotoshynska, V.G. Krasilenko, S.K. Hrabovlyak [1], K.S. Popadyneц, I.A. Khizhnyak, Yunak O. M. [4], and others have conducted research on the encryption and decryption of images. The studies of researchers M.M. Botvin, O.A. Hertsyi [3] are dedicated to improving the visual quality of digital images. V. Vanin, O. Zalevska, O. Vorobiov, and Yu. Lazarchuk-Vorobiova [6] have addressed the issues of existing software applications for graphic image processing.

Task statement. The aim of the article is to analyze innovative approaches to graphic information processing, focusing on identifying technological challenges that complicate the development of this field and highlighting development prospects in the context of these issues.

Outline of the main material of the study. Presentation of the main material. Graphic information processing in contemporary information society is becoming an increasingly vital component for numerous domains, including computer games, virtual reality, medicine, and multimedia. However, this progress inevitably presents us with a set of technological challenges that require careful analysis and systematization.

Improvement of Graphic Data Processing Algorithms. The first key challenge is the ongoing need to enhance algorithms for graphic information processing. With the growth in volume and complexity of graphic data, there is a necessity to develop more efficient, optimized algorithms capable of ensuring not only high speed but also precision in processing. It is essential to consider the diversity of applications for graphic information, ranging from the gaming industry to medical research.

Spatial Methods for Enhancing Graphic Data Processing. Spatial methods for enhancing graphic data processing are techniques based on direct manipulation of image pixels. In general, spatial image processing can be described by the equation [3]:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (1)$$

The group of image enhancement methods includes linear transformations, for example, image to negative transformation, logarithmic transformation, etc.

Image enhancement using the Laplace operator, this type of enhancement refers to linear spatial filtering methods and allows you to visually improve the image by increasing the sharpness according to formula 2:

$$g(x, y) = f(x, y) + c\nabla^2 f(x, y) \quad (2)$$

Analysis of spatial methods for improving the visual quality of digital images. Analyzing spatial methods for enhancing the visual quality of digital images, it can be concluded that the optimal choice in this case is the use of the Laplace operator for image improvement. This method contributes to making the image sharper, with clearer contours of elements, thereby emphasizing the details of the image. However, it is important to consider other methods that may prove more effective in different usage conditions.

Increasing the efficiency of computational processes. Another crucial aspect is the need to increase the efficiency of computational processes related to graphic information processing. Modern applications, such as virtual reality and computer games, demand significant computational power to ensure continuous interactivity and realistic graphical rendering.

Modern technological developments in graphic processing for the publishing and printing industry. The modern development of graphic processing technologies within the context of the publishing and printing industry offers unique opportunities for improving and expanding content creation and presentation processes. This research aims to explore contemporary and prospective methods of graphic information processing, including the application of artificial intelligence, and their impact on addressing technological challenges faced by the publishing industry.

Utilization of digital technologies in graphic design for publishing. contemporary publishing processes increasingly utilize digital technologies for processing and displaying graphic information. Graphic design, using editing and composition software, ensures high-quality graphic content.

Impact of artificial intelligence on graphic information processing. Research on the impact of artificial intelligence on graphic information processing reveals the potential for automating and optimizing content creation and editing processes. Machine learning algorithms can enhance pattern recognition, automate the resolution of technical challenges, and improve the quality of graphic products.

Integration of technologies in the publishing-polygraphic environment. In the modern publishing-

polygraphic environment, the combination of artificial intelligence (AI) and digital technologies can significantly enhance the efficiency and quality of processes involved in creating, editing, and printing graphic content. The methodology for this combination is presented below, with a focus on optimizing workflows and ensuring high-quality publishing products.

A methodology for combining AI and digital technologies with a focus on optimising workflows and ensuring high quality publishing:

Step 1: Assessment of needs and objectives:

1.1. Identification of requirements: analysis of the needs of the publishing and printing process and identification of key tasks where AI and digital technologies can be applied.

Step 2: Integration of artificial intelligence:

2.1. Use of machine learning algorithms: Implementation of machine learning algorithms for recognising and classifying graphic elements, which will facilitate the automation of content editing and categorisation processes.

2.2. Automated image generation: development of a system that uses AI to automatically generate images for covers and illustrations, taking into account style and preferences.

Step 3: Implementation of digital technologies:

3.1. Effective content management: use of digital technologies to create content management systems that allow easy tracking, editing and storage of graphic content.

3.2. Virtualised print proofing: using virtual reality (VR) to preview the look of print and correct any errors before physical printing.

Step 4: Optimisation and monitoring:

4.1. AI-assisted quality control: Developing a quality control system that uses AI to detect and correct errors in graphic content.

4.2. Data analytics for process improvement: applying data analytics to identify weaknesses and optimise.

Step 5: Implementation Preparation:

5.1. Training and Staff Support: Providing training for personnel on the use of new technologies and establishing a support system for effective implementation. With the growing volume of graphic information and the challenges associated with its processing, the development and implementation of new methodologies and approaches become necessary. This research aims to identify and propose new methods to effectively address technological challenges in the field of graphic information processing.

1. Application of Contextual Analytics:

– deep content analysis. Using deep learning algorithms to analyze the context of graphic information, facilitating more accurate recognition and understanding of content;

– contextual modification. Developing a system that considers the context of graphic information for automated modification and adaptation of content to various requirements and platforms.

2. Integration of content management systems:

– unified content management platform. Creating a unified content management system that integrates editing, analysis, and publication of graphic content;

– distributed editing system. Implementing a distributed editing system for collaborative work among editors and authors, considering geographical distances.

3. Development of virtual reality (VR) technologies:

– virtual editing tools. Developing virtual tools for editing graphic content, allowing editors to interact with objects in a 3D space.

For example, the use of Emu Video enables the creation of not only short videos based on textual input but also images. The user enters text, and the tool generates an image based on it. The second stage involves generating a video based on the text and previously generated images. With Emu Edit, images or their parts can be edited, following textual prompts for AI. Users can modify individual elements, geometry, background, colors, etc. [9];

– virtual print preview: Creating the capability for a virtual preview of graphic content before printing to prevent potential defects.

4. Expansion of multimedia processing functions:

– interactive multimedia elements. Implementing interactive features into graphic content to enhance user interaction and attractiveness.

Multimedia interactive publications (formats such as ARK, EXE, EPUB3, FLASH, HTML5, IBOOKS, specialized formats of individual manufacturers). In the layout and formatting of multimedia books and magazines, various types of software are used, including 1) desktop programs (software editors and compiler programs); 2) online cloud platforms; 3) content management systems (CMS) [8];

– automated file size optimization. Developing a system for the automatic optimization of file sizes to ensure fast loading and efficient device utilization.

Methods of lossless information compression are universal and cover all types of images but have a relatively small compression ratio. Using one of the lossless compression methods can provide

approximately a two-fold compression of the image, although this largely depends on the characteristics of the image. Lossy compression methods are the most effective but also require evaluation based on the criteria mentioned above, as a crucial aspect in reproduction methods is ensuring the rational reproduction of the original (analog or digital) with a full set of color and tonal characteristics [7].

The development and implementation of new methodologies in the field of graphic information processing will contribute to the improvement of productivity, accuracy, and quality of work in this segment. The proposed approaches take into account current technological challenges and create new opportunities for the industry's development.

Conclusions. In the context of graphic information processing, the key challenges lie in ensuring the efficiency and accuracy of graphic data processing. Improving algorithms and enhancing the efficiency of computational processes will be decisive steps in overcoming these challenges. Research in this direction has the potential not only to improve the technical aspects of graphic information processing but also to expand the applications of these technologies in various fields from entertainment to science.

The combination of artificial intelligence and digital technologies in the publishing and printing industry can significantly improve the productivity and quality of the publishing process. Thoroughly studying requirements, integrating new technologies, and systematically analyzing potential enhancements are key stages in this process. The applications of new graphic data processing technologies in the publishing industry are outlined below:

1. Efficient editing and design:

– automated editing of images and graphics. Using graphic data processing technologies for automated editing and optimization of images, allowing more

efficient adaptation of graphic content to various publishing formats;

– creation of interactive graphic content.

Developing interactive graphic elements to enrich publishing content and engage readers.

2. Enhancing visual appeal:

– use of 3D Models in publications. Integrating three-dimensional models and graphics to enhance the visual appeal of covers and illustrations.

– adaptive design for different platforms. Applying adaptive design technologies to automatically adjust graphic content to different devices and screen sizes.

3. Improvement of production processes:

– automation of verification and correction processes. Using machine learning algorithms to automate the verification and correction processes of text and graphic elements in publications;

– efficient print preparation. Implementing graphic data processing technologies to optimize files before printing, reducing time and production costs.

4. Personalized graphic content:

– analysis of reader preferences. Utilizing data analysis to understand reader preferences and create personalized graphic content;

– interactive graphic elements in electronic publications. Embedding interactive graphic elements, such as animations or videos, in electronic publications to enhance the reading experience.

5. Virtual reality in publishing:

– creation of virtual covers and promo materials. Using virtual reality technologies to create impressive virtual covers and promotional materials;

– virtual book presentations. Organizing virtual book presentations and events for interaction with authors and readers in a virtual environment.

Overall Benefits: The use of new graphic data processing technologies in the publishing industry can improve not only the quality and attractiveness of products but also make publishing processes more efficient and adaptable to modern reader demands.

Bibliography:

1. Красиленко, В.Г., Грабовляк, С.К. Моделювання матричного афінноперестановочного алгоритму для криптоперетворень зображень. *Наука і навчальний процес: науково-методичний збірник матеріалів науково-практичної конференції Університету «Україна»*. Вінниця, 2012. С. 171–172.

2. Рашкевич Ю., Ковальчук А., Пелешко Д., Купчак М. Застосування тернарних афінних перетворень в шифруванні та дешифруванні трьох зображень. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.5. С. 336–340.

3. Ботвін М. М., Герцій О. А. Аналіз просторових методів покращення візуальної якості цифрових зображень. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2017. Вип. 30. С. 191–196.

4. Герцій О. А., Бутрик Н. О. Порівняльний аналіз методів компактного представлення графічної інформації. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія : Транспортні системи і технології*. 2021. Вип. 37. С. 130–143. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2021_37_15 (дата звернення: 12.01.2024).

5. Юнак О. М., Стрихалюк Б. М., Юнак О. П. Шифрування графічної інформації за допомогою матриць перетворень, для захисту від дешифрування нейронними алгоритмами. *Artificial intelligence*. 2020. № 2. С. 15–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/II_2020_2_4. (дата звернення: 10.01.2024).

6. Ванін, В., Залевська, О., Воробйов, О., Лазарчук-Воробйова, Ю. Переваги та недоліки існуючих програмних застосунків для обробки графічних зображень. *Сучасні проблеми моделювання*. № 23, 2022. С. 38–44. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2023-23-38-44>.

7. Афанасьев Д. Систематизація методів стиснення цифрових зображень. *Сучасне репродукування: інжиніринг, моделювання, мульти- та кросмедійні технології*. 2018. С. 24–29.

8. Женченко М. І. Технології макетування і верстання інтерактивних електронних видань. *Обрії друкарства*. Київ. № 1 (8). 2020. С. 62–75.

9. Meta презентувала інструменти для редагування фото та відео на основі ШІ. URL: <https://ain.ua/2023/11/17/emu-meta> (дата звернення 27.12.2023).

Андрющенко Т.Ю. МЕТОДИКА ПОЄДНАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ ОБРОБКИ ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Сучасні інноваційні підходи до обробки графічної інформації представляють значущий напрям досліджень, враховуючи стрімкий розвиток технологій та розширення застосувань графічних даних у різних галузях. У цій статті розглядаються технологічні виклики, пов'язані з необхідністю ефективної обробки великих обсягів графічної інформації та подальшого розвитку обчислювальних методів у видавничій та друкарській промисловості в Україні.

У статті акцентується увага на важливості удосконалення алгоритмів обробки графічних даних. Розглядаються методи покращення графічної інформації, спрямовані на оптимізацію обчислювальних процесів та забезпечення точності обробки. Увага приділяється технічним викликам, пов'язаним із обробкою графічних даних в реальному часі, з урахуванням потреб сучасних застосувань, таких як віртуальна реальність та розширена реальність.

Зокрема, у статті розглядається застосування штучного інтелекту в обробці графічної інформації та його вплив на удосконалення автоматизації та аналізу зображень. Автор досліджує перспективи розвитку цих технологій в видавничій та друкарській галузі в Україні роблячи висновки про їхній потенціал у майбутньому розвитку обробки графічної інформації.

У сучасній видавничій та друкарській галузі використання штучного інтелекту разом із цифровими технологіями може значно підвищити ефективність та якість процесів, пов'язаних із створенням, редагуванням та друкуванням графічного контенту. Представлена методологія фокусується на оптимізації робочих процесів та забезпеченні високої якості видавничої продукції. У статті обговорюються інноваційні підходи до обробки графічної інформації в контексті сучасного видавничого та друкарського середовища. Узагальнюючи, стаття спрямована на розуміння та вирішення технологічних викликів у галузі обробки графічної інформації, враховуючи перспективи її розвитку та вплив на різні сфери використання. Результати досліджень можуть виявити суттєвий вплив на подальший прогрес цієї важливої галузі технологій.

Ключові слова: обробка графічної інформації, технологічні виклики видавничо-поліграфічної галузі, штучний інтелект, перспективи розвитку видавничої галузі.

УДК 644.1+681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/14>

Баган Т.Г.

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

Бунь В.П.

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

Бунке О.С.

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

Надєляєв К.О.

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

ПРЕДИКТИВНЕ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ

У статті досліджено синтез системи підтримки мікроклімату з використанням предиктивного керування. В якості об'єкта керування обрано готельний номер. Для підтримки мікроклімату в ньому використовується припливно-витяжна система типу чилер-фанкойл з каналними внутрішніми блоками або фанкойлами. Використання модельно-прогнозуючого керування (МРС) в системах підтримки мікроклімату дозволяє отримати декілька важливих можливостей. МРС може адаптуватися до змін зовнішніх умов та внутрішніх параметрів системи мікроклімату, таких як температура, вологість, швидкість потоку повітря тощо. МРС може враховувати обмеження на витрату енергії та оптимізувати керування системами підтримки мікроклімату для забезпечення комфортних умов та економії енергії. Системи підтримки мікроклімату мають різні зони, такі як готельні номери, технологічні приміщення, нежитлові зони тощо. МРС може керувати кожною зоною окремо та оптимізувати умови в кожній з них. До того ж такий регулятор може прогнозувати та керувати температурними коливаннями, запобігаючи перегріву або охолодженню приміщень та забезпечуючи оптимальний комфорт. МРС може враховувати індивідуальні вимоги користувачів щодо комфорту, забезпечуючи персоналізований підхід до керування мікрокліматом. Завдяки оптимізації керування та забезпеченню ефективної роботи систем мікроклімату, МРС може допомогти знизити витрати на обслуговування та підтримку систем.

Моделювання роботи системи з МРС-регулятором виконано в середовищі MatLAB. В результаті порівняння різних алгоритмів керування встановлено, що використання МРС-регуляторів надає переваги у відпрацюванні зміни заданої температури на кінцеву температуру повітря в кімнаті.

В цілому, використання МРС в системах підтримки мікроклімату дозволяє досягти більшого рівня комфорту, ефективності та енергоефективності порівняно з традиційними методами керування.

Ключові слова: предиктивне керування, система підтримки мікроклімату, налаштування МРС-регулятора.

Постановка проблеми. Мікроклімат приміщення – це набір параметрів, які впливають на здоров'я та комфорт людей, які в ньому перебувають. Зазвичай до таких параметрів відносяться: температура, вологість та якість повітря. Для забезпечення необхідного стану повітря в приміщенні використовуються системи вентиляції, які представляють собою комплекс обладнання та установок, організованих для забезпечення

ефективного повітрообміну в робочій зоні приміщення. Ці системи включають в себе як обладнання для очищення повітря від пилу та інших домішок (включаючи повітропроводи), так і пристрої для припливу та витяжки повітря.

В якості прикладу приміщення розглянемо готельний номер. Кондиціонування повітря в готельних номерах може виконуватись наступними способами і системами: місцеві

спліт-системи, мультизональні спліт-системи, VRV/VRF системи або системи чилер-фанкойл.

Спліт-системи є найпростішими в монтажі та управлінні, однак вони мають недоліки в дизайні і обмежені тим, що до одного зовнішнього блоку може підключатися тільки один внутрішній блок, а також малі відстані від зовнішнім та внутрішнім блоком.

Мультизональні системи кондиціонування є покращеним варіантом простих спліт-систем. В цьому випадку до одного зовнішнього блоку підключається кілька внутрішніх, а довжини трас – більші.

VRV/VRF системи можуть підключати до 64 внутрішніх блоків до одного зовнішнього, є великий вибір різних внутрішніх блоків, довжини трас сягають кілометрів. Принцип їх роботи такий: зовнішній блок з'єднується з внутрішніми блоками через фреонові магістралі. Компресор, що розташований у зовнішньому блоці системи VRF, стискає фреон, який подається туди у пароподібному стані. Після цього стиснутий охолоджений агент подається в теплообмінник, який може бути охолоджений повітрям або водою. Вентилятор обдуває теплообмінник, охолоджуючи фреон до рідкого стану. Далі охолоджений агент подається в розгалужувач-рефнет, де він розподіляється фреоновими магістралями до внутрішніх блоків системи. Внутрішні блоки обладнані дросельними клапанами для регулювання кількості фреону в поточний період. Потім охолоджений агент подається в випарник, де він кипить і охолоджує повітря, що відбирається з обслуговуваного приміщення. На завершення цього процесу, фреон направляється в компресор для подальшого циклу.

Система чилер-фанкойл має кращі характеристики, адже потужності одного чилера можуть бути більшими, довжини трас обмежені тільки використовуваними насосами, також є великий вибір внутрішніх блоків. У системі кондиціонування чилер-фанкойл особливістю та основною відмінністю від інших кліматичних систем є використання води для охолодження повітря замість фреону, що характерно для інших систем кондиціонування. Ця система використовує чилер як холодильний апарат, який охолоджує воду. Чилер використовує воду у випарнику для виконання процесу охолодження, чим суттєво відрізняється від звичайного фреонового кондиціонера.

В готельних номерах в основному використовують систему типу чилер-фанкойл з каналними внутрішніми блоками або фанкойлами. В менших готелях використовують VRV/VRF, а для готелів

побільше використовуються чилери. Канальний фанкойл чи внутрішній блок в основному розташовують в підшивній стелі в коридорі відразу після входу в номер. Витяжна решітка розташовується біля входу зі стелі, а припливна решітка розташовується в стелі кімнати або зі стіни в кімнату.

Вибір саме такої комбінації обумовлений рядом причин, а саме:

- наявність двох каналів (припливного та витяжного) дає можливість більш точного регулювання параметрів приміщення (температури, вологості тощо);
- необхідність підтримувати належну якість повітря та виводити застоєне повітря з приміщення;
- завдяки системі чилер-фанкойл немає потреби у зовнішньому блоці. Також враховуючи те, що в готелі велика кількість номерів, це знижує вартість системи.

Система регулювання мікроклімату готельного номера виконує наступні функції: інформаційні, регулювання та захисту.

Інформаційні функції дозволяють отримувати дані з датчиків та виконувати взаємодію між різними рівнями АСК ТП. Функції регулювання призначені для безперервного керування відповідними параметрами. Захисні функції виконують захист системи під час нештатних ситуацій та аварій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною метою подібних автоматичних систем керування є контроль та регулювання температури в приміщеннях. Останні тенденції сприяють удосконаленню систем керування інженерним обладнанням приміщень. Замість традиційних ПД-алгоритмів, які використовуються для регулювання за температурним графіком, в керуванні тепловим режимом приміщень можуть застосовуватися складніші алгоритми автоматичного чи оптимального керування. На сьогоднішній день досить часто розглядаються роботи, де для керування мікрокліматом будівель пропонуються системи адаптивного та оптимального керування, системи на основі нечіткої логіки, а також системи, що використовують нейромережеві та генетичні алгоритми [1]. В останні роки активно обговорюється підхід, що використовує прогнозуючі (предиктивні) моделі – MPC (від англ. *Model predictive control*) [2, 3].

Побудова MPC-регулятора з функціоналом урахування обмежень на вхідні сигнали може пропонуватися для нестационарного об'єкту керування, для якого використання класичних методів управління ускладнене [4].

Використання MPC-регулятора надає значні переваги при відпрацюванні зміни уставки та мінімізації впливу зовнішніх збурень на кінцевий параметр [5].

Мета роботи полягає в створенні автоматизованої системи керування мікрокліматом готельного номера з використанням технології прогнозування керування. Така система дозволяє ефективно застосовувати наявні ресурси, використовуючи їх у найбільш необхідний час.

Виклад основного матеріалу. Принцип роботи предиктивного керування. Предиктивне керування – це метод оптимального керування, у якому розраховані керуючі дії мінімізують функцію витрат для обмеженої динамічної системи на кінцевому горизонті подій, що поступово зменшується. На кожному кроці часу MPC-регулятор отримує або оцінює поточний стан системи. Потім він розраховує послідовність керуючих дій, яка мінімізує витрати шляхом вирішення задачі обмеженої оптимізації, що залежить від поточного стану системи. Далі регулятор застосовує лише першу обчислену керуючу дію, не враховуючи наступні. На наступному часовому проміжку процес повторюється.

MPC використовує модель процесу, щоб зробити прогноз щодо його майбутньої поведінки. Він також використовує оптимізатор, який гарантує, що прогнозований майбутній вихід відповідає встановленій уставці. Функція вартості обчислюється згідно формули:

$$J = \sum_{i=1}^p w_e e_{k+i}^2 + \sum_{i=0}^{p-1} w_{\Delta u} \Delta u_{k+i}^2$$

MPC-регулятор повинен знайти найкращий прогнозований шлях, який є найближчим до уставки. Отже, він моделює кілька подібних сценаріїв майбутнього. Однак він не виконує ці симуляції у випадковому порядку, а робить це систематично, за встановленим алгоритмом, за допомогою оптимізатора. Вирішуючи задачу оптимізації, MPC-регулятор намагається мінімізувати розбаланс e між уставкою та прогнозованою траєкторією. Він також намагається мінімізувати зміну керуючого впливу від одного кроку до іншого. Функція J цієї оптимізаційної задачі включає обидва ці фактори та представлена як зважена квадратна сума прогнозованих помилок і приростів керуючого впливу.

На довільному кроці MPC-регулятор вирішує задачу оптимізації на горизонті прогнозування. Прогнозована траєкторія з найменшим J дає оптимальне рішення, а отже, визначає оптимальну послідовність впливів, яка максимально

наблизить вихідну величину до значення уставки. На поточному кроці часу регулятор застосовує до автомобіля лише перший розрахунок цієї оптимальної послідовності та ігнорує решту. Виходячи з застосованого керування маємо певне значення вихідної величини. На наступному кроці регулятор отримує нове вимірювання параметра. Тепер горизонт прогнозування зміщується вперед на один часовий проміжок, і регулятор повторює той самий цикл обчислень, щоб знайти оптимальне керування для наступного часового проміжку.

Налаштування MPC-регулятора. Даний регулятор має наступні параметри:

- Частота дискретизації;
- Горизонт прогнозування;
- Контрольний горизонт;
- Обмеження;
- Пріоритетність.

Частота дискретизації (T_s) визначає швидкість, з якою регулятор виконує алгоритм керування. Важливо правильно підібрати даний параметр, оскільки при занадто великому значенні регулятор не встигне зреагувати на зовнішнє збурення. І, навпаки, при занадто малому значенні регулятор буде робити велику кількість обчислень, що перевантажить контролер та вплине на його коректну роботу.

Рекомендується встановлювати даний параметр по наступній формулі:

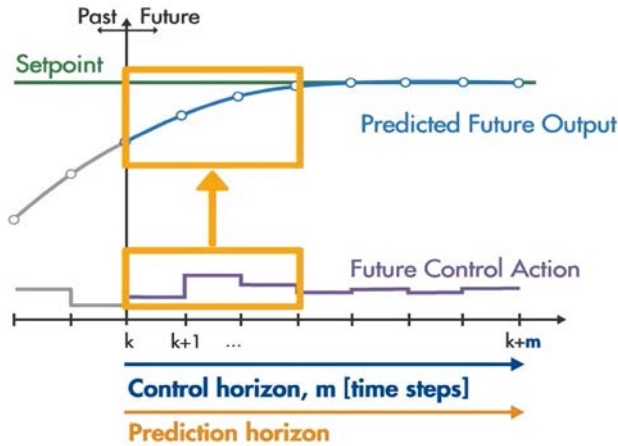
$$\frac{T_r}{20} \leq T_s \leq \frac{T_r}{10},$$

де T_r – час наростання.

Горизонт прогнозування визначає кількість прогнозованих майбутніх кроків. При занадто малому значенні регулятор не встигне зреагувати на зовнішнє збурення. Але при занадто великому значенні регулятор стане занадто повільним та негнучким, оскільки при будь-якому збуренні йому знадобиться відкинути значну частину обчисленого, що є неефективним використанням потужностей регулятора. Рекомендація щодо вибору горизонту прогнозування полягає в тому, щоб мати від 20 до 30 вибірок, що охоплюють час регулювання системи.

Контрольний горизонт m – це кількість кроків, які потрібно оптимізувати на контрольному інтервалі k . Кожен контрольний хід у контрольному горизонті можна розглядати як вільну змінну, яку має обчислити оптимізатор. Відповідно при занадто малому значенні параметра ми отримаємо неточний прогнозований результат. В той же час, при занадто великому значенні, буде значне навантаження на регулятор. Варто зауважити, що зазвичай лише перші кілька обчислень мають

значний вплив на прогнозовану вихідну поведінку. Хорошим емпіричним правилом для вибору контрольного горизонту є встановлення його на 10–20% від горизонту прогнозування та наявність мінімум 2–3 кроків (рис. 1).



Predicted Future Output – прогнозований майбутній вихід;
Future Control Action – прогнозовані майбутні кроки регулювання.

Рис. 1. Контрольний горизонт

MPC може включати обмеження на вхідні дані, швидкість їх зміни входів і вихідні дані. Це можуть бути як м'які, так і жорсткі обмеження. Жорсткі обмеження не можна порушити, тоді як м'які обмеження можна. Рекомендується встановити вихідні обмеження як м'які та уникати жорстких обмежень одночасно на вхідні дані і на швидкість їх зміни [7].

Пріоритетність визначає, які вхідні дані будуть більш важливими при регулюванні. Це реалізується за допомогою коефіцієнтів, на які домножуються вхідні або вихідні дані. Налаштування цього параметру індивідуальне для кожної окремої системи.

Дослідження АСК з MPC-регулятором. Налаштування MPC-регулятора будемо здійснювати з урахуванням математичної моделі водяного калорифера та приміщення [6]. Склавши рівняння теплового балансу для різних складових маємо систему з трьома диференційними рівняннями:

$$\begin{cases} G_W c_W (\theta_{W0} - \theta_W) - \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) = M_W c_W \frac{d\theta_W}{dt} \\ \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_M c_M \frac{d\theta_M}{dt} \\ G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt} \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \frac{d\theta_W}{dt} = \frac{G_W c_W (\theta_{W0} - \theta_W) - \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M)}{M_W c_W} \\ \frac{d\theta_M}{dt} = \frac{\alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A)}{M_M c_M} \\ \frac{d\theta_A}{dt} = \frac{G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A)}{M_A c_A} \end{cases}$$

де

- G_W – витрата води;
- $\theta_{W0}(t), \theta_W$ – температура теплоносія на вході та виході калорифера відповідно;
- $\theta_M(t)$ – усереднена температура трубок калорифера (калорифер містить n трубок довжиною H);
- $G_A(t)$ – витрата повітря, що надходить до теплоносія;
- $\theta_{A0}(t), \theta_A(t)$ – вхідна та вихідна температура повітря відповідно;
- c_A – теплоємність повітря;
- M_A – маса повітря в об'ємі калорифера.
- c_W – теплоємність теплоносія;
- α_0 – коефіцієнт тепловіддачі між теплоносієм та внутрішньою поверхнею труб;
- F_0 – площа внутрішньої поверхні усіх труб, $F_0 = nLd_0$;
- d_0 – внутрішній діаметр труб;
- M_W – маса теплоносія в усіх трубах калорифера.

Після лінеаризації та отримання матриці коефіцієнтів отримуємо модель системи в просторі станів.

MPC-регулятор змодельовано у Matlab в пакеті для формалізації прогнозуючої моделі Designer App (рис. 2).

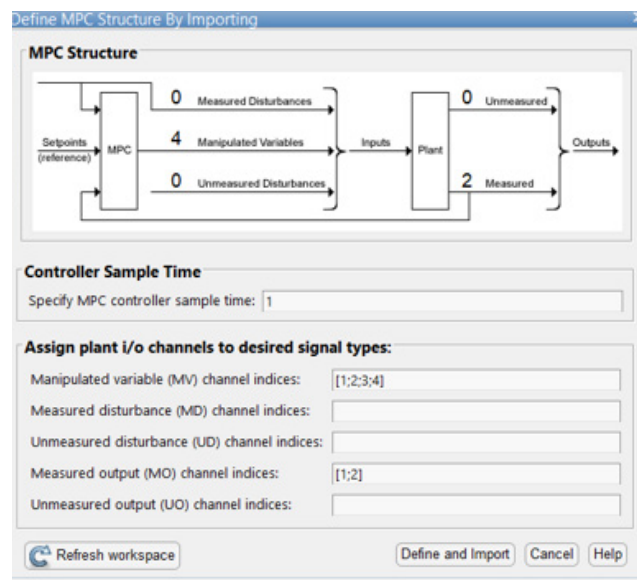


Рис. 2. Діалогове вікно Define MPC Structure By Importing

В результаті було отримано сценарій моделювання (рис. 3), прогнозуючий та контрольний

горизонти (рис. 4), встановлено обмеження параметрів (рис. 5) та налаштовані вагові коефіцієнти регулятора (рис. 6).

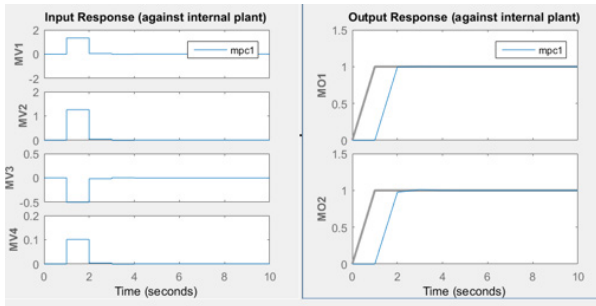


Рис. 3. Сценарій моделювання MPC

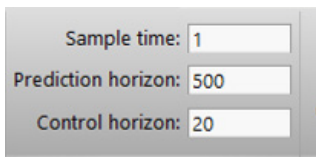


Рис. 4. Налаштування горизонтів

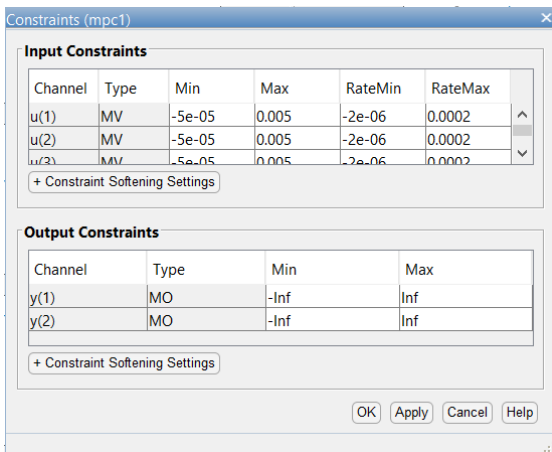


Рис. 5. Встановлення обмежень параметрів

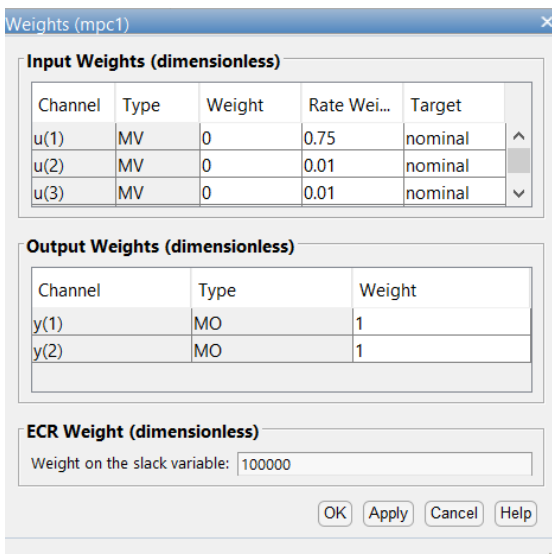


Рис. 6. Налаштування вагових коефіцієнтів

Після цього експортуємо налаштований MPC-регулятор у Simulink (рис. 7) та проведемо дослідження його роботи в системі підтримки заданої температури.

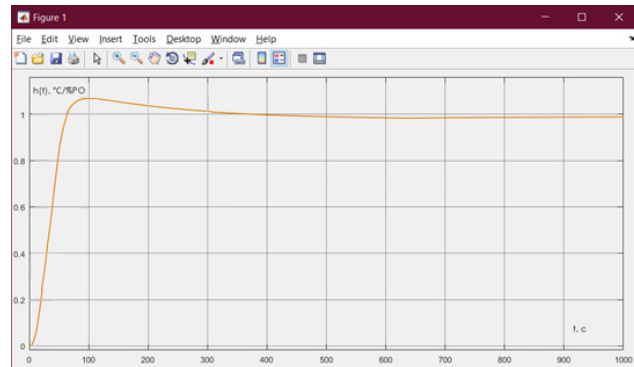


Рис. 7. Перехідний процес по каналу завдання-вихід із використанням MPC-регулятора

Перехідний процес по каналу завдання-вихід у системі з MPC-регулятором має більш плавний перехідний процес за рахунок зменшення динамічної похибки та перерегулювання.

За результатами досліджень можна зробити висновки, що модельно-прогнозуюче керування (MPC) може забезпечити кращі результати порівняно з традиційним ПД-керуванням у випадку, коли необхідно керувати багатьма об'єктами з великою кількістю змінних та обмежень. MPC може бути ефективнішим завдяки своїм оптимізаційним можливостям. Також у випадку коли важливо враховувати обмеження під час керування, наприклад, обмеження на витрату енергії або на вихідні сигнали, то MPC може бути кращим вибором, оскільки він може враховувати ці обмеження під час оптимізації керування.

Крім того, якщо важливо мати точні прогнози майбутнього стану системи для ефективного керування, то MPC може бути оптимальним, оскільки він базується на математичній моделі системи та прогнозує її стан у майбутньому.

Отже, у подібних ситуаціях MPC може забезпечити кращу продуктивність та ефективність у порівнянні з традиційним ПД-керуванням.

Висновки. Запропоновано розробку системи керування з MPC-регулятором. Синтез даної АСК та проведення досліджень, показали, що система з MPC-регулятором дає кращі результати роботи як в стаціонарному режимі, так і при умовах змін збурень і параметрів системи. MPC добре підходить для керування складними динамічними системами з багатьма змінними та обмеженнями, такими як системи підтримки мікроклімату. Він може ефективно керувати цими системами,

враховуючи їх складну динаміку та обмеження. Предиктивний регулятор може легко адаптуватися до змін у системі та середовищі завдяки своїм прогностичним можливостям. Це робить його ефективним для застосування у змінних умовах роботи системи. Інструментарій MPC може використовувати оптимізаційні алгоритми для пошуку найкращого керування в кожен момент

часу, що дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи системи навіть у змінних умовах. MPC може легко враховувати обмеження, такі як обмеження на витрату енергії або обмеження на вихідні сигнали, під час оптимізації керування. В цілому, MPC є потужним інструментом для оптимізації керування складними технічними системами з урахуванням їх динаміки та обмежень.

Список літератури:

1. Dounis A.I. Advanced control system engineering for energy and comfort management in a building environment / A.I. Dounis, C.Caraiscos // A review. Renew. Sust. Energ. Rev., 13(7), 2009. P. 1246–1261.
2. Alhajeri M., Soroush M. Tuning guidelines for model-predictive control. Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 10, P. 4177–4191.
3. Morato M.M. Model predictive control design for linear parameter varying systems // A survey. Ann. Rev. Control, vol. 49. 2020. P. 64–80.
4. Stepanets O. Model Predictive Control Toolbox Design for Nonstationary Process / Y. Mariash, O. Stepanets // KPI Science News. № 1. 2021. P. 42–49.
5. Баган Т.Г. Адаптивна система керування мікроклімату на базі теплового насосу / Т.Г. Баган, В.П. Бунь, Р.О. Безуглий // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Том 33 (72), № 1. 2022. С. 66–73.
6. Голінко І. М., Галицька І.Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2016. № 15. С. 83–92.
7. Баган Т.Г. Оптимізації процесу керування промисловими об'єктами методом моделювання на основі горизонту передбачення / Т.Г. Баган, К.О. Наделяєв // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Т. 2. С. 72–73.

Bahan T.H., Boun V.P., Bunke O.S., Nadeliaev K.O. PREDICTIVE CONTROL IN CONTROL SYSTEMS OF MICROCLIMATE

The article explores the synthesis of a microclimate support system using predictive control. A hotel room was selected as the control object. To support the microclimate, a chiller-fancoil system with ducted indoor units or fancoils is used in it. The use of Model Predictive Control (MPC) in microclimate support systems enables several important capabilities. MPC can adapt to changes in external conditions and internal parameters of the microclimate system, such as temperature, humidity, air flow rate, etc. MPC can consider energy consumption constraints and optimize the control of microclimate support systems to ensure comfortable conditions and energy savings. Microclimate support systems have various zones such as hotel rooms, technical rooms, non-residential areas, etc. MPC can control each zone separately and optimize conditions in each of them. Moreover, such a controller can forecast and control temperature fluctuations, preventing overheating or cooling of rooms and ensuring optimal comfort. MPC can consider individual user comfort requirements, providing a personalized approach to microclimate control. By optimizing control and ensuring the effective operation of microclimate systems, MPC can help reduce maintenance and support costs.

The modeling of the system's operation with an MPC controller was performed in the MatLAB environment. As a result of comparing different control algorithms, it was established that the use of MPC controllers provides advantages in achieving the desired temperature change to the final room air temperature.

Overall, the use of MPC in microclimate support systems enables a higher level of comfort, efficiency, and energy efficiency compared to traditional control methods.

Key words: predictive control, microclimate support system, MPC controller tuning.

УДК 004.056.2:519.686.2:004.056.5:681.327:794.8
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/15>

Бишевец Н.Г.

Національний університет фізичного виховання і спорту України

Бишовець Н.М.

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

Бойков А.І.

Національний університет фізичного виховання і спорту України

Фуртат С.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ

Універсальною задачею оптимізації маршрутів є задача комівояжера, яка в силу свого прикладного застосування є однією з найбільш досліджених задач. Проте інтерес вчених до цієї задачі не згасає, а наряду із досягненнями науки і техніки задача модернізується, вводяться додаткові обмеження та розробляються нові, більш удосконалені методи й алгоритми для її розв'язання. **Мета:** узагальнити дані щодо прикладної спрямованості TSP та розглянути перспективи застосування TSP у практиці кіберспорту. **Результати дослідження.** Систематизовано дані щодо спектру застосування TSP, яка успішно використовується в логістиці, виробництві, телекомунікації тощо. Загострено увагу на тому, що TSP є ключовим фактором у плануванні маршрутів БПЛА (безпілотні літаючі апарати), попит на які постійно зростає. Використання TSP дозволяє БПЛА з більшою ефективністю виконувати такі завдання як доставка вантажів, моніторинг інфраструктури, розвідка, спостереження, картографування, обприскування полів та багато інших. Завдяки застосуванню TSP БПЛА знаходять широке застосування в авіації та космонавтиці, військовій справі, геодезії та геоінформації, сільському господарстві, екологічному моніторингу та охороні природи. Установлено, що в сфері фізичного виховання і спорту TSP насамперед використовують з метою удосконалення процесу планування туристичних маршрутів. Запропоновано адаптувати TSP до проблем, які виникають у ході кіберспортивної діяльності. Не зважаючи на існуючі обмеження щодо кількості вузлів, обґрунтовано, що значна кількість проблем, пов'язаних із кіберспортивною практикою, може бути вирішена засобами MS Excel із використанням надбудови Розв'язувач. Наведено приклад розв'язання задачі, спрямованої на мінімізацію довжини дроту, що об'єднує комп'ютери в локальну мережу. Визначено перспективи застосування TSP в практиці кіберспорту. **Висновок.** Існує невикористаний потенціал TSP в практиці кіберспорту. Застосування TSP сприятиме удосконаленню планування тренувального процесу та управління підготовкою кіберспортсменів, виробленні та прийнятті управлінських рішень, оптимального вибору каналу поширення реклами кіберспортивних заходів та розв'язанні інших нагальних питань у практиці кіберспорту.

Ключові слова: задача комівояжера, спрямованість, спектр, застосування, кіберспорт, перспективи, удосконалення.

Постановка проблеми. Значна увага дослідників прикута до задачі комівояжера (TSP), оскільки до такого класу задач формально зводиться значна кількість прикладних задач ефективної маршрутизації потоків, зокрема сировини, інформації, енергоресурсів тощо [3]. У загальному вигляді задача комівояжера полягає в побудові в транспортній мережі найкоротшого замкненого маршруту з обмеженням на однократне відвідування кожного вузла (пункту відвідування) й поверненні в перший вузол [3, 8, 9].

Утім у ході планування маршруту часто доводиться враховувати такі фактори як зміна параметрів у часі: непостійні параметри вартості/часу в дорозі, обмежена доступність вузлів, вимушені послідовності відвідування деяких вузлів, або інші важливі фактори, які слід враховувати при розв'язанні задачі [4, 6, 7]. Тому за останні кілька десятиліть підходи до розв'язання TSP еволюціонували від алгоритмів з точним перебором до евристичних алгоритмів, таких як TSP з табу-кластеризацією (TCTSP),

TSP з множинними депо (MDTSP), TSP з часовими вікнами (TSPTW), TSP з обмеженням на маршрут (CVRP), TSP з несиметричними відстанями (ATSP), TSP з евристичними обмеженнями (E-TSP) та інші. Це дозволило вирішувати більш складні задачі TSP з більшою кількістю вузлів та додатковими обмеженнями [5, 7, 9]. Відповідно й застосування TSP значно розширилося від оптимізації транспортних маршрутів, що було одним із перших та найбільш очевидних застосувань, до таких областей, як управління супутниками, яке включає планування маршрутів для збору даних з супутників і оптимізацію їх траєкторій.

Серед використовуваних методів оптимізації розрізняють точні алгоритми, за допомогою яких знаходять точне оптимальне рішення, і алгоритми наближення, де методи апроксимації розподіляють на евристичні та метаевристичні. Евристичні методи дозволяють знайти недалеко від оптимальних рішення, але не гарантують їх оптимальності. Зі свого боку, метаевристика слугує основою для побудови евристики, є підґрунтям створення відповідного евристичного алгоритму [7]. Наряду з науково-технічними досягненнями вчені не лише розробляють дедалі більш удосконалені алгоритми розв'язання TSP, досліджуючи нові методи та підходи, але й здійснюють пошук нових сфер застосування TSP, розширюючи її використання за межі традиційних областей, таких як логістика та виробництво, до таких областей, як спорт, аеронавтика, біоінформатика та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій демонструє, що наукова спільнота не припиняє обговорювати питання, пов'язані із застосуванням TSP та її удосконаленням [5]. Стійкий інтерес до цієї задачі обумовлений її універсальністю і можливістю прикладного використання в різних областях знань.

Так, проблему ефективного покриття території обмеженою кількістю датчиків або камер М. Сундарраджан (M. Sundarajan) [9] розглянув як задачу TSP та запропонував новий підхід до її розв'язання шляхом включення алгоритмів вибору дерев для підвищення ефективності та точності. Унаслідок дослідження вчений приходив до висновку, що при вирішенні проблем, де ефективно та точно охоплення території має важливе значення (спостереження, моніторинг, інспекція), такий підхід значно покращує якість покриття при одночасному зниженні обчислювальної складності в порівнянні з традиційними алгоритмами TSP.

Стверджуючи, що планування ресурсів відіграє життєво важливу роль в управлінні супутниковою мережею, Т. Чжан (T. Zhang) [10] розглянув інте-

гроване планування наземно-космічних ресурсів супутників середньої навколоземної орбіти у супутниковій навігаційній системі Китаю як кластерну задачу комівояжера з табу-кластеризацією TCTSP, де TCTSP поділяє вузли на два типи підмножин: кластери та набори так званих заборонених вузлів. Автор запропонував для її розв'язання метаевристику, яка поєднує оптимізацію мурашиної колонії з перелікуванням шляхів, який є ефективним механізмом пошуку з інтенсифікацією [10].

Крім того автори наводять дані, які свідчать про успішне застосування TSP при реалізації з'єднання, яке входить до плати комп'ютера в певній точці, проходить через усі модулі та завершується в певній точці, при вирішенні проблеми комплектування замовлень на складах, плануванні розкладу інтерв'ю між туристичними брокерами та продавцями в індустрії туризм, проектуванні геодезичних мереж глобальної навігаційної супутникової системи та розв'язанні багатьох інших проблем [8], а також інформують про досвід практичного вирішення завдань дистриб'юторської компанії в конкретних умовах та інших вимог транспортного менеджменту в компанії [6].

Крім того, в теперішній час значну увагу науковці приділяють дослідженням, спрямованим на оптимізацію польотів БПЛА. Завдання планування траєкторії для збору даних на основі БПЛА в Інтернеті речей (IoT) З. Ван (Z. Wang) [11] сформулював як окремий випадок задачі комівояжера з околицями (TSP-N) й запропонував підхід до її розв'язання, який забезпечує компроміс між часом виконання та точністю розрахунку. У своїй роботі для планування шляху БПЛА в міських та приміських сценаріях Д. Добрілович (D. Dobrilovic) [4] представив як задачу TSP, де мінімальна кількість БПЛА використовується для моніторингу максимальної кількості локацій, випадково обраних локацій та динамічно розрахованих траєкторій та для її розв'язання скористався підтримкою генетичного алгоритму (GA).

У наших попередніх дослідженнях ми розглядали шляхи впровадження TSP в практику фізичного виховання і спорту [1, 2]. Слід відзначити, що в теперішній час на тлі започаткування й становлення кіберспорту питання, пов'язані із застосуванням TSP в ході кіберспортивної діяльності, є маловивченими. Проте ми вбачаємо значний потенціал у застосуванні TSP в практиці кіберспорту.

Мета дослідження: узагальнити дані щодо прикладної спрямованості TSP та розглянути перспективи застосування TSP у практиці кіберспорту.

Виклад основного матеріалу. TSP являє собою універсальний інструмент, який може використовуватися для різноманітних задач у різних областях. У ході дослідження ми систематизували дані щодо спектру застосування TSP. Дослідження дозволило визначити, що TSP успішно використовується в логістиці, виробництві, телекомунікації, біоінформатиці. І це далеко не повний перелік областей застосування TSP (рис. 1).



Рис. 1. Спектр застосування TSP

Водночас TSP є ключовим фактором у плануванні маршрутів БПЛА (безпілотні літаючі апарати), попит на які постійно зростає. Використання TSP дозволяє БПЛА з більшою ефективністю виконувати такі завдання як доставка вантажів, моніторинг інфраструктури, розвідка, спостереження, картографування, обприскування полів та багато інших. Завдяки застосуванню TSP БПЛА знаходять широке застосування в авіації та космонавтиці, військовій справі, геодезії та геоінформатиці, сільському господарстві, екологічному моніторингу та охороні природи (рис. 2).

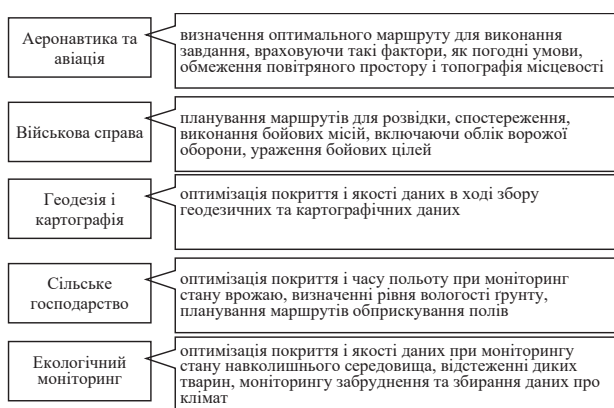


Рис. 2. Напрямки застосування TSP в плануванні польотів БПЛА

Відомо, що на тлі факторіального збільшення кількості можливих маршрутів в TSP, її обчислювальна складність зростає експоненціально, що робить складною для великих наборів даних. Утім, не зважаючи на наявні обмеження на кількість вузлів, за допомогою стандартного програмного забезпечення MS Excel з використанням надбудови Розв'язувач часто можна розв'язати багато проблем, які виникають у практиці фізичного виховання і спорту, на що вказує наш попередній позитивний досвід [1, 2]. Ми вважаємо, що є можливість оптимізувати процес прийняття рішень в кіберспорті завдяки впровадженню TSP. Наведемо приклад застосування TSP в кіберспортивній діяльності.

Постановка завдання. Для ефективного здійснення тренувального процесу кіберспортсменів необхідно об'єднати всі їхні комп'ютери в локальну мережу, починаючи й закінчуючи з комп'ютера тренера таким чином, щоб витрати на дріт були мінімальними, причому кожен комп'ютер під'єднується до мережі один раз. Наведемо вихідні дані за допомогою таблиці (рис. 3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Початкові дані									
2		Тренер	Капітан команди	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7
3	Тренер	999	9,1	15,5	10	6	13	16,3	17,5	23,3
4	Капітан команди	9,1	999	6,7	5,1	10,3	11,7	11,2	10	17,5
5	Гравець 1	15,5	6,7	999	7,3	15,1	12,8	18,9	5	13
6	Гравець 2	10	5,1	7,3	999	8	6,7	6,7	7,6	17,8
7	Гравець 3	6	10,3	15,1	8	999	7,8	12,5	15,3	19,4
8	Гравець 4	13	11,7	12,8	6,7	7,8	999	6	30,5	12,1
9	Гравець 5	16,3	11,2	18,9	6,7	12,5	6	999	5	24,7
10	Гравець 6	17,5	10	5	7,6	15,3	30,5	5	999	8,1
11	Гравець 7	23,3	17,5	13	17,8	19,4	12,1	24,7	8,1	999

Рис. 3. Табличне представлення вхідних даних у програмі MS Excel

Аналіз задачі

Константи – вихідна інформація – відстань між комп’ютерами кіберспортсменів.

Змінювані комірки – матриця змінних X. Це таблиця, де на перетині рядків і стовпців отримаємо відповідь на питання, які саме комп’ютери слід з’єднати (1 – Так, 0 – Ні).

Цільова функція (ЦФ) – результуючий показник – довжина дроту.

Напрямок оптимізації – мінімум.

Обмеження:

- елементи шуканої матриця X – бінарні (можуть приймати тільки два значення: Так – 1, Ні – 0);
- два комп’ютери можуть бути з’єднаними між собою один і тільки один раз, починаючи і закінчуючи комп’ютером тренера;
- умова зв’язності: необхідність уникати замкнутих шляхів.

Хід роботи

1. Ввести початкові дані.
2. Сформувані матрицю X та підрахувати суми елементів по рядках і стовпцях. Слід звернути увагу, що після автозаповнення в рядку Входить і стовпці Виходить стоятимуть виключно нулі (бо наразі матриця порожня).
3. Сформувані матрицю обмежень.
4. Сформувані діапазон невідомих – ряд Z2.
5. За допомогою функції TRANSPOSE, знайти стовпчик Z1 як матрицю, транспоновану до Z2.
6. Обчислити ЦФ (довжина дроту для локальної мережі).

7. Внести формулу для виконання умови зв’язності, де n – кількість комп’ютерів у локальній мережі (рис. 4).

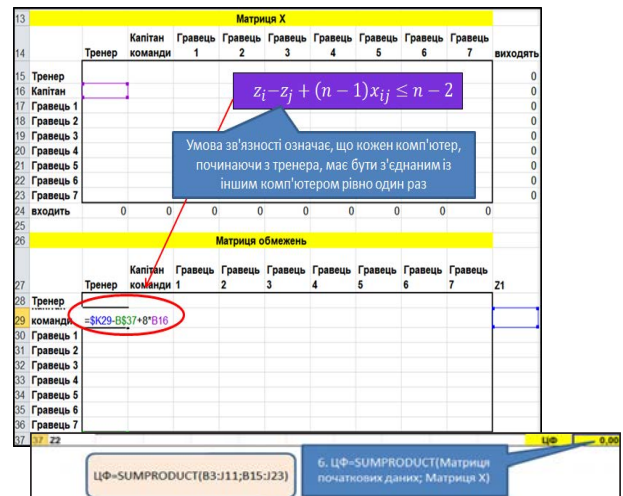


Рис. 4. Підготовка даних до розв’язання задачі

8. Поширити формулу на всю матрицю обмежень.

9. Вибрати закладку Дані на панелі інструментів MS Excel та активізувати надбудову Розв’язувач.

10. У вікні, яке з’явилося, заповнити параметри пошуку рішень (Матриця X – бінарна; Матриця обмежень не перевищує 7; ряд «Входить» рівний 1; стовпець «Виходить» рівний 1).

11. Натиснути кнопку Знайти рішення та отримати олзв’язок (рис. 5).

12. Для визначення порядку з’єднання ПК, аналізуємо матрицю X. Починаємо з рядка Тренер.

Матриця X										
	Тренер команди	Капітан	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7	виходять
Тренер	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Капітан команди	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Гравець 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Гравець 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Гравець 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Гравець 4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Гравець 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Гравець 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Гравець 7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
входить	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Матриця обмежень										
	Тренер команди	Капітан	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7	Z1
Тренер	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Капітан команди	7	0	2	1	7	6	5	4	3	7
Гравець 1	-3	-2	0	7	5	4	3	2	1	5
Гравець 2	-2	7	1	0	6	5	4	3	2	6
Гравець 3	-8	-7	-5	-6	0	7	-2	-3	-4	0
Гравець 4	-7	-6	-4	-5	1	0	7	-2	-3	1
Гравець 5	-6	-5	-3	-4	2	1	0	7	-2	2
Гравець 6	-5	-4	-2	-3	3	2	1	0	7	3
Гравець 7	-4	-3	7	-2	4	3	2	1	0	4
Z2	8	7	5	6	0	1	2	3	4	ЦФ 67,40

Рис. 5. Результат розв’язання

Бачимо, що одиниця перебуває на перетині цього рядка зі стовпцем Гравець 3, тобто комп'ютер тренера з'єднуємо з комп'ютером Гравця 3. Потім переходимо до ряду Гравець 3 і бачимо, що одиниця міститься на перетині зі стовпцем Гравець 4. Отже, прокладаємо дріт до комп'ютера Гравця 4. Продовжуємо міркування аналогічним чином, поки не повернемося до комп'ютера тренера.

Якщо з'єднати комп'ютери в локальну мережу у запропонований спосіб, то довжина дроту буде мінімальною і складе 67,4 ум.од. (рис. 6).

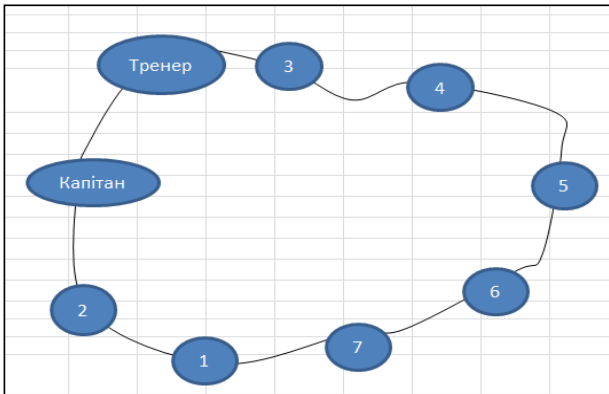


Рис. 6. Схематичне представлення порядку з'єднання комп'ютерів

Зауважимо, що в практиці кіберспорту може виникнути багато інших сценаріїв, які формально зводяться до TSP. Прикладом може слугувати необхідність оптимізувати порядок, в якому гравці підключаються до сервера, щоб мінімізувати затримку або навантаження на нього. Або ж, якщо гравці беруть участь у різних онлайн-турнірах, виникає потреба оптимізувати порядок, у якому вони беруть участь у матчах, щоб мінімізувати час очікування між іграми. Ще один варіант – це оптимізація розкладу тренувань, де тренер проводить індивідуальні онлайн-тренування

з кожним гравцем і потрібно мінімізувати перерви між тренуваннями. Ще один варіант постановки завдання може бути пов'язаний із організацією турніру з кіберспорту. Так само, у ході організації кіберспортивних змагань виникає проблема планування маршруту для транспорту, який перевозитиме обладнання або гравців з міста до міста. Вочевидь, можуть виникати й інші різноманітні проблеми, коли застосування TSP дозволить прийняти виважене й науково-обґрунтоване рішення.

Висновки. Універсальність та можливість прикладного використання у різних областях знань робить TSP однією з найбільш вивчених і застосовуваних задач у галузі оптимізації та штучного інтелекту.

На тепер підходи до розв'язання TSP еволюціонували від алгоритмів з точним перебором, які є обчислювально складними і можуть бути застосовані лише до невеликих наборів даних до ефективніших евристичних алгоритмів, які дозволяють вирішувати складніші та реалістичніші варіанти завдання TSP для великих наборів даних, що виникають у реальних сценаріях та забезпечують прийнятні рішення за розумний час.

У практиці кіберспорту може виникнути багато сценаріїв, які формально зводяться до TSP. При цьому попри існуючі обмеження на кількість вузлів, надбудова Розв'язувач MS Excel дозволяє знайти розв'язок TSP, яка містить до 9 вузлів включно, що буває достатнім для вирішення значної кількості проблем, з якими стикаються тренери та управлінці в кіберспорті.

Існує невикористаний потенціал TSP в практиці кіберспорту. Застосування TSP сприятиме удосконаленню планування тренувального процесу та управління підготовкою кіберспортсменів, виробленні та прийнятті управлінських рішень, оптимального вибору каналу поширення реклами кіберспортивних заходів та розв'язанні інших нагальних питань у практиці кіберспорту

Список літератури:

1. Бишевец Н. Г., Гончарова Н. М., Гончарук А. І. Формування навичок застосування інформаційних технологій у майбутніх фахівців із фізичної культури та спорту. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка*. 2020. № 10 (166). С. 126–133. DOI: 10.5281/zenodo.4506637.
2. Бишевец Н., Гончарова Н., Яковенко О., Родіоненко М. Оптимізаційні задачі в структурі освітнього процесу закладів вищої освіти з фізичної культури і спорту. *Фізичне виховання, спорт і культура здоров'я у сучасному суспільстві*. 2020. № 2 (50). С. 3–12. DOI: 10.29038/2220-7481-2020-02-03-12.
3. Кузьмичов А.І. Оптимізаційні методи і моделі. Моделювання засобами MS Excel: навчальний посібник. К.: Видавництво Ліра-К, 2017. 215 с.
4. Dobrilovic D. UAV Route Planning in Urban and Suburban Surveillance Scenarios. In: Kovács, T.A., Nyikes, Z., Fürstner, I. Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. *NATO Science for Peace and Security*. 2022. Series C: Environmental Security, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_19.

5. Eneko Osaba, Xin-She Yang, Javier Del Ser. Chapter 9 – Traveling salesman problem: a perspective review of recent research and new results with bio-inspired metaheuristics, *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence Algorithms, Theory and Applications*. 2020. P. 135–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819714-1.00020-8>.
6. Filip E., Otakar M. The travelling salesman problem and its application in logistic practice. *Business, Engineering*. 2011. URL: <https://api.semanticscholar.-org/CorpusID:11025633/>.
7. Kowalik P., Sobecki G., Bawoł P., Muzolf, P. (2023). A Flow-Based Formulation of the Travelling Salesman Problem with Penalties on Nodes. *Sustainability*. 2023. № 15 (5). P. 4330. <https://doi.org/10.3390/su15054330>.
8. Matai R., Surya, P., Murari S., Mittal, L. (2010). Traveling Salesman Problem: An Overview of Applications, Formulations, and Solution Approaches. *Traveling Salesman Problem* / Edited by Donald Davendra. InTech., 2010. doi.org/10.5772/12909.
9. Sundarrajan M., Jothi A., Prabakar D., Kadry S. (2023). The Smart Coverage Path Planner for Autonomous Drones Using TSP and Tree Selection / Kadry S., Prasath R. *Mining Intelligence and Knowledge Exploration. MIKE 2023. Lecture Notes in Computer Science()*. 2023, Springer, Cham. vol. 13924, https://doi.org/10.1007/978-3-031-44084-7_16.
10. Zhang T., Ke L., Li J., Li J., Huang J., Li, Z. Metaheuristics for the tabu clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*. 2018. № 89. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.07.008>.
11. Wang Z., Tao J., Gao Y. et al. A precision adjustable trajectory planning scheme for UAV-based data collection in IoTs. *Peer-to-Peer Netw.* 2021. № 14. P. 655–671. <https://doi.org/10.1007/s12083-020-01006-0>.

Byshevets N.H., Byshovets N.M., Boikov A.I., Furtat S.O. THE TRAVELER'S PROBLEM AS A UNIVERSAL TOOL FOR ROUTE OPTIMIZATION

The universal problem of route optimization is the traveling salesman problem, which is one of the most studied problems due to its practical application. However, the interest of scientists in this problem does not fade, and along with the achievements of science and technology, the problem is modernized, additional restrictions are introduced, and new, more advanced methods and algorithms are developed for its solution.

Purpose: to summarize the data on the applied orientation of TSP and to consider the prospects of using TSP in the practice of eSports. **Research results.** Systematized data on the range of applications of TSP, which is successfully used in logistics, production, telecommunications, etc. Attention has been drawn to the fact that TSP is a key factor in planning the routes of UAVs (unmanned aerial vehicles), the demand for which is constantly growing. The use of TSP allows UAVs to more efficiently perform tasks such as cargo delivery, infrastructure monitoring, reconnaissance, surveillance, mapping, field spraying, and many others. Thanks to the application of TSP, UAVs are widely used in aviation and aerospace, military affairs, geodesy and geoinformatics, agriculture, environmental monitoring and nature protection. It was established that in the field of physical education and sports, TSP is primarily used to improve the process of planning tourist routes. It is proposed to adapt the TSP to the problems that arise in the course of eSports activities. Despite the existing limitations on the number of nodes, it is reasonable that a significant number of problems related to the practice of eSports can be solved by means of MS Excel using the Solver add-in. An example of solving a problem aimed at minimizing the length of a wire connecting computers in a local network is given. Prospects for the use of TSP in the practice of eSports are determined. **Conclusion.** There is an untapped potential of TSP in eSports practice. The use of TSP will contribute to the improvement of the planning of the training process and the management of the training of e-athletes, the development and adoption of management decisions, the optimal choice of the distribution channel of advertising of e-sports events and the resolution of other urgent issues in the practice of e-sports.

Key words: the task of the traveling salesman, orientation, spectrum, application, eSports, prospects, improvement.

Бойчук В.О.

Хмельницька загальноосвітня школа № 14

Бойчук А.А.

ПВНЗ «Хмельницький економічний університет»

Бойчук М.В.

EPAM Ukraine

ПРО ФОРМУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ДІЙ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

Сучасні роботи та інші інтелектуальні агенти досить часто наражаються на проблеми з організацією автономного існування в реальних середовищах. У той же час процеси організації і планування дій, які первісно притаманні як людям, так і доволі простим біологічним істотам, дозволяють їм там виживати. Тому у статті описуються уявлення психології та нейрофізіології про організацію процесів формування і планування послідовностей дій у людей і тварин. Процеси формування і планування послідовностей дій розглядаються на основі декількох рівнів рефлекторних кілець, що дозволяє гнучко формувати послідовності дій.

Показано, як може реалізуватися дана специфіка на базі систем інтелектуального планування, мовної моделі *Transformer*, глибоких штучних нейронних мереж, спайкових нейронних мереж, навчання з підкріпленням, моделей штучних емоцій.

Враховуючи недоліки вищевикладених технологій на базі біонічного підходу з використанням моделі на основі штучних емоцій представлено метод для формування послідовностей дій у інтелектуальних агентів. Агент в кожний момент часу виконує і модифікує параметри політики вибору нової дії на основі значень виходів класифікаторів і вектору значень станів.

З використанням представленого методу показано порядок формування ланцюжків безумовних рефлексів. Визначено етапи формування умовних рефлексів на основі безумовних рефлексів. Функціонування орієнтованого безумовного та умовного рефлексів продемонстровано для моделей роботів в середовищі *V-REP*.

Метод розроблений на основі аналогій з функціонуванням мозку для гнучкого багаторівневого формування послідовностей дій у інтелектуальних агентів і надасть змогу забезпечити їх функціонування в складному змінному середовищі.

Ключові слова: штучний інтелект, нейронна мережа, інтелектуальний агент, планування, штучна емоція, навчання з підкріпленням, рефлекс.

Постановка проблеми. Проблеми вивчення організації і планування дій присвячено багато праць у різних сферах науки: математиці, інформатиці, штучному інтелекті (ШІ). І не зважаючи на це сучасні роботи та інші інтелектуальні агенти наражаються на проблеми з організацією автономного існування в реальних середовищах. У той же час процеси організації і планування дій, які первісно притаманні як людям, так і доволі простим біологічним істотам, дозволяють їм там виживати.

Психологія і нейрофізіологія розглядають організацію цих процесів доволі всебічно і комплексно, хоча часто і в узагальненій описовій формі. Наприклад у [1] організація і планування

дій людини розглядається на основі декількох рівнів рефлекторних кілець. На найнижчому рівні забезпечується несвідоме регулювання фізіологічних параметрів, наприклад тону м'язів з організацією їх тремору при переохолодженні. На більш високому рівні стоять найпростіші безумовні рефлекси, наприклад колінний, де рефлекторна дуга формується тільки у спинному мозку. Далі йдуть стандартні безумовні переміщувальні рефлекси, такі як хода. Вони більш складні і в їх організації приймають участь більш високі відділи мозку. Вище стоять сформовані під керуванням кори мозку нестандартні послідовності дій. Вони можуть мінятися і перегруповуватись під конкретну ціль. На найвищому рівні мова

і мислення, які характеризуються абстрактним і узагальненим змістом по плануванню і організації дій. Тобто з кожним рівнем йде ускладнення дій і цілей, які за допомогою цих дій досягаються, від регулювання фізіологічних параметрів організму до планування і реалізації мети діяльності організму на деякий період. У організації конкретної дії як правило беруть участь декілька рівнів рефлекторних кілець.

Людина може свідомо оперувати діями за безпосередньої участі процесів мислення і мови. При повтореннях послідовності дій з успішним завершенням йде оволодіння нею і вона може переміщуватись на нижчий неусвідомлений рівень з формуванням динамічного стереотипу (складного умовного рефлексу).

В праці [2] наведена схема такого ланцюжкового умовного рефлексу, де дії в ланцюжку при навчанні стимулюються комбінацією екстероцептивних та пропріоцептивних ефекторів з утворенням умовних комбінаційних центрів на базі виконання підтвердження. Наведені експериментальні дані, які показують, що у черепах виробляються такі рефлекси тільки максимум з трьох ланок і з 116 повторів, у людини з 5 ланок з одного повтору.

Така багаторівнева схема з формуванням динамічних стереотипів дає змогу планувати і керувати діяльністю систем з багатьма ступенями свободи в складному середовищі, яке постійно змінюється. У випадку коли виникають труднощі у користуванні сформованим стереотипом відбувається його деавтоматизація, перехід з неусвідомленого рівня на усвідомлений.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні засоби ШІ не реалізують цю схему повністю. Розглянемо їх особливості і можливості по її реалізації починаючи з мовного рівня.

Системи інтелектуального планування (GPS, Strips, Warplan, Interplan, Tweak) використовують мовний рівень, більшість у формалізованому вигляді математичної логіки[3]. Формування планів зводиться до логічного висновку. Така формалізація класичного планування без зв'язку з нижчими рівнями дає змогу цим системам працювати тільки в добре структурованих областях за допомогою експертів. Але у класичному плануванні є багато елементів, які використовує і людина, оперування підцілями, відкати від помилкових дій, пробне виконання поточного плану, прямий та зворотний пошук в просторі станів та ін.

Сьогоднішні системи на основі популярної мовної моделі Transformer [4] мають досить потужні можливості по генерації текстів по зада-

ній тематиці і візуальних зображеннях, створенню вербальних планів дій по завданню користувача.

З прикладів такого використання в плануванні можна назвати архітектури Decision Transformer і Trajectory Transformer у яких оминають звичайний для навчання з підкріпленням процес максимізації віддачі та безпосередньо генерують ряд майбутніх дій, які забезпечують бажаний прибуток [5, 6]. Також модель Transformer використовується для аналізу двовимірних карт перешкод для отримання шляхів руху роботів [7,8].

Слід вказати схожі сучасні розробки [9, 10, 11], один з яких проект Google DeepMind [12], де на основі багатьох експериментів та інформації з Інтернету формується візуально-мовна модель (VLM). На її основі в проекті Google DeepMind розроблена модель RT-2 (Robotic Transformer), яка дозволяє генерувати послідовність дій робота по виконанню елементарних для людини дій, на кшталт викидання сміття у корзину. Навчанням звичайно проводиться на основі демонстрації цих дій з надаванням роботу текстового опису дій і вихідних значень класифікаторів фото і відео цих демонстрацій з комбінуванням їх у моделі RT-2. При виконанні на кожному кроці обчислюються значення Q-функцій і відповідно них вибираються параметри дій. Використання мовної моделі Transformer дає змогу виконувати узагальнення і розмірковування, наприклад сміттям може бути не тільки один об'єкт, відслідковувати невидимі об'єкти і т.д. Дана розробка є вагомим кроком у спробах добитись функціонування агентів у реальних середовищах. Дії в ній безпосередньо прив'язані до мовної моделі Transformer, яка має потужні можливості по «розмірковуванню». Але таким чином пропускаються необхідні проміжні рівні з описаних на початку статті, які забезпечують гнучкість і ефективність навчання. Крім того в більшості випадків біологічні організми вчаться самостійно і їм навіть непотрібно для цього використання мови.

Якщо перейти на рівень кори головного мозку, яка згідно психології і нейрофізіології грає важливу роль у плануванні нових дій, то її моделлю в сучасному ШІ є глибокі штучні нейронні мережі, переважною функцією яких є задача класифікації. Вони широко і успішно використовуються у різних областях. Однак високий рівень абстракції штучних нейронів порівняно з біологічним аналогом разом із відсутністю в них можливості відобразити часову динаміку біологічних нейронів не дає змогу тільки ними описати послідовності дій і їх формування. Тому для опису планування

послідовності дій їх треба доповнювати іншими моделями.

Завдяки здатності відобразити різноманітну динаміку біологічних нейронів, представити час, частоту, фазу, спайкові нейронні мережі потенційно здатні моделювати складні послідовності процесів обробки інформації, що відбуваються в мозку. Однак теоретичний апарат спайкових нейронних мереж зараз знаходяться в стадії становлення. Із використанням спайкових нейронних мереж моделюються безумовні і умовні рефлексії. В [13] за допомогою спайкових нейронних мереж проводиться детальна структурна і функціональна імітація мозочка, що дає змогу інтелектуальному агенту наприклад вчитися переводити погляд точно на об'єкт у полі зору. Але моделювання ведеться на досить низькому рівні. Опис складних послідовностей дій за допомогою цих моделей поки що занадто громіздкий.

При пошуку послідовності дій до цілі також використовується навчання з підкріпленням – один із розділів машинного навчання в ході якого випробувана система навчається, взаємодіючи з деяким середовищем [14]. Цей метод моделює життя біологічної істоти, яка починаючи з народження та протягом усього життя використовує саме механізм навчання з підкріпленням. У свавців цю роботу виконує дофамінова система. Її робота не до кінця вивчена, але зводиться до того, що у разі отримання нагороди, дофамінова система через механізми пам'яті закріплює зв'язки між нейронами, які були активні безпосередньо до цього. Навчання з підкріпленням зазвичай описується у формі марківського процесу прийняття рішень. Агент отримує відкладену винагороду на наступному часовому кроці, щоб оцінити свою попередню дію. Доцільність кожного напрямку руху в просторі станів рахується за рівнянням Белмана. Методи навчання з підкріпленням Q-learning, SARSA, DQN, DDPG часто використовуються в моделюванні ігор, з досить високою продуктивністю на рівні або навіть вище людини. Однак навіть найкращі алгоритми навчання з підкріпленням вимагають десятки мільйонів кроків для навчання на просторі станів, які можна порівняти за ефективністю з випадковим пошуком, відповідно це дає змогу працювати лише на порівняно низьких розмірностях. Тому останнім часом ці алгоритми використовуються у комбінації з нейронними мережами.

Зараз на фоні бурхливого розвитку штучних нейронних мереж порівняно мало уваги приділяється механізму емоцій, хоча в природі вони відпо-

відають за навчання з підкріпленням. Досить повний огляд праць, де використовують моделі емоцій, можна знайти в статті [15]. Але представлені методи ще далекі від широкого практичного використання і в дечому відірвані від попередніх підходів.

Формулювання цілей статті. Тому враховуючи недоліки вищевикладених методів потрібна біонічна модель, яка дозволяла б описати динаміку, на відміну від штучних нейронних мереж. І яка б описувала складні багатоланцюжкові послідовності дій на декількох рівнях, на відміну від спайкових нейронних мереж. І могла б використовувати навчання з підкріпленням на основі емоцій по аналогії з функціонуванням біологічних організмів.

Виклад основного матеріалу. Стаття продовжує і розширює опис методу викладеного у [16, 17, 18], де зокрема представлено модель послідовності дій у вигляді направленого графа $G=(V,E)$ у якому кожній вершині v відповідає виконувана дія a з множини елементарних дій A , а кожній направленій дузі e , по якій відбувається перехід між діями, вагова функція $w:E \rightarrow R$, яка відображає ребра на їх ваги.

Вага дуги залежить від значень станів агента, які є аналогами емоцій і почуттів та в загальному відображають функції лімбічної системи людини і вплив різних нейромедіаторів на відділи мозку згідно шляхів їх розповсюдження для визначення загальної важливості для агента зовнішніх або внутрішніх подразників [19]. Стани агента $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$, $0 \leq y_i \leq 1$ можуть змінюватись класифікуючими елементами, які отримують інформацію як з зовнішнього середовища, так і на основі внутрішніх характеристик агента. Кожен стан y_i після зміни характеризується динамікою у часі. На початку діяльності агент може змінювати стани стандартним чином на визначений перелік подразників. В процесі діяльності список таких подразників і реакції можуть змінюватись.

Класифікуючі елементи агента є множиною штучних нейронних мереж з виходами X_1, X_2, \dots, X_m , де $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $0 \leq x_i \leq 1$.

Значення X можуть бути:

1) бінарними виходами навченої штучної нейронної мережі. Цей варіант ймовірно відображає функціонування в реальних біологічних системах;

2) точкою в схованому багатовимірному просторі на виході штучної нейронної мережі з зафіксованими вагами. Даний варіант використовується в наступному моделюванні.

Формування нових послідовностей дій відбувається за рахунок налаштування коефіцієнтів,

які відображають важливість кожного стану для дуги. Цей процес виконується циклічно і як правило починається при підвищених рівнях негативних станів та закінчується досягненням позитивних станів. Після цього послідовності можуть бути використовуватись в функціонуванні агенту при переважанні нормального стану, рівень якого моделює вплив нейромедіатора серотоніну. При неуспіху послідовності агент впадає в стан невдачі і вона може поступово розформуватися за рахунок перенаштування коефіцієнтів та зміни рівня нормального стану.

В експерименті статті [16] модель робота рухалась по простору оточеному стінами. Значення w_i в експерименті лінійно залежали від станів y_j . Стан «страху» використовувався для самонавчання послідовності дій по униканню зіткнень зі стінами на основі стандартної дії при цій емоції. Напрямок повороту після навчання вибирався згідно класифікаційних значень, отриманих в процесі навчання з інфрачервоних давачів дальності при успішних поворотах. Основна увага приділялась алгоритму запам'ятовування послідовності дій.

Дана стаття акцентує увагу на використанні класифікаційних значень X , що дозволить описувати багаторівневу схему описану на початку статті.

Агент в кожний момент часу t виконує і модифікує параметри політики π вибору нової дії a_t на основі вхідних даних $\gamma_t(X_t, Y_t)$ і досягнення станів:

$$\pi(\gamma_t) = \pi(X_t, Y_t) \rightarrow a_t \in A,$$

де X_t – значення виходів класифікаторів у момент часу t , Y_t – вектор значень станів у момент часу t .

Тобто вибір наступної дії залежить від класифікаційних значень X_t , отриманих з зовнішніх сенсорів і внутрішніх рецепторів та станів агенту Y_t .

Якщо розглядати виконання даної політики на графовій моделі, то маємо вагові функції ребер $w: E \rightarrow R$ на орієнтованому графі G . Нехай існує вершина v_i і множина ребер E_i^- , що виходять з вершини. Тоді шлях згідно політики π утворюється ітераційно згідно вибору:

$$w(e_i) e_i E_i^- w(e_i) > w_{thres} v_{i+1},$$

де w_{thres} – порогове значення ваги.

Для реалізації даної політики використаємо поняття осередок збудження і введемо поняття відповідності. В якості осередків збудження розглядалися виходи класифікаторів моделі, яким відповідають нейрони детектори кори головного мозку, та елементарні дії, яким відповідають функціонуєчі мотонейрони і м'язи. Між осередками збудження встановлюються зв'язки при близьких часових інтервалах активації на основі моделювання

нейронної пластичності. Відповідності R встановлюються між деякою дугою e_i і значенням x виходу класифікатора і забезпечують виконання ланцюжків рефлексів.

Відповідності можуть реалізовуватись:

1) встановлюватись при початковому налаштуванні агента і можуть активізуватись або у початковий момент часу або у через якийсь час згідно деякої умови;

2) при навчанні агента на деякий час.

На рис. 1 умовно прямокутниками показані зображення, що їх може сприймати агент і виходи класифікатора x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 . Їх відповідності r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 з дугами з вагами w_1, w_2, w_3, w_6, w_7 показані двома напрямками стрілками.

Відповідність R встановлюється до конкретного стану на дузі і підвищує ймовірність вибору дуги для переходу до наступної дії на основі виконання умови:

$$\forall w_j \exists y_i > y_{thres} \mid \exists x_j R y_i \Rightarrow y_i = y_i + \Delta_{thres},$$

де y_{thres} – значення стану при якому починає працювати відповідність,

Δ_{thres} – значення яке додається до стану.

В безумовних рефлексах відповідні значення виходів класифікаторів постійно прив'язані до визначених дуг і забезпечують перехід по цим дугам сумісно з відповідними станами агенту. Основну роль у запуску рефлексів має встановлення рівня деякого стану y_i з комбінації станів Y_{US0} більше деякого порогу. Після цього очікується надходження потрібних значень на виходах класифікаторів X_{US0} для запуску рефлексу. Встановлення такого стану може викликатися внутрішніми і зовнішніми факторами, наприклад виділенням гормонів андрогенів у людей або падінням заряду батареї у агента.

Умовно формування ланцюжку безумовного рефлексу можна показати таким чином:

$$(Y_{US0} \rightarrow X_{US0}) \rightarrow ((X_{US1}, Y_{US1}) \rightarrow a_1, (X_{US2}, Y_{US2}) \rightarrow a_2, \dots, (X_{USn}, Y_{USn}) \rightarrow a_n).$$

При цьому формується шлях з послідовності дій і ваг дуг: $S_{US} = (a_1, w_1, a_2, w_2, \dots, w_{n-1}, a_n)$.

Умовні рефлекси утворюються на основі безумовних або інших умовних рефлексів. В [2] описані такі способи утворення ланцюжків умовних рефлексів у тварин:

- об'єднання в ланцюг екстероцептивних одиначних подразників одиночних рухових реакцій;
- нарощування ланцюга рухів з кінця;
- вклинювання нових рухів і подразників подібним чином, але між останнім ланкою ланцюга і підкріпленням;

– при формуванні ланцюга рухів тварин не обмежують у рухах, але підкріплюють ті ланцюги рухів, які були «правильними».

Початок формування умовних рефлексів задається підвищеними рівнями негативних станів і виконується за рахунок зміни станів та значень класифікаторів по ланцюжку дій у S_{CS} , який утворюється.

Якщо формування йде на основі безумовного рефлексу то заміну значень виходів класифікаторів на нові умовні можна показати так:

$$(X_{CS0}) \rightarrow (X_{US1} \rightarrow X_{CS1}) \rightarrow (X_{US2} \rightarrow X_{CS2}) \rightarrow \dots \rightarrow (X_{USn} \rightarrow X_{CSn}).$$

При формуванні умовного рефлексу процес встановлення відповідності між деякою дугою w і вихідним значенням класифікатора x відбувається при досягненні агентом позитивних станів після виконання послідовності дій по шляху S_{CS} .

При цьому для встановлення відповідності на кожному циклі навчання на змінному виході класифікатора X має виконуватись умова:

$$\forall w_j \in S_{CS} \exists U(X, \varepsilon),$$

де ε – окіл точки X .

Процес встановлення відповідності розповсюджується при навчанні по ланцюжку активованих дій з формуванням значень Δ_{thres} сумісно з коректуванням коефіцієнтів k [17, 18], які відображають вагу кожного стану для дуги.

Умовно виконання ланцюжку сформованого умовного рефлексу можна показати так:

$$(X_{CS0} \rightarrow Y_{CS0}) \rightarrow ((X_{CS1}, Y_{CS2}) \rightarrow a_1, (X_{CS2}, Y_{CS3}) \rightarrow a_2, \dots, (X_{CSn}, Y_{CSn}) \rightarrow a_n)$$

Однак послідовність дій не є повністю автоматичною, якщо значення X_{CS} отримуються з зовнішніх сенсорів. Агент при її виконанні в кожному циклі моделювання повинен очікувати відповідних значень класифікаторів. Назвемо цю послідовність дій напівавтоматичною.

Наступний можливий етап навчання – забезпечення формування автоматичної послідовності. При цьому умовні значення X_{CS} , які отримуються з зовнішнього середовища, замінюються значеннями X_{IS} , які генеруються на основі показників внутрішніх рецепторів агента. У живих організмах приблизно таку функцію при автоматизації дій виконує мозочок.

Якщо для дуг шляху S_{CS} в кожному циклі навчання існують значення X_{CSi} з зовнішніх сенсорів і X_{ISj} з внутрішніх рецепторів, що:

$$\forall w_j \in S_{CS} \exists X_{CSi} \in U(X_{CSi}, \varepsilon_i) \mid \exists X_{ISj} \in U(X_{ISj}, \varepsilon_j) \Rightarrow X_{CSi} \rightarrow X_{ISj}$$

Заміну значень виходів класифікаторів на основі внутрішніх рецепторів можна показати так:

$$(X_{CS1} \rightarrow X_{IS1}) \rightarrow (X_{CS2} \rightarrow X_{IS2}) \rightarrow \dots \rightarrow (X_{CSn} \rightarrow X_{ISn}).$$

А сам сформований умовний рефлекс тепер буде виглядати так:

$$(X_{CS0} \rightarrow Y_{CS0}) \rightarrow ((X_{IS1}, Y_{IS1}) \rightarrow a_1, (X_{IS2}, Y_{IS2}) \rightarrow a_2, \dots, (X_{ISn}, Y_{ISn}) \rightarrow a_n).$$

Після встановлення відповідності значення на виходах класифікаторів X_{CS0} разом з відповідним рівнем стану Y_{CS0} використовується для ідентифікації існування ланцюжка дій і початку виконання послідовності. Перехід підтримується надалі при цільовому завершенню послідовності дій. При нецільовому завершенню агент попадає у стан «невдачі», що дає змогу коректувати даний або шукати інші ланцюжки. Будемо називати пару (X_{CS0}, Y_{CS0}) точкою входу в рефлекс.

При повному виконанні навчання умовному рефлексу при звертанні до нього за допомогою точки входу (X_{CS0}, Y_{CS0}) в комбінації станів Y_{CS0} переважає нормальний стан. При незавершеному навчанні X_{CS0} може відповідати комбінація Y_{CS0} з переважанням негативних станів.

Розглянемо можливий варіант реалізації безумовного орієнтовного рефлексу (рис. 1) і формування на його основі умовного рефлексу.

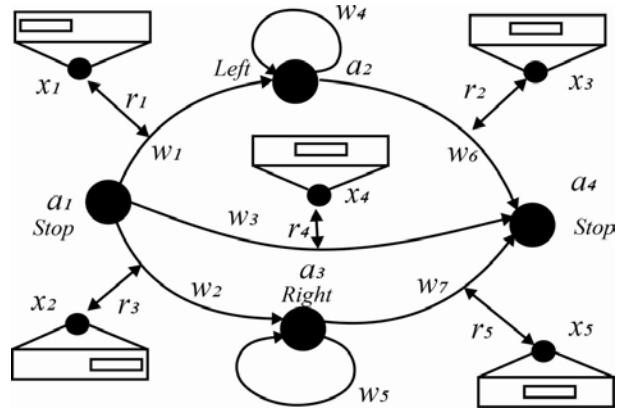


Рис. 1. Граф реалізації безумовного орієнтовного рефлексу

Біологічний орієнтовний рефлекс полягає в тому, що тварина або людина повертається до нового незвичного об'єкта, щоб він опинився у центрі поля зору. Згідно нейрофізіології на однаковий об'єкт даний рефлекс гальмується через 10–15 повторів.

Виконання агентом орієнтовного рефлексу починається з ідентифікації аномалії, незвичного об'єкта в полі зору агента. При цьому зразу збільшується значення стану «здивування», що відповідає генерації осередку збудження у мозку. Спочатку згідно рефлексу виконується так звана стоп-реакція. Після цього новий об'єкт переводиться в центр поля зору агента. Для цього вико-

нуються повороти в необхідну сторону в залежності від поточного положення нового об'єкта і відповідно від класифікаційних значень x_1, x_2 , які стимулюються рівнем поточного стану «здивування». Закінчуються повороти коли об'єкт буде в середині поля зору агенту при відповідному значенні x_3 або x_5 . Далі йде зупинка і генералізований орієнтовний рефлекс закінчується.

Дані дії виконуються за рахунок відповідного початкового налаштування коефіцієнтів k у дугах моделі при відповідному стані агенту і завчасного встановлення відповідності з значеннями X .

Функціонування орієнтовного рефлексу було промодельовано з використанням стандартного робота DR20 з середовища V-REP EDU з відеокамерою, ультразвуковим та інфрачервоними датчиками дальності. Робот має два коліщатка, які керуються за допомогою двигунів (рис. 2).

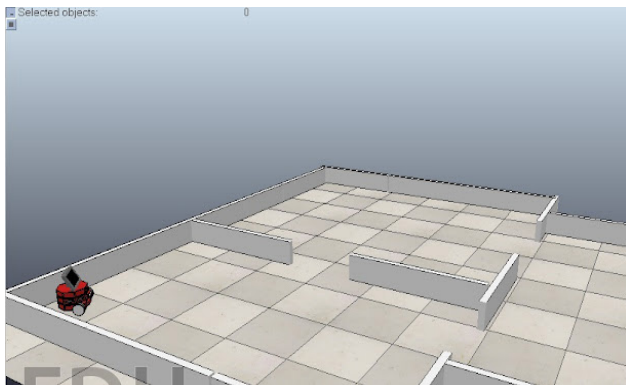


Рис. 2. Вигляд робота DR20 і середовища моделювання рефлексів

Для керування роботом використовується так званий зовнішній скрипт на мові Python, який взаємодіє з роботом через мережевий сокет. При цьому застосовувались бібліотеки OpenCV, Tensorflow, Keras, Sklearn. Програма запускалась на настільному комп'ютері з процесором Ryzen 5 3600, 32 Гб загальної пам'яті, відео Palit 1660 6 Гб пам'яті.

Для реалізації рефлексу робот повинен:

- 1) запам'ятати стандартне середовище;
- 2) ідентифікувати появу нового об'єкта;
- 3) повернутися на нього.

Камерою робота при русі з униканням перешкод отримуємо набір зображень оточуючих стін. На основі зображень формується масив, що характеризує стандартне середовище робота, як виходи замороженої нейронної мережі ResNet-50. Використовуючи бібліотеку Sklearn.cluster на основі отриманого масиву згідно з алгоритму кластеризації DBSCAN формуються кластери, що характеризують стандартне середовище робота.

Коли в стіні з'явиться отвір (новий об'єкт) робот виявляє аномалію за допомогою функції `dbscan_predict`, яка переводить його в емоційний стан «здивування» і він переходить до виконання дій згідно рис. 1. Щоб визначити розташування нового об'єкта та повернутись до нього, робот використовує попередньо навчену згорткову нейронну мережу для трьох положень об'єкта: ліворуч, праворуч і по центру. При повороті в кожному циклі моделювання контролюється момент, коли об'єкт опиниться в центрі поля зору

Розглянемо вироблення складного умовного рефлексу на основі даного безумовного рефлексу, коли робот навчається проїжджати через отвір у стіні.

Вибираємо кількість повторень навчання $n=10$, по кількості необхідній для гальмування орієнтовного рефлексу на однаковий об'єкт. Відправляємо робота переміщатися приблизно під одним кутом до стіни і в його поле зору попадає новий об'єкт (отвір у стіні), який і викликає у нього орієнтовний рефлекс, описаний раніше (рис. 3).

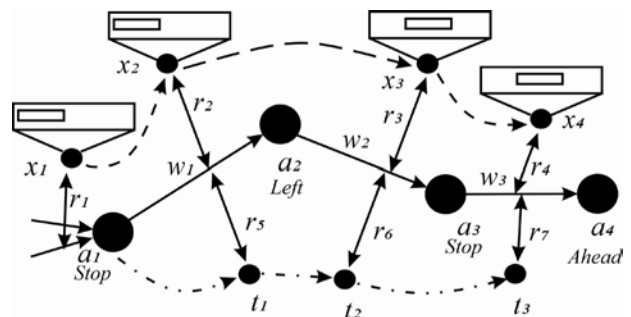


Рис. 3. Граф формування умовного рефлексу на основі безумовного орієнтовного рефлексу

Виконується зупинка a_1 , поворот ліворуч a_2 на отвір, зупинка a_3 і далі генералізований орієнтовний рефлекс переходить в локальний, що стимулює агента рухатись далі прямо a_4 . Після руху прямо робот проїжджає через отвір і переходить в позитивний стан успіху від виникнення нового простору для руху.

По аналогії з біологічним виробленням рефлексу після повторів емоція «здивування» разом з орієнтовним рефлексом на поточне положення отвору гальмується. Запам'ятовується послідовність дій a_1, a_2, a_3, a_4 з оновленням відповідностей дуг w_1, w_2, w_4 поточними значеннями x_2, x_3, x_4 для забезпечення переходів по цим дугам. Також запам'ятовується умова початку виконання рефлексу x_1 .

При цьому аналогічно мозку біологічних істот при близьких інтервалах збудження виходів класифікаторів утворюється додатковий асоціативний шлях x_1, x_2, x_3, x_4 між виходами класифікаторів (нейронами-детекторами) по принципу їх акти-

вації в близькі інтервали часу (сусідніх циклах моделювання).

Робот при виконанні послідовності в кожному циклі моделювання повинен очікувати відповідного положення отвору, наприклад до досягнення його центра поля зору. Класифікатори (зір робота) зайняті виконанням поточної дії. В процесі навчання умовні значення X_{CS} замінюються часовими значеннями X_{IS} , які генерується на основі вимірювання часових інтервалів внутрішнім годинником агента. Тепер через деяку кількість повторів послідовність дій a_1, a_2, a_3, a_4 стає автоматичною і значення x_2, x_3, x_4 не використовуються для виконання рефлексу. При цьому допоміжну роль у його виконанні грає вже ланцюжок t_1, t_2, t_3 .

Демонстрація функціонування даних прикладів наведена за посиланням [20].

Тобто при створенні умовного рефлексу утворюються три паралельних ланцюжки:

a_1, a_2, \dots, a_n – власне сформована послідовність дій;

x_1, x_2, \dots, x_m – ланцюжок виходів класифікаторів зовнішніх сенсорів;

t_1, t_2, \dots, t_k – ланцюжок виходів класифікаторів часових інтервалів.

Між цими ланцюжками в складному умовному рефлексі утворюються відповідності.

Перший ланцюжок утворюється через навчання на основі емоцій, інші два на його основі по принципу асоціації при часовій близькості осередків збудження.

Ланцюжок виходів класифікаторів x_1, x_2, x_3, x_4 деякої сформованої автоматичної послідовності дій може не використовуватись при її виконанні. Що надає можливості по його додатковому використанню для прийняття рішень через вплив на стани.

Взагалі формування умовного рефлексу йде аналогічно мозку людини, де спочатку активна права півкуля мозку з «негативними емоціями», а після формування послідовності йде передача виконання до лівої півкулі людського мозку на основі «позитивних емоцій» [21].

В організмі значенням X відповідають класифікуючим нейронам-детекторам кори головного мозку, вершини і дії a – функціонуючим м'язам, дуги і їх ваги w – синапсам нейронів в зв'язках, які утворюються у процесі навчання у мозку, коефіцієнти k – шляхам поширенню медіаторів в мозку і ступеню їх впливу на синапси.

Даний метод дає можливість формувати дії агенту не тільки на основі мови, як сучасних моделях на основі архітектури Transformer, а функціонувати згідно багаторівневої схеми рефлекторних кілець представленої на початку статті.

Висновки. Таким чином у статті уточнені і розширені можливості методу по формуванню послідовностей дій інтелектуальних агентів на основі біонічної моделі з штучними емоціями. Показано як на їх основі можуть бути виконані безумовні і вироблені ланцюжкові умовні рефлекси. Продемонстровано їх функціонування для моделей роботів в середовищі V-REP. Метод і модель розробляються для багаторівневого планування послідовностей дій у інтелектуальних агентів і надає змогу забезпечити їх функціонування в складному змінному середовищі.

В прикладі статті умовний рефлекс вироблявся при зовнішній постановці агента в ідеальні початкові умови з його формуванням на основі безумовного рефлексу з додаванням в його кінці нової дії. При цьому повністю сформувалась автоматична дія. Відповідно у статі не розглядалось функціонування агента при неповністю сформованому ланцюжку дій, переформатування ланцюжків у випадках невдач та механізми використання агентом сформованих умовних рефлексів. Також для розширення можливостей агента треба або збільшувати обсяг навчання, або ввести абстрактні поняття і деяку спрощену мову. Тоді агент сам зможе формувати і оперувати готовими умовними рефлексами. Ці питання будуть темами наступних досліджень і статей.

Список літератури:

1. Waclaw Petryński Bernstein's construction of movement model and contemporary motor control and motor learning theories Katowice School of Economics, Katowice, Poland Hum Mov, Vol. 2007; 8(2):136-147.
2. Orienting Reflex and Exploratory Behavior L. G. Voronin, A. N. Leontiev, A. R. Luria, E. N. Sokolov, O. S. Vinogradova, Publisher: American Institute of Biological Sciences, Washington, D.C., 1965. 462 p.
3. Knowledge-level analysis of planning systems A Valente ACM SIGART Bulletin, 1995 dl.acm.org.
4. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin Attention is All you Need – 2017. arXiv:1706.03762 [cs.CL].
5. Lili Chen, Kevin Lu, Aravind Rajeswaran, Kimin Lee, Aditya Grover, Michael Laskin, Pieter Abbeel, Aravind Srinivasan, Igor Mordatch Decision Transformer: Reinforcement Learning via Sequence Modeling arXiv:2106.01345 [cs.LG]
6. Michael Janner, Qiyang Li, Sergey Levine Offline Reinforcement Learning as One Big Sequence Modeling Problem 35th Conference on Neural Information Processing Systems (neurips 2021), Sydney, Australia.

7. Devendra Singh Chaplot, Deepak Pathak, Jitendra Malik Differentiable Spatial Planning using Transformers, Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning, PMLR 139, 2021, arXiv:2112.01010 [cs.LG].
8. Jacob J. Johnson, Uday S. Kalra, Ankit Bhatia, Linjun Li, Ahmed H. Qureshi, Michael C. Yip Motion Planning Transformers: A Motion Planning Framework for Mobile Robots arXiv:2106.02791v2 [cs.RO] 13 Nov 2022.
9. Mohit Shridhar, Lucas Manuelli, Dieter Fox CLIPORT: What and Where Pathways for Robotic Manipulation 5th Conference on Robot Learning (CoRL 2021), London, UK. arXiv:2109.12098v1 [cs.RO] 24 Sep 2021.
10. Mohit Shridhar, Lucas Manuelli, Dieter Fox PERCEIVER-ACTOR: A Multi-Task Transformer for Robotic Manipulation 6th Conference on Robot Learning (CoRL 2022), Auckland, New Zealand arXiv:2209.05451v2 [cs.RO] 11 Nov 2022
11. RT-1: Robotics transformer for real-world control at scale arXiv:2212.06817v2 [cs.RO] 11 Aug 2023.
12. RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control arXiv:2307.15818v1 [cs.RO] 28 Jul 2023.
13. Claudia Casellato, Alberto Antonietti, Jesus A. Garrido, Richard R. Carrillo, Niceto R. Luque, Eduardo Ros, Alessandra Pedrocchi, Egidio D'Angelo Adaptive Robotic Control Driven by a Versatile Spiking PLoS One. 2014; 9(11): e112265. Published online 2014 Nov 12.
14. Aditya Mohan, Amy Zhang, Marius Lindauer Structure in Reinforcement Learning: A Survey and Open Problems arXiv:2306.16021v2 [cs.LG] 9 Aug 2023
15. Emotion in reinforcement learning agents and robots : A Survey Thomas M. Moerland, Joost Broekens, Catholijn M. Jonker. arXiv:1705.05172 [cs.LG] Machine Learning 2017.
16. Бойчук В.О., Бойчук М. В., Жук О. О. Біонічна модель поведінки інтелектуальних агентів Наука й економіка Науково-теоретичний журнал Хмельницького економічного університету Випуск 4 (48), Хмельницький, 2018. С. 137–142.
17. Бойчук В., Бойчук А., Бойчук М., Бурдюг О. Метод формування послідовності дій інтелектуальних агентів. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, (66), 2020. С 65–74.
18. Бойчук М. Метод планування послідовності дій на основі навчання з підкріпленням: дипломна робота магістра, ХНУ, -Хмельницький, 2019. 86 с.
19. Ethan S. Bromberg-Martin, Masayuki Matsumoto, Okihide Hikosaka. Dopamine in Motivational Control: Rewarding, Aversive, and Alerting. Neuron. 2010. 68, 815–834.
20. Boychuk Vadym Reinforcement learning robots based on emotions [Електронний ресурс] / Boychuk Vadym // Google Blogger. Режим доступу <https://gorboyx88gmail.blogspot.com>. Назва з екрана. Дата публікації 13.04.2023.
21. Peter F. MacNeilage, Lesley J. Rogers, Giorgio Vallortigara Evolutionary Origins of Your Right and Left Brain August 2009 Scientific American 301(1):60-7.

Boychuk V.O., Boychuk A.A., Boychuk M.V. ON THE FORMATION OF ACTIONS SEQUENCES FOR INTELLIGENT AGENTS

Modern robots and other intelligent agents are exposed to problems with the organization of autonomous existence in real environments. At the same time, the processes of organization and planning of actions, which are originally inherent to both humans and rather simple biological creatures, allow them to survive there. Therefore the paper describes the ideas of psychology and neurophysiology about the organization of formation and planning of actions sequences for humans and animals. The processes of formation and planning of actions sequences are considered on the basis of several levels of reflex rings, which allows flexible formation of actions sequences.

It is shown how this specificity can be implemented on the basis of intelligent planning systems, Transformer language model, deep artificial neural networks, spike neural networks, reinforcement learning, artificial emotion models.

Given the shortcomings of the above technologies on the basis of the bionic approach using a model based on artificial emotions, a method for forming actions sequences for intelligent agents is presented. At each moment of time, the agent executes and modifies the parameters of the new action selection policy based on the output values of the classifiers and the vector of state values.

Using the presented method, the order of chains formation of unconditional reflexes is shown. The stages of formation of conditioned reflexes on the basis of unconditioned reflexes are described. The functioning of orienting unconditional and conditioned reflexes is demonstrated for robot models in the V-REP environment.

The method is developed on the basis of analogies with the brain functioning for flexible multi-level formation of actions sequences for intelligent agents and will provide an opportunity to ensure their functioning in a complex changing environment.

Key words: artificial intelligence, neural networks, intelligent agent, planning, artificial emotion, reinforcement learning, reflex.

УДК 662.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>**Брунеткін В.О.**

Національний університет «Одеська політехніка»

Давидов В.О.

Національний університет «Одеська політехніка»

Тельніс Р.Ф.

Національний університет «Одеська політехніка»

Жанько К.О.

Національний університет «Одеська політехніка»

МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТИ З ДИМОВИМИ ГАЗАМИ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ЇХ КІЛЬКІСТЮ ПРИ ЗМІННОМУ НАВАНТАЖЕННІ КОТЛА

Розглянуто способи, що дозволяють збільшити ефективність роботи та зменшити викиди парникової частини вуглекислого газу котлами, які використовують як паливо природний газ. Актуальність такого дослідження обумовлена плануванням промислово розвинених країн тривалий час використати цей вид викопного палива. Такий намір підтверджується включенням Європейської комісією природного газу до «Зеленої таксономії ЄС» та укладання провідними європейськими компаніями тривалих договорів на постачання зрідженого газу. Відповідно до договорів газ постачатиметься і після 2050 року.

Максимальної економії можна досягти за рахунок зниження втрат з димовими газами, особливо при максимальних навантаженнях. Запропоновано метод збереження обсягу димових газів близьким до постійного при різному навантаженні казана за рахунок використання суміші горючих газів змінного складу. Така реалізація процесу може дозволити зберігати на рівні близькому до постійної температури димових газів і, відповідно, зменшити супутні втрати.

Висунуте припущення підтверджено результатами перевірочних теплових розрахунків котла КВ-ГМ-4.65 для різного навантаження. Розрахунки виконані на основі нормативного методу на прикладі суміші метану та доменного газу змінного складу.

Для вибору допоміжного газу, що дозволяє в суміші з метаном реалізувати такий сценарій, запропоновано використовувати параметр ω , що визначає обсяг димових газів на одиницю його теплотворної здатності. Вибір газу здійснюється шляхом порівняння цього параметра з відповідною величиною метану.

Запропоновано застосування газогенераторного газу як допоміжного як найбільш раціональний. На прикладі результатів розрахунку складу продуктів газифікації відходів деревини сосни показано можливість регулювання їх складу та теплотворної здатності. Як фактори, що впливають на склад продуктів газифікації, розглянуті коефіцієнт надлишку окислювача, вологість деревини, частка рекуперативної енергії у формі тепла від газів, що утворилися в зону реакції. Кількість окислювача вибиралося з урахуванням повної газифікації вихідної сировини.

Ключові слова: зменшення втрат, об'єм димових газів, керування температурою димових газів, допоміжні гази.

Постановка проблеми. Економічно розвинені країни відповідно до Паризької угоди [1] декларують прагнення до 2050 скоротити до нуля всі сукупні викиди CO₂ як одного з парникових газів, що не відносяться до харчової індустрії. Але практика експлуатації промислових об'єктів свідчить про малоймовірність досягнення такої мети. На тлі цього Європейською комісією прийнято рішення про включення одного з видів викопного палива – природного газу (NG) – до «Зеленої таксономії ЄС» [2]. Як наслідок, будь-який вид діяль-

ності з використанням NG класифікуватиметься як екологічно стійкий, незважаючи на проблеми з викидами вуглекислого газу, що утворюються при його спалюванні.

Планування тривалого використання газоподібного палива (після 2050 року) підтверджується і укладанням довгострокових контрактів на постачання зрідженого газу провідними європейськими фірмами. Так Shell (Нідерланди – Англія) та TotalEnergies (Франція) підписали контракти з Катаром на щорічне отримання спільно

7 млн. тонн зрідженого газу на протязі 27 років, починаючи з 2026 року [3].

Наведені факти свідчать про неминучість протягом тривалого часу використання газу в промисловості та енергетиці. Але відповідно до Паризької угоди [1] не втрачає актуальності завдання зменшення викидів парникової частки CO_2 .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із основних напрямків у зниженні викидів CO_2 є розвиток відновлюваних джерел енергії. Країни Євросоюзу прагнуть активно сприяти переходу до стійких джерел енергії. Однак незважаючи на значне зростання їх встановленої потужності, деякі з країн стикаються з імпортом електроенергії, що збільшується. Зокрема, 2022 року в Німеччині частка електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, досягла 48,4%. Тим не менш, країна, яка раніше була експортером електроенергії, тепер стала її нетто імпортером [4]. Цей факт можна трактувати як сигнал можливого дефіциту потужності для управління потоками (диспетчеризації) електроенергії всередині Євросоюзу, незважаючи на значну встановлену потужність у галузі електрогенерації із відновлюваних джерел. Обладнання, що використовує газоподібне паливо, є одним з пріоритетних у забезпеченні диспетчеризації енергопотоків. Оптимізація параметрів процесів, що протікають у такому обладнанні, може зменшити викиди парникової частини CO_2 за рахунок економії викопного газу.

Основна частина втрат під час роботи котлів посідає димові гази. Зниження їхньої температури потенційно може дати максимальний приріст коефіцієнта корисної дії (ККД) і, відповідно, зниження викидів CO_2 . На даний момент конструкція котельного обладнання має високий ступінь досконалості і не дозволяє суттєво збільшити ККД без зміни характеру процесів, що протікають.

Використання конденсаційних котлів є одним з перспективних напрямків. Ефективність цієї технології може бути додатково підвищена шляхом введення в горючі гази водню. Цей підхід з одного боку знижує частку вуглецевих газів у вихідному паливі, що призводить до зменшення викидів CO_2 . З іншого боку, збільшується вміст вологи в димових газах, що сприятливо впливає на ККД системи. Однак у [5] зазначено, що додавання безпечної кількості водню (20%) може зменшити ККД котла на 4.7%. Це зменшує перевагу використання конденсаційної технології.

Більшість конденсаційних котлів встановлюються у приватних будинках та невеликих

котельнях. Це пояснюється складністю утилізації конденсату для котлів великої потужності та додатковими витратами на його нейтралізацію. У [6] наголошується економія палива до 17,5% при використанні конденсаційних котлів у реальних умовах експлуатації. Тим не менш, вказується, що перехід від традиційного котла до конденсаційного може бути економічно непривабливим, оскільки термін окупності близький до середнього терміну служби котла або навіть перевищує його.

Промислове енергообладнання середньої та великої потужності, що використовує газоподібне паливо, в основному функціонує у безконденсатному режимі. Зміна навантаження газового котла призводить до зміни температури відпрацьованих газів. Необхідність зміни потужності котла в діапазоні від 40% до 100% може спричинити зміну температури відпрацьованих газів в межах від $\sim 393 \text{ K}$ до 473 K (120°C – 200°C) [7]. Максимальне навантаження відповідає максимальній температурі та максимальним втратам. Мінімальна температура визначена необхідністю підтримання безконденсатного режиму у процесі видалення димових газів. Теоретично в безконденсатному режимі можна досягти підвищення ККД до 4%, знижуючи максимальну температуру димових газів до допустимо низького значення. Проте відомі конструкції енергетичного устаткування неможливо реалізувати такий підхід.

Слід враховувати, що спалювання не всіх горючих газів дають викиди CO_2 , що відноситься до парникових. До таких газів можна віднести вторинні гази, що виробляються або утилізуються. Наприклад, піролізні, газогенераторні гази, одержувані під час переробки сільськогосподарських або деревних відходів, доменний (BFG), коксовий (COG) гази. При використанні BFG і COG викиди CO_2 вважаються частиною основного технологічного процесу, наприклад виробництва коксу або виплавки чавуну, і вже враховані в розрахунках. Таким чином, заміна природного газу (NG) на вторинні гази, що виробляються або утилізуються, в технологічних процесах призводить до зменшення використання NG, що еквівалентно зниження викидів CO_2 в атмосферу як парникового газу. Слід зазначити, що сільськогосподарські та деревні відходи, що використовуються для одержання піролізних та генераторних газів, вважаються відновлюваними джерелами. При спалюванні таких газів викиди CO_2 також не належать до парникових. Зменшення кількості використовуваного NG за рахунок заміни в технологічних

процесах його частини або всього на вторинні гази, що виробляються або утилізуються, є ще одним напрямом зниження парникового ефекту від викидів CO₂.

У проведеному [8] дослідженні здійснювалися теплотехнічні вимірювання з метою виявлення поправочних коефіцієнтів. Ці коефіцієнти були потрібні для корекції результатів розрахунків, заснованих на математичній моделі, з урахуванням параметрів, що характеризують роботу парового котла в робочому стані. В ході дослідження в якості палива використовувалася суміш природного (NG) і доменного (BFG) газу при їх різному співвідношенні. Експерименти було спрямовано на визначення впливу складу паливної суміші на характеристики парового котла. Отримані результати були систематизовані та представлені у таблиці 1, де відображені значущі параметри, отримані у процесі дослідження.

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта надлишку повітря за димососом і температури від-хідних газів від навантаження і теплової частки доменного газу [8, табл. 2]

Навантаження котла, т/год	Теплова частка BFG	Коеф. надлишку повітря за димососом	Температура відхідних газів, °C
40	0.755	2.07	174
40	0.491	1.89	161
40	0.198	1.67	148
50	0.710	2.12	178
50	0.647	1.98	176
50	0.327	1.80	148
60	0.644	1.89	185
59	0.599	1.87	181
60	0.389	1.66	157

Зіставлення даних, представлених у виділених рядках, виявило особливість: при однаковому навантаженні збільшення частки менш калорійного газу в паливній суміші та надлишку повітря (баласту) веде не до зниження, а до збільшення температури димових газів, що не було пояснено в роботі.

Проведений аналіз свідчить про вплив обсягу продуктів згоряння на температуру димових газів і, отже, на ККД устаткування.

При постійному навантаженні можливий вплив на кількість продуктів згоряння через заміну NG сумішшю з менш калорійними вторинними газами. Це може дозволити знизити вміст парникової частини CO₂ у димових газах та одно-

часно регулювати склад суміші для контрольованого впливу на кількість продуктів згоряння, температуру димових газів та ККД обладнання.

Метою дослідження є розробка методу управління обсягом продуктів згоряння за умов зміни навантажень котельного устаткування. Досягнення мети може дозволити керувати температурою димових газів і ККД котла.

Для досягнення мети поставлено завдання:

- визначення процесу, що дозволяє впливати на температуру димових газів при заданому навантаженні обладнання;

- визначення параметра, що дозволяє класифікувати допоміжні горючі гази наскільки можна здійснювати різні сценарії управління обсягом продуктів згоряння;

- розрахунок параметрів димових газів при заданому сценарії керування їх обсягом.

Виклад основного матеріалу. У традиційних газових котлах, оснащених стандартним обладнанням і працюючих на паливі постійного складу, регулювання потужності здійснюється шляхом зміни обсягу газо-повітряної суміші, що надходить. Цей метод управління призводить до безпосередньої залежності температури димових газів і, отже, ККД котла, від поточної потужності, що виробляється. Зменшення потужності супроводжується зменшенням обсягу продуктів згоряння, зниженням їх швидкості в газовому тракті та збільшенням часу взаємодії з поверхнями теплообміну. Це призводить до зниження температури відпрацьованих газів і, отже, підвищення ефективності використання котла. Максимальне вироблення потужності відповідає мінімальному ККД системи.

Різниця в температурі димових газів у всьому діапазоні регулювання потужності котла веде до збільшення втрат на максимальному навантаженні при максимальній витраті газу. Але величина цієї різниці може бути зменшена і за збереження діапазону регулювання шляхом зменшення нахилу графіків зміни температури димових газів і, відповідно, ККД. З цією метою, наприклад, при зменшенні потужності може бути збережений об'єм продуктів згоряння, що відповідає максимальній потужності. Збільшення температури димових газів і зменшення ККД може бути парировано шляхом збільшення площі хвостових теплообмінних поверхонь і, тим самим, зменшення температури димових газів у всьому діапазоні зміни навантаження котла.

Збереження обсягу продуктів згоряння у міру зменшення навантаження може бути забезпечене

шляхом заміни частини основного пального газу альтернативним меншою теплотворною здатністю. При цьому цей газ повинен мати специфічні властивості – давати більше продуктів згоряння на одиницю теплотворної здатності ніж основний.

Метод вибору альтернативного газу. Розглянемо в якості основного горючого газу (NG), припускаючи, що він складається тільки з метану. Як альтернативні гази розглядаються BFG, COG, газоподібні компоненти, одержувані при піролізі деревини, а також продукти газифікації деревних відходів при подачі для газифікації повітря. Середній склад таких газів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Склад (об’ємні частки) та характеристики горючих газів

Склад, характеристики	NG	COG [9]	BFG [9]	піроліз	газогенерація
$C H_4$	1	0.267	–	0.18	–
C_2H_4	–	0.026	–	–	–
H_2	–	0.571	0.036	0.02	0.134
CO	–	0.029	0.254	0.3	0.246
H_2O	–	–	–	–	0.085
CO_2	–	0.042	0.195	0.5	0.058
N_2	–	0.065	0.515	–	0.476
$Q_{н}, \frac{МДж}{(Мгг)^3}$	35.8	17.7	3.4	15	4.57
$V_{дг}, \frac{(Мдг)^3}{(Мгг)^3}$	10.52	5.04	1.51	3.31	1.71
$\omega, \frac{(Мдг)^3}{МДж}$	0.294	0.285	0.444	0.221	0.375

Ці гази мають нижчу теплотворну здатність порівняно з природним газом. Визначимо характер їхнього впливу обсяг димових газів при змішуванні з NG. Для цього введемо і визначимо для кожного з цих газів величину ω . Вона дорівнює відношенню обсягу димових газів, що утворюються при спалюванні 1 м^3 відповідного газу для його теплотворної здатності. Величина відповідає обсягу димових газів, що припадає на одиницю теплотворної здатності. Відповідні величини наведено у таблиці 2.

У табл. 2 $Q_{н}$ – нижча теплотворна здатність, віднесена до 1 м^3 горючих газів; $V_{дг}$ – обсяг димових газів, що утворюється при спалюванні 1 м^3 відповідного пального газу; ω – обсяг димових газів, що відповідає 1 МДж нижчої теплотворної здатності відповідного пального газу. Як окислювач розглядалося повітря, що складається тільки

з кисню та азоту з об’ємним співвідношенням $N_2/O_2 = 0.79/0.21 = 3.76$ при коефіцієнті надлишку окислювача $\alpha=1$ (демонстраційний варіант).

Порівняння отриманих значень величин для альтернативних газів з відповідною величиною для NG дозволяє зробити висновок про можливість організації різних сценаріїв зміни обсягу димових газів. Так при зміні навантаження використання суміші змінного співвідношення NG з $\omega=0.294$ і BFG або генераторного газу з величиною ω більшою, ніж у NG дозволить зберігати обсяг димових газів близьким до постійного. Використання суміші з NG піролізного газу іди COG, що мають меншу ніж у NG величину ω , призведе до зменшення обсягу димових газів при порівнянних навантаженнях.

Приклад результатів розрахунку. Як приклад розглянемо результати реалізації сценарію утримання об’єму димових газів близьким до постійного зменшення навантаження котла. Дані отримані в результаті повіркового теплового розрахунку на основі нормативного методу котла KB-ГМ-4.65. Для розрахунку використовувалися дані, відповідні суміші змінного складу NG та BFG. Об’єм димових газів утримувався на рівні, що відповідає максимальному при спалюванні лише NG (максимальне навантаження). Розрахунки виконані з незначними винятками, які впливають загальний характер зміни визначених параметрів. Розглянуто випадок коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_v=1,1$.

Таблиця 3

Склад суміші NG + BFG для різного навантаження котла при $\alpha=1,1$

Частка навантаження, Q/Q_{max}	Об’єм суміші горючих газів, м^3	% метану в суміші	$T_a, \text{К}$	Об’єм димових газів
1	1	100	2182	11,47
0,95	1,9	44,7	2083	11,44
0,9	2,79	25,1	1991	11,41
0,85	3,69	14,9	1894	11,38
0,8	4,58	8,7	1796	11,35
0,75	5,48	4,6	1700	11,32
0,71	6,08	2,5	1636	11,30
0,66	6,97	0	1543	11,26
0,6	6,32	0	1543	10,21
0,5	5,26	0	1543	8,51
0,4	4,21	0	1543	6,81

Адіабатна температура горіння для прийнятих умов при використанні NG визначена як $T_a=2182 \text{ К}$.

При різному, відповідно до зміни навантаження, співвідношенні NG і BFG величина T_a буде різною. Величина T_a визначалася з використанням хімічних ентальпій утворення газів продуктів згоряння на основі теплотворних здібностей відповідних горючих газів та складу їх суміші. У таблиці 3 для різного навантаження котла наведено склад суміші NG + BFG, адиабатні температури горіння цієї суміші і обсяг димових газів, що утворилися. Величини наведені для умов, що відповідають використанню лише NG. Максимальний обсяг димових газів наводиться для нормальних умов спалювання 1 м^3 NG. Максимальна потужність забезпечується використанням лише NG. Обсяг димових газів, близький до постійного, може бути забезпечений тільки до навантаження 0,66 від максимального. У цей момент до складу палива входить тільки BFG. Результати розрахунків ККД та температури димових газів наведено на рис. 1 та рис. 2. Порівняння результатів показують, що використання суміші газів змінного складу призводить до трансформації графіків зміни ККД та температури димових газів. Така особливість проявляється у діапазоні зміни навантаження $Q/Q_{\max} \in [0,6..1]$ під час використання суміші газів регульованого складу. Зменшення ККД за більш високої, але стабільної температури димових газів не слід вважати негативним фактором. Характер їх зміни дозволяє збільшити площу теплообмінних поверхонь (економайзер) без ризику конденсації за низького навантаження.

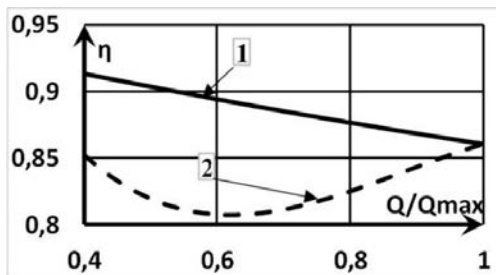


Рис. 1. Зміна ККД при зміні навантаження котла: 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

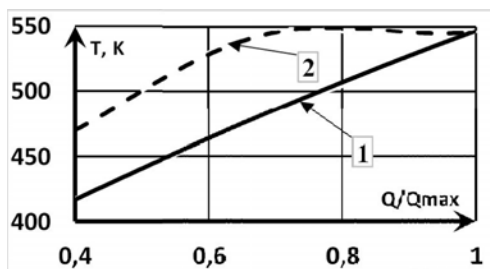


Рис. 2. Зміна температури димових газів при зміні навантаження котла: 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

Подальше зменшення навантаження може відбуватися за рахунок зменшення кількості BFG (метан відсутній). Характер зміни величини ККД та температури димових газів стає відповідним використанню газу постійного складу. Знижена при малих навантаженнях величина ККД при використанні BFG (навіть після збільшення площі теплообмінних поверхонь) також не може вважатися критичним фактором. У цьому пункті мінімальне виділення енергії під час використання допоміжного газу. Отже, й втрати мінімальні. Підвищення ККД відбувається при максимальному навантаженні і при використанні великої кількості викопного газу NG. Отже, у цьому випадку відбувається максимальна його економія та максимальне зменшення парникової частини CO_2 .

Одним з факторів, що ускладнюють реалізацію такої схеми роботи котла є кратне збільшення обсягів суміші газів, що використовується. Встановлені на існуючих котлах пальники не мають необхідної пропускної спроможності. Необхідна установка спеціально розроблених додаткових пальникових пристроїв.

Обговорення результатів розрахунків. Наведені результати розрахунків підтверджують можливість керування кількістю димових газів та, відповідно, їх температурою. Але використання з цією метою газів BFG, COG не є раціональним. Їхня кількість визначається власним технологічним процесом. Крім того, вони не є загальнодоступними.

Піролізні гази можуть бути отримані в будь-якому місці, але можуть виникнути складності з їх використанням. Для забезпечення процесу піролізу необхідне зовнішнє джерело нагрівання. Вихід газоподібної складової мінімальний. Величина ω (табл. 2) мала порівняно з такою самою величиною для NG, що виключає його використання у сценарії утримання об'єму димових газів на рівні, близькому до постійного при зміні навантаження.

Газогенераторні установки в цьому випадку є найбільш прийнятними для вироблення вторинного газу. Вони, як і піролізні, можуть бути встановлені будь-де. Процес термодеструкції в такій установці не вимагає зовнішнього джерела теплової енергії, будучи автотермічним. В результаті такого процесу утворюється газ меншої калорійності, ніж при піролізі. Але газифікації, на відміну від піролізу, може бути піддано всю вуглецевмісну сировину. Це в разі збільшує обсяг одержуваного газу. Враховуючи зниження вартості отримання технічного кисню, замість повітряного дуття може використовуватися повітряне збагачене киснем або навіть кисневе [10–11] показана ефективність

Таблиця 4

Параметри газогенераторного газу				
Параметри	$\varphi=0; \alpha=0,4$		$\varphi=0,4; \alpha=0,5$	
	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$
CO	0,454	0,469	0,162	0,175
CO ₂	0,129	0,115	0,223	0,212
H ₂	0,273	0,262	0,236	0,228
H ₂ O	0,145	0,154	0,379	0,385
$Q_{н}, \frac{МДж}{м^3}$	8,67	8,76	4,60	4,67
ω	0,293	0,291	0,401	0,397
T _p , K (°C)	329 (56)	329 (56)	345 (72)	345 (72)

Таблиця 5

Параметри газогенераторного газу після його осушення		
Параметри	$\varphi=0,4; \alpha=0,5$	
	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$
CO	0,255	0,278
CO ₂	0,351	0,337
H ₂	0,371	0,362
H ₂ O	0,023	0,023
$Q_{н}, \frac{МДж}{м^3}$	7,23	7,42
ω	0,322	0,317
T _p , K (°C)	330 (57)	329 (56)

такого підходу з точки зору підвищення енергетичної цінності одержуваного генераторного газу. Крім того, характеристики і, відповідно, величина генераторного газу можуть змінюватися (регулюватися) за рахунок рекуперації частини його теплової енергії в зону реакції та вологості вихідної сировини. Для демонстрації такої можливості таблиці 4 наведені дані, отримані на основі розрахунків [12] для деревини сосни. Склад газогенераторного газу наведено в об'ємних частках. Прийнято:

- брутто-формула деревини в абсолютно сухому стані $CH_{1,42}O_{0,62}$ з молярною масою $\mu_c=0.0233$ кг/моль та ентальпією утворення $I_0=-152.1$ кДж/моль;

- ΔI – енергія у формі тепла, що повертається за рахунок рекуперації у зону реакції;

- $\alpha_{газ}$ – коефіцієнт надлишку окислювача при дутті у вигляді чистого кисню;

- φ – вологість деревини.

Величини ω і T_p (точка роси) визначені для димових газів, що утворюються з газогенераторного газу відповідного складу при спалюванні його в повітрі з коефіцієнтом надлишку $\alpha_{нов}=1,1$.

З отриманих результатів випливає можливість використання газогенераторного газу, отриманого із сухої деревини без попередньої підготовки. Для цих газів величина і T_p близькі відповідним показниками NG (табл. 2).

У газогенераторних газах із вологої деревини перед їх використанням необхідно зменшувати вміст пари води. Так при їх охолодженні, наприклад, до температури 293 К (20°C) співвідношення складових компонентів, теплотворна здатність і параметри димових газів істотно змінюються (таблиця 5). Після осушення вихідних горючих газів значення вказує на можливість їх використання в суміші з NG для збереження об'єму димових газів близьким до постійного при зміні навантаження котла. У цьому точка

роси димових газів близька до точки роси продуктів згоряння NG.

Висновки. В результаті досліджень отримано такі результати:

Було зроблено припущення про вплив на температуру димових газів в основному їх кількості та, як наслідок, часу зіткнення з теплообмінними поверхнями. Для перевірки цього припущення на прикладі котла КВ-ГМ-4.65 виконаний на основі нормативного методу перевірочний тепловий розрахунок при різному навантаженні. Постійність обсягу димових газів забезпечувалося застосуванням суміші NG та BFG змінного складу. Результатами розрахунку підтверджено збереження температури димових газів, близьких до постійної в широкому діапазоні зміни навантаження навіть при суттєвому зменшенні адіабатної температури горіння. Такий ефект дозволяє наростити площу теплообмінних поверхонь та збільшити ККД котла на максимальному навантаженні без небезпеки конденсації парів води на мінімальному навантаженні.

Запропоновано параметр ω , який визначає здатність різних горючих газів до утворення певного обсягу димових газів на одиницю теплотворної здатності. Такий параметр дозволяє вибирати допоміжні гази, здатні в суміші з NG забезпечувати температуру димових газів, близьких до постійної в широкому діапазоні зміни навантаження. За величиною цього параметра гази можуть бути ранжовані за ступенем переваги використання паливної суміші.

На прикладі газогенераторного газу показано можливість керувати величиною ω змінюючи параметри процесу газифікації. Це може дозволити збільшити гнучкість керування температурою відпрацьованих газів при зміні навантаження котла.

Список літератури:

1. The Paris Agreement. Climate Action. *United Nations*. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement#>
2. Taxonomy: MEPs do not object to inclusion of gas and nuclear activities. *European Parliament website. Press room*. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220701IPR34365/taxonomy-meps-do-not-object-to-inclusion-of-gas-and-nuclear-activities>
3. Qatar supplies gas to Europe, vying with US to replace Russia supply. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/qatarenergy-shell-agree-27-year-lng-supply-2023-10-18/>
4. Deutschland importiert immer mehr Strom. 06.09.2023. URL: <https://www.dw.com/de/deutschland-importiert-immer-mehr-strom/a-66735523>
5. Vries H., Levinsky H.. Flashback, burning velocities and hydrogen admixture: Domestic appliance approval, gas regulation and appliance development. *Applied Energy*. 2019. Vol. 259, 114116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114116>
6. Bălănescu D., Homutescu V.. Experimental investigation on performance of a condensing boiler and economic evaluation in real operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 143, p. 48–58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.082>
7. Taler, J., Trojan, M., Dzierwa, P., Kaczmarski, K., Węglowski, B., Taler, D., Jaremkiewicz, M. . The flexible boiler operation in a wide range of load changes with considering the strength and environmental restrictions. *Energy*. 2023. Vol. 263, part B, 125745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125745>
8. Bezhan, V., Zhitarenko, V. . Modeling and Analysis of Energy Efficiency Parameters of Medium Pressure Boilers Using a Mixture of Natural and Blast Furnace Gases Taking into Account Air Intakes. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2020. № 2, p. 32–39. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.05>
9. Soroka, B., Horupa, V.. Analysis of the process of water vapor condensation within gas atmospheres and combustion products. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2017. (1), p. 3-18. URL: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2017.01>
10. N. Cerone, F. Zimbardi, A. Villone, N. Strjugas, E. G. Kiyicki. Gasification of Wood and Torrefied Wood with Air, Oxygen, and Steam in a Fixed-Bed Pilot Plant. *Energy & Fuels*. 2016. 30, p. 4034–4043. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00126>
11. F. Weiland, H. Hedman, M. Marklund, H. Wiinikka, O. Öhrman, R. Gebart. Pressurized Oxygen Blown Entrained-Flow Gasification of Wood Powder. *Energy & Fuels*. 2013. 27 (2), p. 932–941. URL: <https://doi.org/10.1021/ef301803s>
12. В.О. Брунеткін, В.О. Давидов, О.С. Тарахтій. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі. *Вісник ХНТУ, Інженерні науки*. 2023. № 2(85), с. 9–19. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

Brunetkin V.O., Davydov V.O., Telpis R.F., Zhanko K.O. METHOD OF MINIMIZING LOSSES WITH FLUE GASES BY CONTROLLING THEIR QUANTITY AT VARIABLE BOILER LOAD

The methods allowing to increase the efficiency of operation and reduce emissions of greenhouse part of carbon dioxide by boilers using natural gas as fuel are considered. The relevance of such a study is due to the planning of industrialized countries to use this type of fossil fuel for a long time. This intention is confirmed by the inclusion of natural gas in the EU Green Taxonomy by the European Commission and the conclusion of long-term contracts for the supply of liquefied natural gas by leading European companies. Under the contracts, gas will continue to be supplied beyond 2050.

Maximum savings can be achieved by reducing losses with flue gases, especially at maximum loads. A method of keeping the flue gas volume close to constant at different boiler loads by using a mixture of combustible gases of variable composition is proposed. Such realization of the process may allow to keep the flue gas temperature close to constant and, accordingly, reduce the associated losses.

The put forward assumption is confirmed by the results of verification thermal calculations of the boiler KV-GM-4.65 for different load. The calculations were performed on the basis of the normative method on the example of a mixture of methane and blast furnace gas of variable composition.

To select an auxiliary gas, allowing in a mixture with methane to realize such a scenario, it is proposed to use the parameter ω , determining the volume of flue gases per unit of its calorific value. The choice of gas is made by comparing this parameter with the corresponding value of methane.

The use of gas-generator gas as an auxiliary gas as the most rational is suggested. On the example of the results of calculation of the composition of gasification products of pine wood waste gasification the possibility of regulation of their composition and calorific value is shown. As factors influencing the composition of gasification products, the oxidizer excess coefficient, wood humidity, the share of energy recovery in the form of heat from the formed gases in the reaction zone are considered. The amount of oxidizer was chosen taking into account complete gasification of feedstock.

Key words: loss reduction, flue gas volume, flue gas temperature control, auxiliary gases.

Hrabovskyi Ye.M.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Bondarenko D.O.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Ushakova I.O.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

USAGE OF ADAPTIVE DESIGN TECHNOLOGIES FOR THE DESIGNING OF A WEB APPLICATION FOR ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS

The article proposes a practical implementation of the adaptive layout technology for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels, within the framework of which the web application design was developed. The practical result of this research is the adaptive layout of a web application for analyzing the efficiency of solar panels. The article presents the concept of adaptive web design in accordance with the issues of web application development. The purpose of this article is to improve the mechanisms of application of adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels. The object of the study is the process of applying adaptive layout technologies to the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels. The subject of the research is adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels. A web application theme diagram was developed to analyze the performance of solar panels according to the site structure, dynamic page requirements and the required Word-Press theme structure. The article provides the database schema of a WordPress web application for solar panel performance analysis. The architecture of a software complex of a web application for analyzing the efficiency of solar panels is proposed. Special attention is paid to the organization of the logic of the architecture of the software complex by the layers of the web application for the analysis of the efficiency of solar panels. Guidelines are provided to guide the design process of each layer of data access. Here are the WordPress files that are required for the correct functioning of the theme and the web application for which this theme is activated. The developed design of the web application for analyzing the efficiency of solar panels is original and has no similar analogues on the Internet, as a result of which a custom WordPress theme was developed for the relationship. The originality of the study consists in determining the main parameters of adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels. The practical value lies in the development of adaptive layout techniques for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

Key words: responsive layout, solar panels, data access, methodology, performance analysis, WordPress.

Formulation of the problem. The increase in the number of used solar panels and the increase in the number of regions in which they are operated has significantly increased the share of electricity generated by them in the total amount of electricity generation. In order to further increase the amount of electricity generated by solar panels, it is necessary not only to introduce new solar stations, but also to improve their operational characteristics and increase the efficiency of their work.

There are different classes of solar panels. The most common are fixed solar panels, which, once installed, spend their entire service life in one place and in an unchanged position. Another class can be

called movable or mobile solar panels. Mobile solar panels are part of mobile power plants. Mobile power plants change their geographical location during their service life and are adapted for repeated installation and dismantling (rolling/unrolling). They are used by rescuers, geological exploration expeditions, gold prospectors, military, mobile work groups and all those who need electricity, but perform their functions in isolation from centralized power lines and autonomous power supply centers.

The implementation of solar energy supply systems requires the consideration of a set of additional factors that should be taken into account in the process of choosing rational industrial sites for the placement of

photovoltaic and solar energy stations. In this sense, as a set of additional factors, we are talking about the economic, ecological, and social features of each of the regions of Ukraine.

Therefore, an urgent task today is the development of a web application that uses data from weather stations and allows analyzing the results of the use of solar panels and solar systems in the regions of Ukraine.

Modern web applications have become quite functional, contain a large amount of high-quality multimedia content (resolution, colors, clear sound) and many interactive elements. Therefore, as part of this thesis, adaptive layout technologies are used for the developed web application in order to better present the application on different devices.

The user of the web application can be any person interested in alternative energy sources who may not know the specific climatic details of their region. Thanks to the adaptive layout, it is possible to choose an arbitrary point on the map of Ukraine and calculate, based on weather data, which equipment would be appropriate to obtain the required power.

Analysis of recent research and publications. Research on the flexible development of requirements for web applications is given in scientific papers [1–3]. Adaptive algorithms, based on which web applications are developed for analyzing the efficiency of solar panels, are presented in works [4, 5]. In the studies [6, 7], recommendations are given regarding adaptive layout for creating a web application interface in real time for navigation in a virtual environment. Scientific works [8, 9] contain methodological recommendations for substantiating an innovative strategy for the development of information technologies as a basis for designing web applications for analyzing the efficiency of solar panels. Practical recommendations regarding the use of Workflow to optimize the operation of web applications are given in studies [10, 11].

The analysis of literary sources shows that there are no methodological recommendations in the specialized literature regarding the use of adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

Purpose and task statement. The purpose of this work is to improve the mechanisms of application of adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

The object of the study is the process of applying adaptive layout technologies to the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

The subject of the research is adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

Presentation of the main research material.

Responsive layout is a common web design that can adapt to any screen resolution, including for mobile to make it convenient for the user to browse the pages of the resource. A solution to the problem is to create a mobile version of the site.

Work on creating an adaptive web design begins with a check on Google services. Usually, the service issues a list of improvements that need to be completed to switch to the mobile version. With adaptive layout on WordPress, changes are made to css files, and a meta tag with the viewport attribute is written inside header.php in the head part, which allows you to adjust the content of the interface to the screen size.

Responsive web design is an approach to web design in which site elements are adjusted according to screen and browser sizes to increase readability, provide user experience and reducing page loading times.

According to the structure of the site, the requirements for dynamic pages and the required structure of the Word-Press theme, a theme scheme was developed for the solar panel performance analysis web application. The scheme of the developed topic is presented in fig. 9.

In the scheme, each section of the site – header, footer, styles, content and additional functionality – corresponds to separate files. The content corresponds to several files, because this section includes the main page, internal dynamic pages, a template of static, fillable CMS pages and pages with a separate entry (Fig. 1).

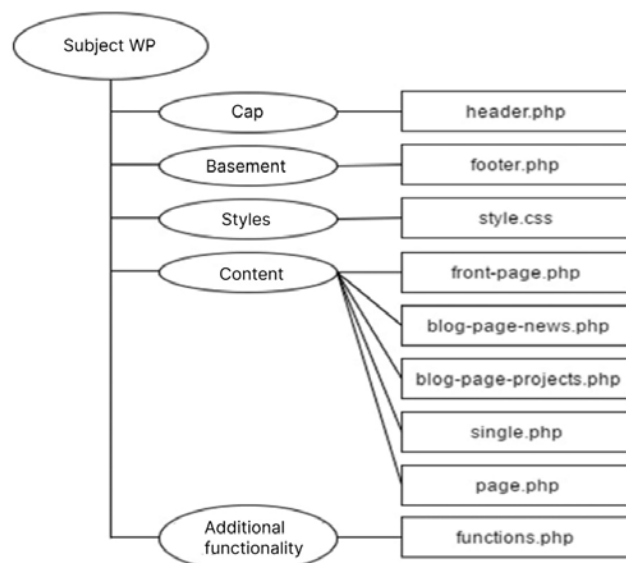


Fig. 1. Theme structure of a web application for solar panel performance analysis

WordPress users, especially the less experienced, the thought of working with a database can seem intimidating, so most tend to leave any database-related tasks to the more technically savvy. But databases contain all the content of a website, and learning even the basics of managing them can go a long way in improving your overall skills. This will make using WordPress more comfortable and help

you quickly perform everyday tasks, as well as easily fix some of the most common WordPress errors.

In fig. 2 shows the diagram of the WordPress database.

The architecture of the software complex is a set of significant decisions regarding the organization of the web application software system, a set of structural elements and their interfaces, with the help

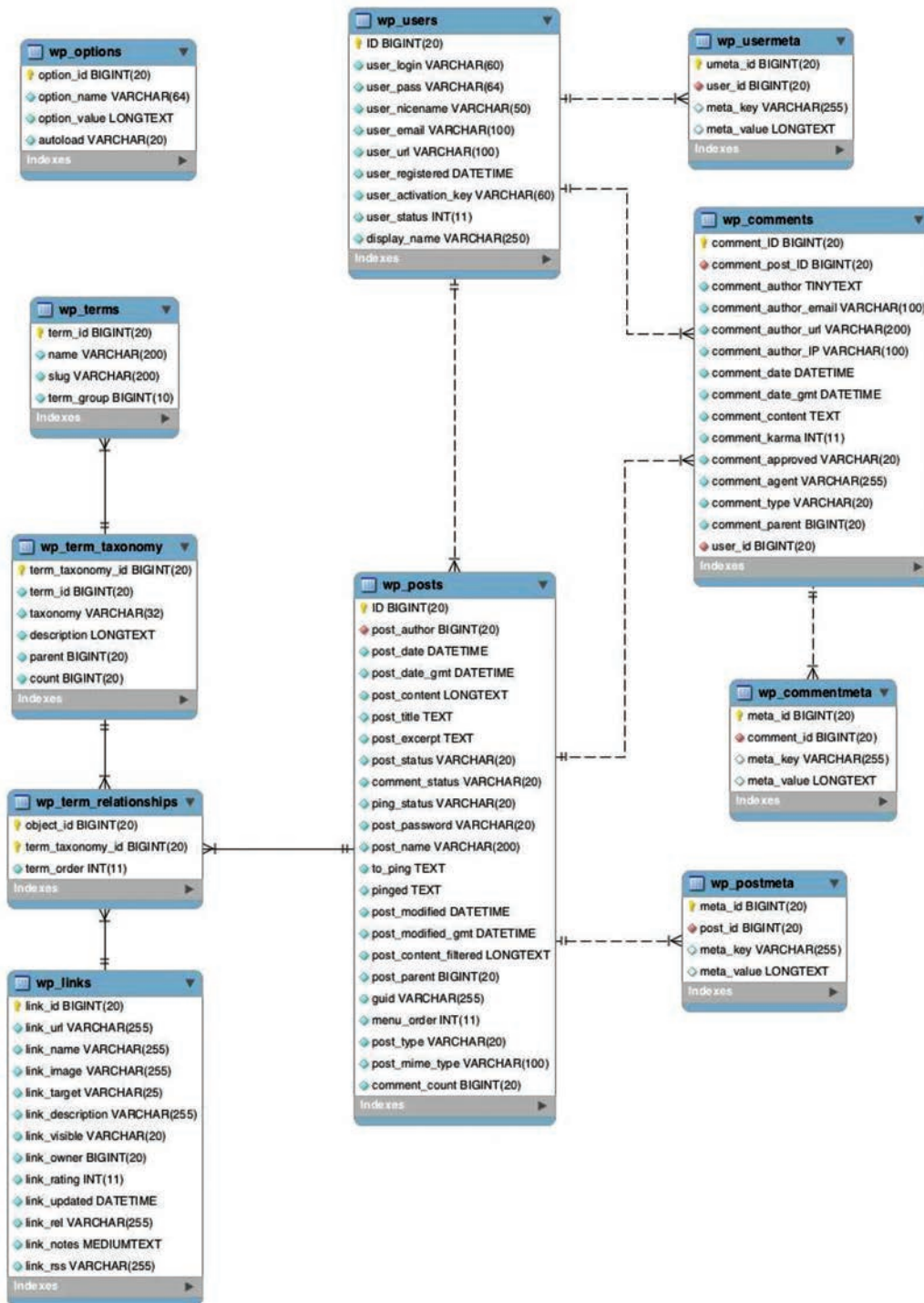


Fig. 2. WordPress database schema

of which the system should be composed, together with their behavior, as determined by the interaction between these elements, the composition of elements into subsystems that are gradually consolidated, as well as the architectural style that guides this organization – the elements and their interfaces, interactions and layouts.

The architecture of the software complex of the web application for analyzing the efficiency of solar panels must contain at least one project. In this case, all the logic of the program is contained in one project, compiled into one assembly and deployed as one element.

In a single– project scenario, task division is implemented using folders. By default, a template includes separate folders for MVC template responsibilities (models, views, and controllers), as well as additional folders for data and services. With such an organization, the details of the data presentation are placed as much as possible in the views folder (Views), and the details of the implementation of data access should be limited to the classes contained in the data folder (Data). At the same time, business logic is placed in services and classes located in the Models folder.

Despite its simplicity, a monolithic solution with one project has certain drawbacks. As the size and complexity of the project increases, the number of files and folders will increase. Tasks related to the user interface (models, views, controllers) are placed in different folders that are not ordered alphabetically. With the addition of user interface-level structures, such as filters or model binders, to separate folders, the situation only worsens. Business logic is lost in the Models and Services folders, as a result it is impossible to clearly define which classes in which folders should depend on other classes. Such inefficient organization at the project level often results in poorly structured code.

To solve such problems in the process of developing web applications, they are often organized in the form of solutions consisting of many projects, where each project is placed in a separate layer of the program. Such a scheme of the architecture of the software complex should be implemented for the designed one as well as a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

As the complexity of the web application for solar panel performance analysis increases, a breakdown of duties and tasks can be applied to effectively manage it. This approach follows the principle of separation of tasks and helps keep the organization of the extensible code base, so that developers can quickly determine

where certain functions are implemented. Layered architecture also has a number of other advantages.

By organizing code using layers, common low-level functions can be reused throughout the application. This is very important, because this approach requires a smaller amount of code and, due to the standardization of the application at the level of one implementation, corresponds to the principle of “Don’t repeat yourself”.

In applications with a multi-layered architecture, restrictions on the interaction between layers can be set. This architecture helps sell encapsulation. When changing or replacing a layer, only those layers that work directly with it will be affected. By limiting the dependencies of the layers on each other, you can reduce the impact of making changes, so that a single change does not affect the entire application.

The use of layers (and encapsulation) allows you to significantly simplify the replacement of functionality within the program. If the application properly encapsulates the storage implementation at the logical layer, this SQL Server layer can be replaced with a new one that implements the same open interface.

In addition to the possibility of replacing implementations due to subsequent changes, the application of layers also allows you to change implementations for testing purposes. Instead of writing tests that apply to real data or user interface layers, during testing they are replaced by dummy implementations that demonstrate known response to requests. As a rule, this makes writing tests much easier and faster than testing in the real application infrastructure.

Regarding the web application for analyzing the efficiency of solar panels, the organization of the logic of the architecture of the software complex by layers is shown in Fig. 3.

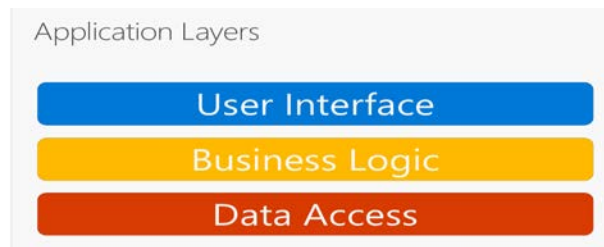


Fig. 3. Organization of the logic of the architecture of the software complex by layers of the web application for analyzing the efficiency of solar panels

The data access layer of a solar panel performance analysis web application must meet application requirements, operate efficiently and securely,

and be easy to maintain and expand as business requirements change. When designing the data access layer, you should be guided by the following general recommendations:

– Correct choice of data access technology. The choice of data access technology depends on the type of data that will have to be worked with and how it is expected to process the data in the application. For each scenario there are the most suitable technologies.

– Using the data access interface. This approach can be implemented by defining front-end components, such as a gateway with well-known input and output parameters that converts requests into a format understood by layer components. In addition, interface types or abstract base classes can be used to define a shared abstraction to be implemented by interface components.

– Encapsulation of data store access functionality in the data access layer. The data access layer should hide the details of accessing the data source. It should provide connection management, query formation, and mapping of application entities to data source structures.

– Mapping of program entities with data source structures. The type of entity used in an application is the primary factor in deciding how to map these entities to data source structures. Domain templates are usually used for this Model or Table Module or mechanisms of Object-relational mapping (Object / Relational Mapping, O/RM).

– Reduce the number of calls and requests to the database. Consider grouping commands into one database operation.

– Performance and scalability requirements. For the data access layer, scalability and performance requirements must be considered during design. For a web application to analyze the efficiency of solar panels, it is the performance of the data access layer that will be the “bottleneck” of the application. If the performance of the data access layer is critical, profiling tools should be used to understand and then reduce the number or break up resource-intensive data operations.

Since the developed design is original and has no similar analogues on the Internet, it is necessary to develop your own theme for WordPress. For the correct functioning of the theme and the web application for which this theme is activated, the WordPress core files are required. The following files were created and populated:

1. Site header template header.php.

According to the developed layouts, the header should contain the name of the web application; logo

of the “5–100” project, as well as a link to the project page; drop down menu.

The menu is created using a standard WordPress feature `wp_nav_menu()`; whose argument is the name of the menu in the WordPress theme. The adaptability of the menu and its presentation in the form of a button that opens the menu on mobile devices is provided using the `navbar` and `navbar`– default classes framework `bootstrap` and `CSS` styles [18].

Next, each template uses a header connection using the following code: `<? php get_header();?>`.

2. Footer template web application – footer.php.

In the footer web application located contacts, Google Analytics, links to pages in social networks.

Like the web application header, the footer is attached to each template page using the `<? php get_footer();?>`.

3. Functions file, which are connected – functions.php.

This file implements the connection of fonts using the function `function enqueue_styles()`; the following code implements the connection of the menu to the theme: `if (function_exists ('add_theme_support'))`

`{ add_theme_support ('menus'); }`

In the theme folder, there are subfolders “js” “and” “css”, which contain the `bootstrap.min.js` and `bootstrap.min.css` files. The `functions.php` file implements the bootstrap connection by connecting these files as a script file and a style file respectively.

The creation of types of news records using the function `register_post_type()` [14]. The complete listing is shown in fig. 4.

Similarly, the creation of a type of records for projects, as well as for records in the carousel on the main page, is implemented.

In addition to its own types of records, this file describes the implementation of its fields for records, for example, an additional description field.

4. The template of the main page of the site is front-page.php.

The main page includes the sections “News”, “Projects” and the carousel “Did you know...?”. The content of all sections is determined dynamically – the latest entries such as news, projects and `didYouKnow` are displayed, respectively. The implementation of creating record types is described above (`functions.php`).

When creating a record, all its fields are entered into the database in the “`wp_posts`” table. Accordingly, in order to obtain data about a record for placement, this table must be queried. Using the function `<? php $query = new WP_Query ("post_type='news'"); ?>` [13] we get data about all records of the news type. Further, with the help of the `$query-> the_post () ;?>`

```

add_action('init', 'news_post_register');
function news_post_register()
{
    $labels = array(
        'name' => 'News ',
        'singular_name' => 'News ',
        'add_new' => Add news ',
        'add_new_item' => 'Add news ', 'edit_item'
=> 'Редагувати новину', 'new_item' => 'Add
news ',
        'view_item' =>'Watch the news',
        'search_items' =>'Find News', 'not_found'
=>'No news found',
        'not_found_in_trash' =>'Not found in news basket',
        'menu_name' => 'News');
    $rewrite = array('slug' => ' News ', );
    $args = array(
        'labels' => $labels,
        'public' => true,
        'publicly_queryable' => true,
        'show_ui' => true,
        'show_in_menu' => true,
        'query_var' => true,
        'rewrite' => true,
    );
}

```

Fig. 4. Listing function for creating a new record type *news*

```

<?php
    $n=4;
    $type="news";
    $recent = new WP_Query("showposts=$n&post_type=$type");
    while($recent->have_posts()) : $recent->the_post();
        ?>
<div class="row">
    <div class="col-lg-3" style="margin-top: 20px;">
    <a href="<?php the_permalink() ?>" rel="bookmark">
    <?php
        $media = get_attached_media( 'image', $post->ID );
        $media = array_shift( $media );
        $image_url = $media->guid;?>
    <?php echo ' tag.

#### 8. The page template is page.php.

Such a template is used by default for pages for which the CMS does not contain a special template. The page is fully populated from the CMS and the template code only contains fetching the page title, image and main content.

The main menu of the web application for analyzing the efficiency of solar panels is shown in Fig. 6.

In the web application for the analysis of the efficiency of solar panels, which is being developed, the key component of the user's office is the menu for managing solar activity data in a section of certain regions of Ukraine. This solar activity data management menu allows the user to create, edit and delete solar radiation indicators for each region of Ukraine. In fig. 7 shows the solar radiation control menu.

A generalized view of the terrain, which allows you to make a web application for analyzing the efficiency of solar panels, is shown in Fig. 8.

Red and orange colors indicate more solar radiation, while yellow and blue tones indicate less. North-facing roof slopes have blue-yellow tones because they typically receive less solar energy than south-facing slopes. Also, roofs blocked by trees or other buildings sometimes receive very little solar energy.

To determine suitable solar roofs, the user must consider three criteria:

- Suitable roofs should have a pitch of 45 degrees or less because steep slopes tend to receive less sunlight. To determine the slope of the roof, the user must create a raster layer of slopes.

- Suitable roofs should receive at least 800 kWh/m<sup>2</sup> of solar radiation. The user can evaluate this criterion using a raster layer of solar radiation.

- Suitable roofs should not face north because north facing roofs in the northern hemisphere receive less sunlight. To determine the orientation of the roof, you need to create an exposure raster layer.

In the web application, there is an option to add a new raster layer with gradients. Each cell in this layer contains a slope value ranging from 0 to 90 degrees. Lighter colors represent gentler slopes, and darker colors represent steeper slopes.

Raster layers can then be used to find areas that meet the criteria for installing solar panels. First, it is necessary to remove areas from the raster layer of solar radiation, the slope of which will be greater than 45 degrees.

All raster layers use the same grid of cells. Therefore, it is possible to compare values in layers of solar radiation and slope. To do this, create an expression in the Condition tool that checks whether each slope value is less than or equal to 45.

If the slope of the cell is steeper than 45 degrees, its value will change to "No Data" in the source layer. Otherwise, the cell will be assigned the corresponding solar radiation value. The result will be a raster layer of solar radiation that does not include slopes greater than 45 degrees.

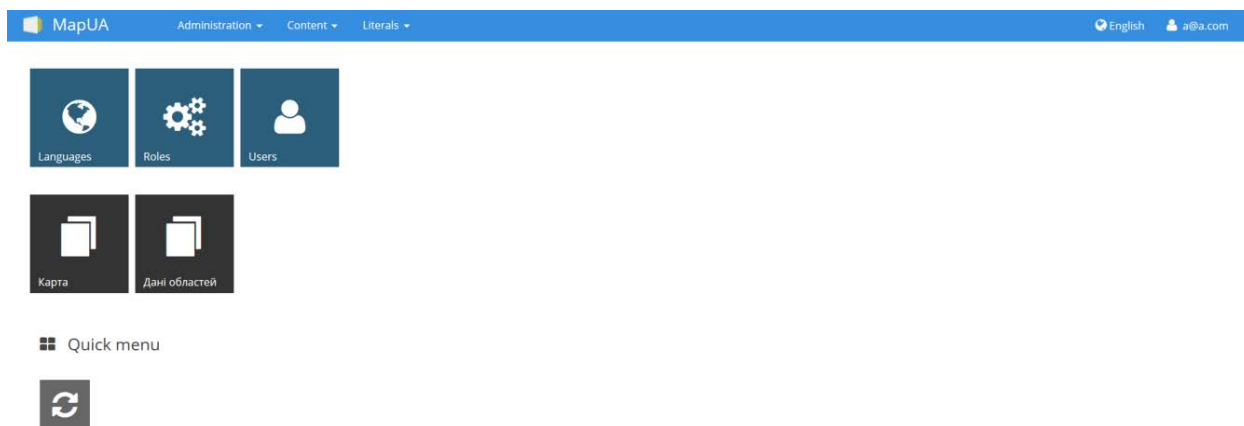


Fig. 6. Main system menu

| Actions | Iso   | Назва                 | Січень.S | Січень.D | Лютий.S | Лютий.D | Березень.S | Березень.D | Квітень.S | Квітень.D | Травень.S | Травень.D | Червень.S | Червень.D | Липень.S | Липень.D | Серпень.S |
|---------|-------|-----------------------|----------|----------|---------|---------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
|         | UA-18 | Житомирська область   | 15.66    | 15.66    | 25.48   | 25.48   | 44.49      | 44.49      | 58.20     | 58.20     | 79.98     | 79.98     | 77.85     | 77.85     | 78.12    | 78.12    | 72.23     |
|         | UA-23 | Запорізька область    | 6.98     | 22.12    | 17.46   | 32.59   | 37.23      | 51.22      | 64.02     | 67.51     | 100.10    | 75.66     | 111.74    | 75.66     | 123.38   | 76.82    | 105.92    |
|         | UA-21 | Закарпатська область  | 9.31     | 20.95    | 15.13   | 30.26   | 44.23      | 48.89      | 62.86     | 62.86     | 82.64     | 82.64     | 91.96     | 82.64     | 90.79    | 84.97    | 87.30     |
|         | UA-07 | Волинська область     | 4.66     | 20.95    | 11.64   | 31.43   | 38.41      | 52.38      | 46.56     | 64.02     | 69.84     | 83.81     | 84.97     | 84.97     | 74.50    | 84.97    | 60.53     |
|         | UA-05 | Вінницька область     | 16.59    | 16.59    | 26.46   | 26.46   | 45.57      | 45.57      | 58.80     | 58.80     | 80.45     | 80.45     | 79.50     | 79.50     | 79.98    | 79.98    | 72.54     |
|         | UA-61 | Тернопільська область | 16.90    | 16.90    | 26.04   | 26.04   | 44.18      | 44.18      | 57.75     | 57.75     | 75.02     | 75.02     | 75.00     | 75.00     | 76.42    | 76.42    | 69.91     |
|         | UA-59 | Сумська область       | 4.66     | 19.79    | 13.97   | 27.94   | 36.08      | 47.72      | 47.72     | 62.86     | 74.50     | 82.64     | 84.97     | 81.48     | 91.96    | 82.64    | 74.50     |

Fig. 7. Menu management indicators sunny radiation

To create a responsive web application for analyzing the efficiency of solar panels using WordPress based on Bootstrap 3, the following algorithm should be implemented:

- Unzip Bootstrap;
- Customize Bootstrap;
- Copy the code;
- Customize the HTML template;
- Customize Header and Footer;
- Adjust the display of recommended publications;
- Make a list of categories;
- Configure the display of recent entries and authors.

The solar panel efficiency web application can be tested on devices with the following permissions:

- Personal computer – 1600 by 992 pixels;
- Laptop – 1280 by 802 pixels;
- Tablet computer – 768 by 1024 pixels;
- Cell phone – 320 by 480 pixels.

Testing of the adaptive layout technology based on the WordPress system was carried out. The test results indicate the correctness of the web application for analyzing the efficiency of solar panels.

**Conclusions.** The result of this work is obtaining a scientific and practical result in the form of improvement of the mechanisms of application of adaptive layout technologies for the development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

In the work, an analytical review of the current state of the problem was carried out, key concepts and the subject area of research were analyzed, methods and tools of adaptive layout were investigated for the



Fig. 8. Generalized view of the area  
In the web application, it is possible to enlarge the image to better see the surfaces of the roofs (Fig. 9)

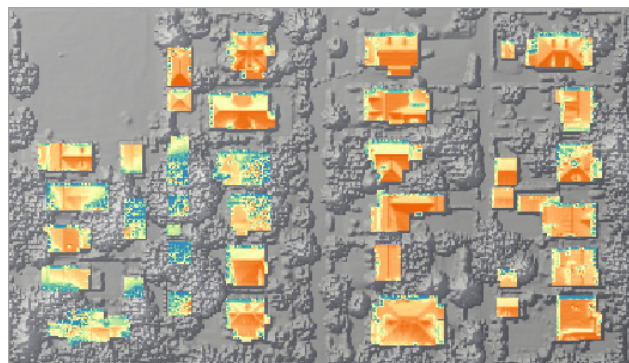


Fig. 9. Ability to enlarge the image

development of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

The analysis of the WordPress system as a tool for adaptive layout was carried out, the specifics of the WordPress database and the specifics of theme development in the WordPress system were investigated, the architecture of the software complex was selected.

The practical implementation of the adaptive layout technology for the development of a web application for the analysis of the efficiency of solar panels is proposed, in the framework of which

the design of the web application was developed, the implementation of adaptability based on the WordPress system was carried out, and the testing of the adaptive layout technology based on the WordPress system was carried out.

The practical result of this research is the adaptive layout of a web application for analyzing the efficiency of solar panels.

Next direction research is an assessment of the effectiveness of technology application adaptive layout regarding development of a web application for analysis efficiency solar panels.

#### Bibliography:

1. Schön, E., Thomaschewski, J. and José, M. Agile Requirements Engineering: A systematic literature review, *Computer Standards and Interfaces*, 2017, №. 49, pp.79-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.08.011>
2. Starkova, O., Bondarenko, D., Hrabovskyi, Y. Providing software support for economic analysis. *Technology Audit and Production Reserves*, 2023, № 5 (2 (73)), 34–39.
3. Al'boschiy, O., Dorokhov, O., Hrabovskyi, Y., Naumenko, M. Automated balancing method of vector illustration and its software implementation. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series III: Mathematics and Computer Science*, 2022, 2(1), pp. 177–192. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.mif.2022.2.64.1.12>
4. Safonov I., Kurilin I., Rychagov M., Tolstaya E. *Adaptive Image Processing Algorithms for Printing*. Heidelberg, 2018, 304 p.
5. Martin, R. Twenty challenges for innovation studies. *Science and Public Policy*, 2016, № 43(3), p. 432–450.
6. Mitchell, D., & Ream, R. *Professional responsibility*. Springer International Publishing, Switzerland, 2014, 256 p.
7. Vultur, O. M., Pentiu, S. G., & Lupu, V. Real-time gestural interface for navigation in virtual environment. In *2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS), 2016, p. 303–307*.
8. Hood, N. *Quality in MOOCs : Surveying the terrain*. Burnaby: Commonwealth of Learning, 2016, 40 p.
9. Hrabovskyi, Y., Kots, H., Szymczyk, K. Justification of the innovative strategy of information technology implementation for the implementation of multimedia publishing business projects. *Proceedings on Engineering Sciences*, 2022, № 4(4), pp. 467–480. DOI: <https://doi.org/10.24874/PES04.04.008>
10. Ushakova I., Hrabovskyi Ye. Methodology for developing an information site with Workflow support for publishing articles. *Development management*. 2022. № 20(3). P. 20–28. DOI: 10.57111/devt.20(3).2022.20-28
11. Ushakova I. Modeling and selection of a distance learning system for a higher education institution based on the method of hierarchy analysis using the DSS / I. Ushakova, Ye. Hrabovskyi, D. Bondarenko // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 246–253.

### Грабовський Є.М., Бондаренко Д.О., Ушакова І.О. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ АДАПТИВНОГО ДИЗАЙНУ ЩОДО ПРОЄКТУВАННЯ ВЕБ-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У статті запропоновано практичну реалізацію технології адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей, в рамках якої проведено розробку дизайну веб-застосунку. Практичним результатом даного дослідження виступає адаптивна верстка веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. У статті наведено поняття адаптивного веб-дизайну відповідно до проблематики розроблення веб-застосунку. Метою даної статті є вдосконалення механізмів застосування технології адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Об'єктом дослідження є процес застосування технології адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Предметом дослідження є технології адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Було розроблено схему теми до веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей відповідно до структури сайту, вимог до динамічних сторінок та необхідної структури теми Word-Press. У статті наведено схему бази даних WordPress веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Запропоновано архітектуру програмного комплексу веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Окрема увага наділяється організації логіки архітектури програмного комплексу по шарах веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Подані рекомендації, якими слід керуватися у процесі проектування кожного шару доступу до даних. Наведені файли WordPress, які необхідні для коректного функціонування теми та веб-застосунку, для якого активовано цю тему. Розроблений дизайн веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей є оригінальним і не має схожих аналогів у мережі Інтернет, внаслідок чого для застосування було розроблено власну тему для WordPress. Оригінальність дослідження полягає в визначенні основних параметрів технології адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей. Практична цінність полягає в розробленні методики адаптивної верстки щодо розроблення веб-застосунку для аналізу ефективності сонячних панелей.

**Ключові слова:** адаптивна верстка, сонячні панелі, доступ до даних, методика, аналіз ефективності, WordPress.

**Дьячук Т.С.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Шкрябець В.І.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ КОДУ НА МОВАХ ВИСОКОГО РІВНЯ

Стаття присвячена рішення практичної задачі спрощення розробки застосунків, які мають працювати на багатьох платформах, за допомогою використання автоматизованої системи генерації коду на мовах високого рівня. Галузь використання системи – компанії з розробки програмного забезпечення. Розроблювана система є частиною більш складної системи машинного перекладу з однієї мови високого рівня на іншу. Для досягнення поставленої мети було: проведено аналіз підходів оптимізації мультиплатформеної розробки, спроектовано, розроблено та реалізовано автоматизовану систему генерації коду, впроваджено її у виробничий процес компанії з розробки програмного забезпечення, проведено аналіз отриманих результатів. Об'єктом дослідження є синтаксис мов програмування високого рівня. Предметом дослідження – автоматизована система генерації коду. Методи дослідження базуються на синтаксисі мов програмування високого рівня. Для реалізації системи використані: мова Kotlin для опису та розробки системи, система автоматизації збірки Gradle, XML формат для передачі проміжних результатів між різними етапами виконання генерації, середа розробки IntelliJ Idea, система керування версіями файлів Git, GitHub – репозиторій для вихідного коду. Запропонована архітектура системи кодогенерації для подальшого масштабування має розділення на різні етапи обробки вхідних описів. Проміжні результати між етапами зберігаються у вигляді дерев, таких як абстрактне синтаксичне дерево, дерево розбору, стилістичне дерево. У результаті роботи користувач отримує вихідні файли згенерованого коду. В процесі проектування системи була розроблена метамова, яка містить засоби для декларативного опису структур, інтерфейсів, типів даних та методів. Запропонована система генерації коду з опису на метамові може генерувати структури та інтерфейси (примітиви) на мовах Kotlin, C/C++, Java, Swift з мінімальним втручанням людини. Кодогенератор викладено у вільний доступ для ознайомлення на платформі GitHub. Будь хто може використовувати розроблену систему у своїх проєктах по ліцензії GPL – 3.0 та запропонувати свої правки та покращення за допомогою механізмів пул-реквестів або створення запитів про помилки на GitHub.

**Ключові слова:** github, kotlin, метамова, абстрактне синтаксичне дерево, дерево розбору, кодогенерація, ОС, стилістичне дерево.

**Постановка проблеми.** Розробка мультиплатформеного застосунку, тобто під різні операційні системи (ОС), зазвичай означає, що одну і ту ж саму логіку потрібно буде писати декілька разів для кожної з обраних ОС на притаманній мові програмування. Це призводить до зайвого витрачання людських та фінансових ресурсів. Великі проєкти можуть використовувати декілька мов програмування в різних частинах системи. Автоматизована система генерації коду може полегшити спільну розробку і підтримку таких проєктів, зменшити рутинну роботу для програмістів. Застосування кодогенерації дозволяє об'єднати функціонал різних мов програмування в одному проєкті, що може бути корисним для певних завдань або команд розробників. Таким чином, обрана тема є актуальною.

**Аналіз підходів оптимізації мультиплатформеної розробки.** Існує декілька підходів для пришвидшення мультиплатформеної розробки. Наприклад, написання спільної бізнес-логіки використовуючи загальнодоступну мову (як-то C/C++ [1]) або скрипти (Lua [2]). Іншим підходом є використання мультиплатформених фреймворків таких як: фреймворк Flutter [3], технологія Kotlin Multiplatform [4], фреймворк React Native [5], фреймворк Xamarin [6].

Аналіз показав, що у кожного з методів є свої прихильники та області використання, але ж не існує ідеального та універсального рішення. Взагалі це працює допоки застосунок нескладний та й має свої недоліки. Особливо неможливість, або складність використання таких підходів в умовах коли проєкт вже в розробці і треба частину

перевести на загальні рейки. Доволі часто це призводить до збільшення часу розробки, або ж може вийти непритаманний інтерфейс користувача. Також крім спеціалістів з розробки під конкретну ОС потрібні ще додаткові розробники зі спеціалізованим досвідом.

Також існують системи генерації коду [7], які допомагають автоматизувати процес розробки застосунків. Зазвичай потрібно описати необхідний код за певними правилами або за допомогою графічних інструментів, або за допомогою деякого абстрактного опису. Кожна з систем генерації коду може використовуватися у певній області та має свої обмеження та недоліки, такі як можливість генерації неефективного або неоптимального коду, потребу в ретельному тестуванні та валідації, а також складність налагодження та розуміння коду, згенерованого автоматично. Крім того, неправильна конфігурація генератора може призвести до неправильного або небезпечного коду.

**Метою статті** є спрощення мультиплатформеної розробки, за допомогою використання автоматизованої системи генерації коду на мовах високого рівня. Нас цікавить можливість генерації вихідного опису на кілька мов високого рівня для автоматизації та спрощення написання застосунків для різних платформ. Розроблювана автоматизована система генерації коду є частиною більш складної системи транскompіляції [8], тобто системи машинного перекладу з одної мови високого рівня на іншу. Яка дасть спеціалістам такий інструмент, що дозволить працювати в комфортній для них середі-мові та використовувати код один одного.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо етапи, з яких складається наша система генерації коду (рис. 1).

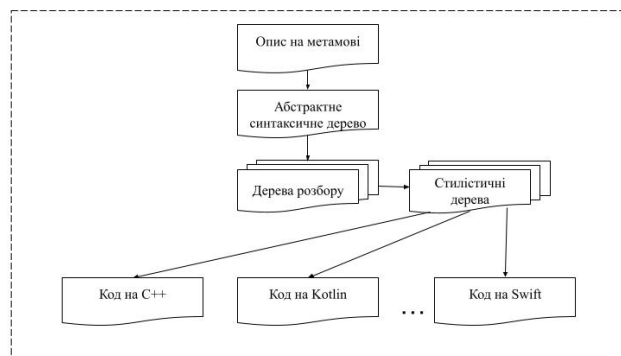


Рис. 1. Етапи генерації коду на мовах високого рівня

Спочатку необхідно зробити опис потрібного коду на метамові, який складається з одного чи декілька файлів. Метамова – це мова для опису загальної структури програми (логіки), яка базу-

ється на Kotlin Script. Вона була розроблена в процесі проектування системи та являється проміжним етапом для відладки. Метамова містить засоби для декларативного опису структур, класів, інтерфейсів, типів даних, методів, тощо та дозволяє програмісту вивчати і змінювати опис структур в найбільш зручний для людини спосіб. Приклад декларування нескладної структури (клас даних в термінах Kotlin) GoldBuffer наведено у лістингу 1. Ця структура містить лише три поля даних: blockCount – ціле знакове число розміром 32 біта; blockSize – ціле знакове число розміром 32 біта; lastBlockSize – ціле знакове число розміром 32 біта, зі значенням за замовчуванням 10.

Лістинг 1. Декларування на метамові

```

1. namespace("com.goldman.data").apply {
2. dataClass("GoldBuffer").apply {
3. field("blockCount", DataType.int32)
4. field("lastBlockSize", DataType.int32, 10)
5. field("blockSize", DataType.int32)
6. }
7. }

```

За описом на метамові формується абстрактне синтаксичне дерево (Abstract Syntax Tree або AST), наведено на рис. 2. AST є структурою даних, яка представляє синтаксичну структуру програми, відображаючи її синтаксичний аналіз у вигляді дерева. Тобто AST є інтермедіативним представленням програмного коду, яке дозволяє відокремити синтаксичну структуру від конкретних деталей синтаксису. Воно має наступну ієрархію рівнів: зверху простір імен; потім рівень класів, інтерфейсів; потім рівень методів та полів; рівень аргументів та логіки.

Кожен вузол в AST представляє конструкцію мови програмування (таку як оператор, вираз, об'єкт чи інше) і має дочірні вузли, які представляють його складові частини або аргументи. Дерево може бути використано для виконання різних видів аналізу програми. AST важливе для компіляторів та інших інструментів аналізу програмного коду. Воно допомагає зрозуміти структуру коду на рівні високого рівня, спрощує виконання оптимізації, перетворень та інших операцій над програмним кодом.

Як можна побачити дерево будується від кореневого вузла Namespace, яке починає декларувати простір імен. Від нього по ланцюжку ідуть простори імен "com", "goldman", "data". Така організація дає можливість групувати класи, інтерфейси чи структури з одного простору імен в якості дочірніх елементів вузла. У нашому прикладі маємо структуру GoldBuffer, яка задекларована в просторі імен "com.goldman.data". Вузол GoldBuffer



має три дочірніх вузла: поле даних `blockSize`, поле даних `blockCount`, поле даних `lastBlockSize`, як і було задекларовано на рівні метамови. Таким чином дерево повністю відповідає тому, що було описано на рівні метамови в лістингу 1.

Абстрактне синтаксичне дерево не можна використати для безпосередньої генерації вихідного коду оскільки воно ще занадто загальне та «віддалене» від результуючої мови. Приклад того, що може бути різним:

– організація файлів. В C/C++, прийнято декларування роботи в `.h` файлах, а реалізацію в `.c/.cpp`. В мовах `java/kotlin/swift/go` декларування та реалізація в одному файлі;

– різна структура файлів. В Java/Kotlin простору імен декларується на початку файлу, потім йде блок імпорту. В мові C++ навпаки, в одному файлі може бути задекларовано багато просторів імен, а імпорт взагалі може бути в будь якому місці;

– структура директорій. В Kotlin/Java шлях до файлу на диску має співпадати з простором імен. В інших мовах таке не потрібно.

Тому потрібен наступний етап, на якому абстрактне дерево буде перетворено в дерево розбору (рис. 3). Дерево розбору – це структура даних, яка представляє перетворення абстрактного дерева в дерево, що враховує особливості та правила граматики вихідної мови, але без врахування стилістичних налаштувань. В цьому дереві містяться синтаксичні елементи тексту та їх взаємозв'язки згідно з правил граматики.

На верхньому рівні воно має розбиття на файли, потім рівень просторів імен, далі класи і інтерфейси, рівень методів; рівень аргументів та логіки. Кожний вузол у дереві розбору відображає синтаксичний елемент, як то оператор, вираз, ключове слово. Ребра це відносини між синтаксичними елементами, які визначають ієрархію та порядок вкладеності.

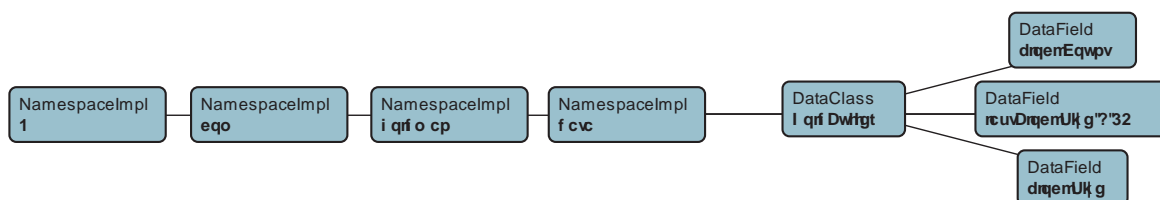


Рис. 2. Абстрактне синтаксичне дерево для структури GoldBuffer

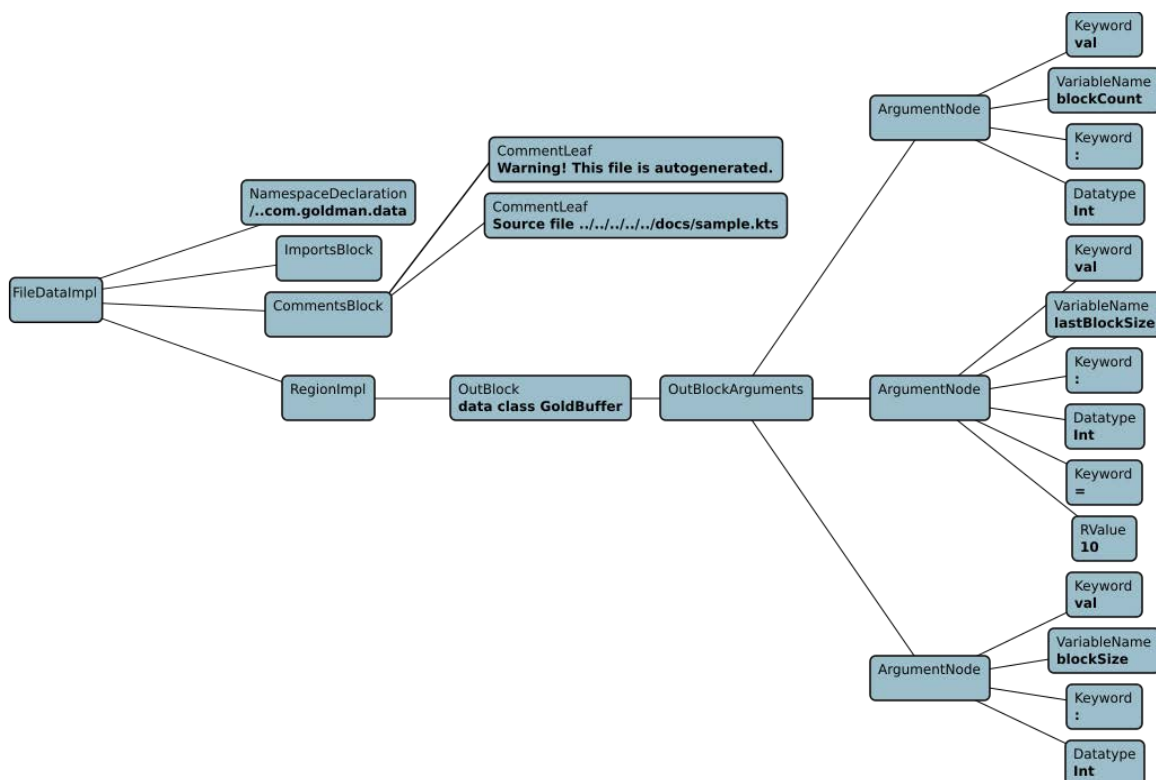


Рис. 3. Дерево розбору для структури GoldBuffer

На рис. 3 наведено дерево розбору для структури GoldBuffer для мови Kotlin. На цьому рівні система вже будує файло-орієнтоване дерево, оскільки на вищому рівні іде вузол FileDataImpl із зазначенням шляху до вихідного файлу. На наступному рівні відбувається: декларування простору імен (NamespaceDeclaration); блок імпортів інших класів (ImportsBlock), в нашому випадку він пустий; блок з коментарями (CommentsBlock), містить автоматично додані коментарі; вузол з описом структури (OutBlock), в свою чергу він містить вхідні аргументи (OutBlockArguments), і далі на нижньому рівні бачимо опис трьох полів

даних: blockSize, blockCount, lastBlockSize. Кожне з цих полів описано декількома вузлами дерева.

Дерево розбору не враховує можливі налаштування стандарту оформлення коду на мові високого рівня. Для цього потрібен окремий етап трансформації дерева розбору в стилістичне дерево, яке містить елементи оформлення коду, такі як табуляція, коми, переноси рядків, елементи коментування, інші спеціальні символи. Таким чином стилістичне дерево – це дерево розбору доповнено вузлами оформлення коду.

На рис. 4 приклад того, що буде в результаті трансформації дерева розбору структури

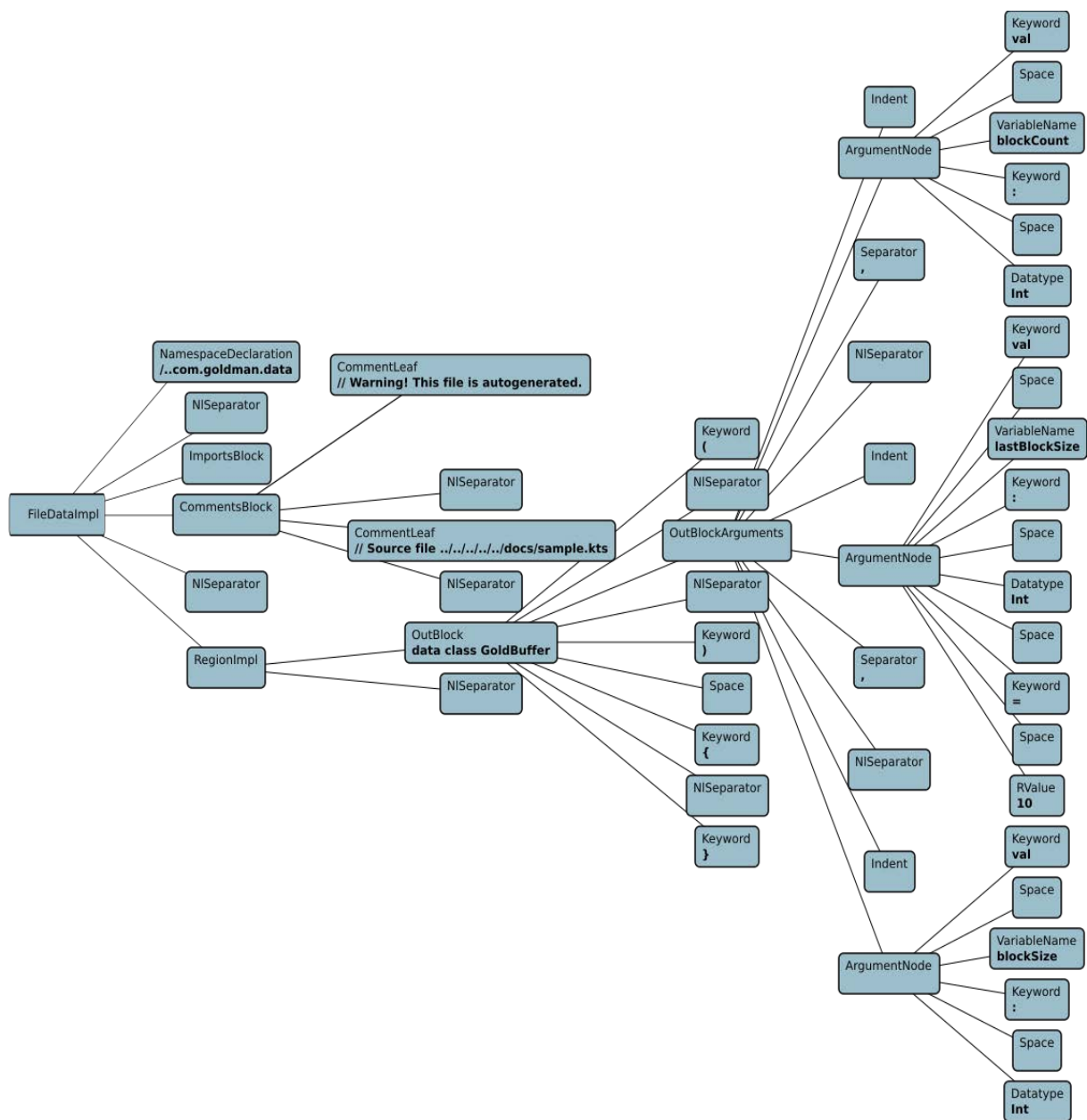


Рис. 4. Стилiстичне дерево для структури GoldBuffer

GoldBuffer в стилістичне дерево. Дерево у порівнянні з рис. 3 не змінило своєї структури, а лише доповнилось додатковими вузлами, які відповідають саме за оформлення вихідного файлу.

Розглянемо ці вузли: `NISeparator` – відповідає за запис у вихідний файл символу переносу рядку; `Space` – звичайний символ пробілу – “ ”, приклад використання – відступ між типом даних та назвою змінної; `Indent` – символ табуляції, використовується для відступів у вкладених блоках коду; `Keyword` – вузли з символами (“”, “”) для оформлення аргументів функцій, методів та конструкторів; крім того система на цьому етапі розставляє символи дужки для оформлення логічних блоків у місцях, які задекларовані стандартом оформлення коду.

За стилістичним деревом система пише вихідні файли на обраних мовах. В подальшому ці файли можна буде використовувати в проєктах користувача системи, тобто це і є фінальний результат системи кодогенерації. Результуючий файл для нашого прикладу представлено у лістингу 2. Це типова структура з трьома полями на мові Kotlin. Вона отримана за рахунок роботи блоку кодогенерації.

Лістинг 2. Згенерований код структури GoldBuffer

```

1. package com.goldman.data
2. // Warning! This file is autogenerated.
3. // Source file ../../../../../../test/dataclass.kts
4.
5. data class GoldBuffer(
6. val blockCount: Int,
7. val lastBlockSize: Int = 10,
8. val blockSize: Int,
9.) {
10. }
```

Система кодогенерації розроблена на мові Kotlin з використанням середовища розробки IntelliJ IDEA. Налаштування проєкту можуть бути збережені в JSON файлі або Groovy скрипті.

В якості архітектурного підходу для нашої системи було обрано гексагональну архітектуру (Clean Architecture [9]), яка відповідає нашим вимогам та цілям як найкраще. Гексагональна архітектура – це архітектура, побудована на використанні слабо пов’язаних компонентів. Тобто усі зв’язки між компонентами реалізовані за допомогою адаптерів та інтерфейсів. Використання такої архітектури робить компоненти легко замінними на будь-якому рівні, та полегшує тестування логіки. Цей підхід допомагає забезпечити високу якість коду, зручність підтримки та гнучкість системи для майбутніх змін та розширень. Система використовує XML формат для передачі проміжних результатів між різними етапами виконання генерації.

Були розроблені сценарії для побудови абстрактного синтаксичного дерева, трансляції його в дерево розбору, сценарії для додавання стилістичної інформації та запису в вихідні файли згенерованого коду. Система дозволяє генерувати структури та інтерфейси (примітиви) з мінімальним втручанням людини. Код системи кодогенерації є в публічному доступі, репозиторій з кодом викладено на GitHub за адресою <https://github.com/vshcryabets/codegen> (дата звернення: 22.01.2024). Кожен може використовувати його в своїх проєктах за ліцензією GPL-3.0 (GNU General Public License version 3). Генерацію коду можливо під’єднати до системи збірки Gradle.

**Висновки.** Таким чином, було розроблено та запропоновано архітектуру системи кодогенерації. Для подальшого масштабування вона має розділення на різні етапи обробки вхідних описів. Проміжні результати між етапами зберігаються у вигляді дерев, таких як абстрактне синтаксичне дерево, дерево розбору, стилістичне дерево. Було розроблено сценарії для побудови абстрактного синтаксичного дерева, трансляції його в дерево розбору, сценарії для додавання стилістичної інформації та запису в вихідні файли згенерованого коду. На даний час реалізовано кодогенератор, який з опису на метамові може генерувати загальні інтерфейси, блоки констант, перерахування та структури на мовах Kotlin, C/C++ , Java, Swift з мінімальним втручанням людини. Планується додати підтримку інших мов високого рівня, зокрема Rust та Python. Кодогенератор викладено у вільний доступ для ознайомлення на платформі GitHub. Спільнота розробників може запропонувати свої правки та покращення системи за допомогою механізмів пул-реквестів або створення запитів про помилки на GitHub.

Робота над системою продовжується, репозиторій постійно оновлюється, виправляються помилки та система поліпшується. Ведеться робота з удосконалення трансляторів для генерації класів, методів та логіки. Також планується розробка методик взаємодії та поширення коду між командою розробників за допомогою інструментарію git. Система генерації коду під’єднується до системи збірки Gradle.

На даний час кодогенератор використовується для генерації коду у виробничому процесі для суміщення старої та нової частини комерційного продукту, написаного на різних мовах програмування, що допомагає спростити розробку та зекономити час розробників.

**Список літератури:**

1. Грицюк Ю.І., Рак Т.Є. Програмування мовою С++: навчальний посібник. – Львів: Вид-во Львівського ДУ БЖД, 2011. 292 с.
2. Lua Documentation. URL: <https://www.lua.org/docs.html> (date of access: 20.01.2024).
3. Eric Windmill. Flutter in Action: Manning Publications, 2020. 368 p.
4. Kotlin Multiplatform. URL: <https://kotlinlang.org/docs/multiplatform.html> (date of access: 20.01.2024).
5. React Native. URL: <https://reactnative.dev/> (date of access: 20.01.2024).
6. What is Xamarin? URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/xamarin/get-started/what-is-xamarin> (date of access: 20.01.2024).
7. 5 AI Tools That Can Generate Code To Help Programmers. URL: <https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2022/03/14/5-ai-tools-that-can-generate-code-to-help-programmers/?sh=7f4865b35ee0> (date of access: 21.01.2024).
8. Шкрябець В.І., Дьячук Т.С. Транскомпілятор як засіб мультиплатформленої розробки. Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запоріжжя. 2022. С. 119–121.
9. Robert C. Martin. Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design. – Pearson; 1nd edition, 2017. 352 p.

**Diachuk T.S., Shkriabets V.I. AUTOMATED SYSTEM OF CODE GENERATION IN HIGH-LEVEL LANGUAGES**

*The article is devoted to solving the practical problem of simplifying the development of applications that must work on many platforms, using an automated code generation system in high-level languages. The field of use of the system is a software development companies. The developed system is part of a more complex machine translation system from one high-level language to another. To achieve the goal, the following was done: an analysis of multi-platform development optimization approaches was carried out, an automatic code generation system was designed, developed and implemented, it was implemented in the production process of a software development company, and the results were analyzed. The object of research is the syntax of high-level programming languages. The subject of research is an automated code generation system. Research methods are based on the syntax of high-level programming languages. To implement the systems, the following are used: Kotlin language for system description and development, Gradle build automation system, XML format for transferring intermediate results between generation execution stages, IntelliJ Idea development environment, Git file version control system, GitHub – source code repository. The proposed system architecture of code generation for further scaling includes a division into different stages of processing input descriptions. Intermediate results between steps are stored as trees, such as abstract syntax tree, parsing tree, stylistic tree. As a result, the user receives the output files with the generated code. During the designing the system, a metalanguage was developed, which contains methods for declaratively describing structures, interfaces, data types, and methods. The proposed code generation system from description to metalanguages can generate structures and interfaces (primitives) in Kotlin, C/C++, Java, Swift languages with minimal human intervention. The code generator is published on the GitHub platform. Anyone can use the developed system in their projects under the GPL-3.0 license and suggest their edits and improvements using the pull request mechanisms or by creating bug requests on GitHub.*

**Key words:** github, kotlin, meta language, abstract syntax tree, parse tree, code generation, OS, stylist tree.

УДК 681. 5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/20>**Жученко А.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Путятін Р.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ НЕТОЧНОСТІ МОДЕЛІ

Досліджено ефективність системи модельно-прогнозуючого керування процесом випалювання вуглецевих виробів при використанні в ній точної (в певному розумінні) та неточної математичних моделей. Як показники ефективності керування розглядалися наступні: кінцеве значення температури у заготовці з найменшою температурою, найбільший перепад температур у заготовці з найбільшою температурою, тривалість перехідного процесу випалювання, сумарна витрата палива за час перехідного процесу.

Враховуючи, що задачею даного дослідження було аналіз не стільки абсолютних значень, скільки тенденції зміни показників ефективності керування при відхиленні параметрів математичної моделі, що використовується у системі керування, від їх номінальних значень, в якості моделей розглядалися аперіодичні ланки другого порядку за всіма досліджуваними каналами. Чисельні значення математичних моделей ідентифіковані за експериментальними даними.

Представлені результати дослідження впливу зміни кожного з розглядуваних параметрів математичних моделей (коефіцієнти передачі, сталі часу) на ефективність керування. Дані результати мають якісний характер, тобто показують чи сприяє (не сприяє) збільшення (зменшення) даного параметру ефективності керування.

Проведено дослідження особливостей системи модельно-прогнозуючого керування в умовах використання точної та неточної математичних моделей. Сформульовані умови визначення тривалості перехідних процесів.

Точна математична модель забезпечує підвищення ефективності керування, швидкості нагрівання, дозволяє зменшити витрати палива. При цьому дотримуються задані обмеження на швидкість нагрівання, що дозволяє мінімізувати обсяги браку.

Неточність моделі призводить до збільшення перепаду температур у гарячій заготовці (зі значним порушенням обмежень), збільшує тривалість перехідного процесу і сумарну витрату пального порівняно з керуванням, побудованим за точною моделлю.

Показано необхідність пошуку альтернативних способів урахування неточностей математичних моделей, які використовуються у системі модельно-прогнозуючого керування процесом випалювання вуглецевих виробів, для забезпечення перебігу процесу у заданих технологічних межах.

**Ключові слова:** ефективність керування, МП-регулятор, неточна модель, якість керування, випалювання, вуглеграфітові вироби.

**Постановка проблеми.** Вуглеграфітові вироби застосовують у різних галузях техніки, зокрема в чорній та кольоровій металургії, які є провідними в економіці України. Випалювання є одним із завершальних етапів виробництва вуглеграфітових виробів. Цей етап належить до найбільш тривалих (тривалість всієї кампанії випалювання становить сотні годин), інерційних і енерговитратних в усьому циклі виробництва. Саме тому задача підвищення ефективності процесу випалювання шляхом оптимізації енерговитрат є актуаль-

ною науково-технічною задачею. Одним із шляхів розв'язання даної задачі є створення і впровадження у виробництво енергоощадної системи керування процесом випалювання.

Найпоширенішими технологічними апаратами, де відбувається процес випалювання вуглецевих виробів, є кільцеві печі типу «Рідгаммер». Піч даного типу складається з однакових камер (порядку 10–20), в які завантажуються вуглеграфітові заготовки. Піч обладнана рухомим газовим пальником, який послідовно пересувають від

камери до камери. Камера, на якій наразі розміщено палик – камера «під вогнем», – має найвищу температуру, порядку 1300°C. Ця камера є основним об'єктом керування, всі інші камери (стадії процесу випалювання) залежать від режиму роботи в ній, і, з точки зору організації керування процесом випалювання в цілому, можуть впливати тільки на обмеження, які треба враховувати. Саме тому у даному дослідженні розглядаються питання керування виключно камерою «під вогнем».

Будь-які математичні моделі (у тому числі моделі з розподіленими параметрами) відображають тільки певні властивості об'єкту керування і у більшій чи меншій мірі є неточними. Використання у системі керування спрощених математичних моделей, як згадувалося вище, робить ще більш актуальним питання впливу неточності моделі на ефективність процесу керування. Тому дослідження впливу неточності математичної моделі керованого об'єкту на ефективність системи керування ним є важливим етапом синтезу останньої.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, 3, 6] обґрунтована доцільність використання модельно-прогнозуючого регулятора (МП-регулятора) у системі керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Керування, побудоване на основі МП-регулятора, передбачає використання математичної моделі керованого процесу. У роботах [2, 6] наведена математична модель процесу випалювання з розподіленими параметрами, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Використання такої моделі у системі керування реального часу неможлива у зв'язку із значною тривалістю розрахунків за цією моделлю.

У роботі [6] побудовано спрощену за методом Фур'є [6] математичну модель процесу випалювання в печі типу «Рідгаммер». Використовуючи дану модель, доведено переваги керування на основі МП-регулятора порівняно з ПІД- і селективним ПІД-регуляторами. В роботах [6, 8] показано, що збільшення горизонту прогнозування збільшує тривалість кампанії випалювання, а збільшення горизонту керування зменшує її.

**Мета статті.** У зв'язку з наведеними вище обставинами та обґрунтуванням постановки проблеми метою даної статті є дослідження впливу параметрів налаштування МП-регулятора та неточності прогнозуючої моделі на показники ефективності системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно постановки задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів [4] до параметрів, які впливають на ефективність керування і підлягають визначенню відносяться: період дискретизації  $T_s$ , горизонт прогнозування  $p$  та горизонт керування  $m$

МП-регулятора, а також параметр налаштування<sup>и</sup>. Однак перші три параметри не рекомендовано використовувати як параметри налаштування [9], натомість вибрано такі їх значення: період дискретизації  $T_s = 0,1$  год; горизонт керування  $m = 10$  кроків (10 кроків за першу годину горизонту прогнозування, потім фіксоване значення); горизонт прогнозування  $p = 40$  кроків (4 год).

Для реалізації алгоритму керування [4] потрібно мати математичні моделі, які зв'язують витрати палива з температурами у 3-х точках: точка 1 – найбільша температура у заготовці з найвищою температурою в гарячій зоні камери «під вогнем»  $\theta_1$ , найменша температура у тій самій заготовці  $\theta_2$ , точка 3 – найнижча температура серед усіх заготовок  $\theta_3$ .

У даному дослідженні ставилася задача оцінити не стільки кількісний, скільки якісний вплив неточності визначення параметрів математичної моделі об'єкту керування на ефективність самого керування. Тому в якості номінальної моделі по всім 3-м каналам дії розглядалася аперіодична ланка 2-го порядку з передатною функцією

$$W_i(s) = \frac{K_i}{(T_{1,i}s + 1)(T_{2,i}s + 1)} \quad (1)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт підсилення, °C·год/м<sup>3</sup>;  $T_{1,i}$  і  $T_{2,i}$  – сталі часу, год. Їхні числові значення для кожного з каналів дії ідентифіковано за експериментальними даними у відповідності до умов дослідження.

Ефективність процесу керування випалюванням вуглецевих виробів оцінювалась за такими показниками: тривалість перехідного процесу  $T_f$ , сумарна витрата палива за перехідний процес  $Q_\Sigma$ , максимальний перепад температур в гарячій заготовці (різниця температур точок 1 і 2)  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ , температура точки 3 після виходу у статичний режим  $\theta_3(T_f)$ .

Неточні математичні моделі формувались із номінальних шляхом зміни їх параметрів.

У результаті проведеного моделювання отримані якісні оцінки впливу відхилень параметрів моделей від їх номінальних значень на якість процесу керування (табл. 1).

Таблиця 1  
Вплив зміни параметрів моделей на якість керування

| Точка      | Точка 1 |     | Точка 2 |     | Точка 3 |     |
|------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| Параметр   | $K$     | $T$ | $K$     | $T$ | $K$     | $T$ |
| Зменшення  | +       | -   | -       | +   | -       | +   |
| Збільшення | -       | +   | +       | -   | +       | -   |

У табл. 1 за сприятливі результати зміни параметрів моделей (позначено як «+») прийнято зменшення  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ ,  $T_f$  та  $Q_\Sigma$ , збільшення  $\theta_3(T_f)$ , за несприятливі (позначено як «-») – збільшення  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ ,  $T_f$  та  $Q_\Sigma$ , зменшення  $\theta_3(T_f)$ .

Всі подальші симуляції було проведено для номінальної (точної) моделі та для моделі з най-

більш несприятливими відхиленнями (за сумарним ефектом змін параметрів згідно табл. 1) (неточної моделі). Для симуляції з неточною моделлю всі параметри номінальної моделі було змінено на 3 % від початкових значень у несприятливий бік. Значення обмеження  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$  варійовано від 70 до 160°C з кроком 10°C. Тривалість перехідного процесу було визначено наступним чином:

$$T_f = \begin{cases} \min_{r_3^y \leq \Delta\theta_3} t, \text{ якщо } \max_{0 \leq t \leq T_f} \Delta\theta_3 \geq r_3^y \\ \min_{\Delta\theta_3 = \max \Delta\theta_3} t, \text{ якщо } \max_{0 \leq t \leq T_f} \Delta\theta_3 < r_3^y \end{cases}$$

де  $r_3^y$  – значення завдання для  $\theta_3$ . Іншими словами, тривалість перехідного процесу – це або час першого досягнення величиною  $\Delta\theta_3(T_f)$  її значення за завданням, або час першого досягнення максимуму відхилення впродовж процесу, якщо цей максимум менший за значення завдання для  $\theta_3$ .

Обрано тривалість симуляції 350 год. Сумарну витрату палива визначено від початкового моменту до моменту закінчення перехідного процесу. Типові динамічні графіки наведено на рис. 1 та 2, де  $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 110^\circ\text{C}$ ,  $w^u = 0$ .

Горизонтальні червоні пунктирні лінії позначають: межі керування  $u_{min}, u_{max}$  (графік  $(t, Q)$ ); сумарну витрату палива  $Q_\Sigma$  впродовж процесу зі сталою витратою палива (графік  $(t, Q_\Sigma)$ ); межу допустимого перепаду температур  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$  (графік  $(t, (\theta_1 - \theta_2)_{max})$ ). Вертикальна зелена пунктирна лінія позначає час закінчення перехідного процесу.

Точна модель забезпечує підвищення ефективності керування, швидкості нагрівання, дозволяє зменшити витрати палива. При цьому дотримуються задані обмеження на швидкість нагрівання, що дозволяє мінімізувати обсяги браку.

Неточність моделі призводить до збільшення перепаду температур у гарячій заготовці (зі значним порушенням обмежень), збільшує тривалість перехідного процесу і сумарну витрату пального порівняно з керуванням за наявності точної моделі.

Досліджено вплив вагового коефіцієнта  $w^u$  на показники якості керування в межах  $w^u \in [0; 0,3]$ . Залежність показників якості від  $w^u$  для різних обмежень на  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$  наведено на рис. 3–7. Кольорова шкала вказує на значення  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ , якому відповідає дана крива.

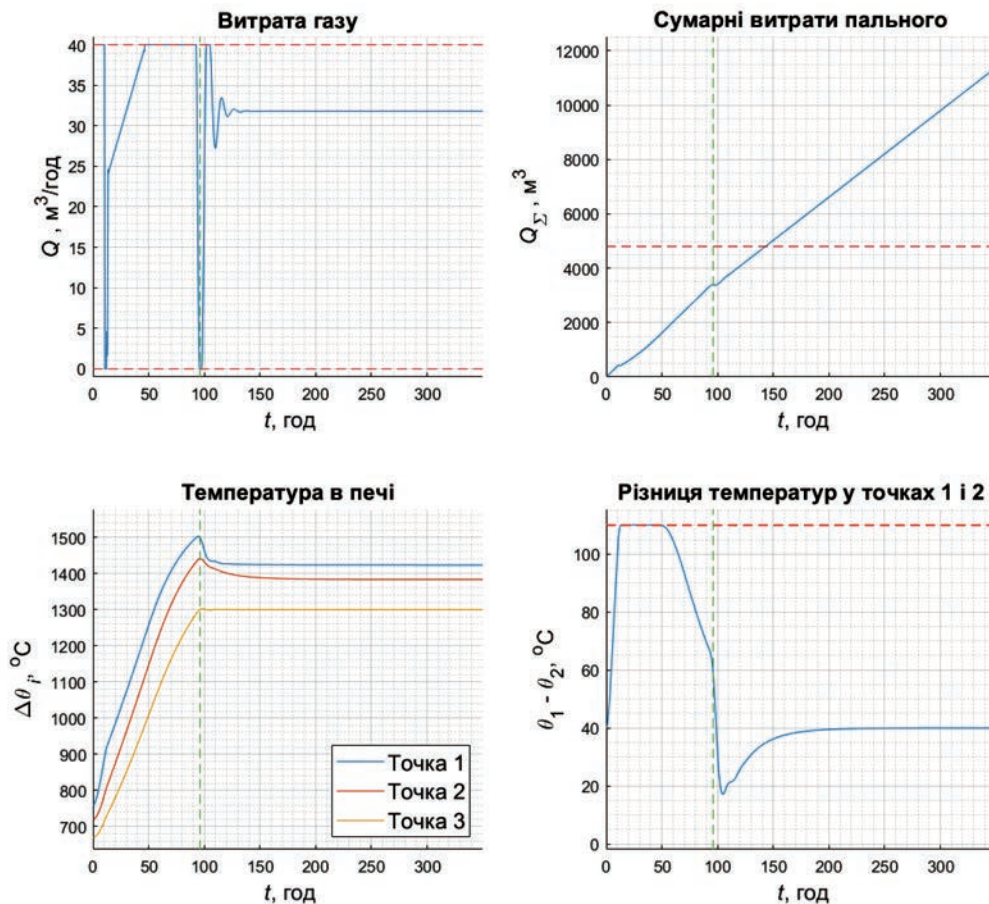


Рис. 1. Перехідний процес з точною моделлю

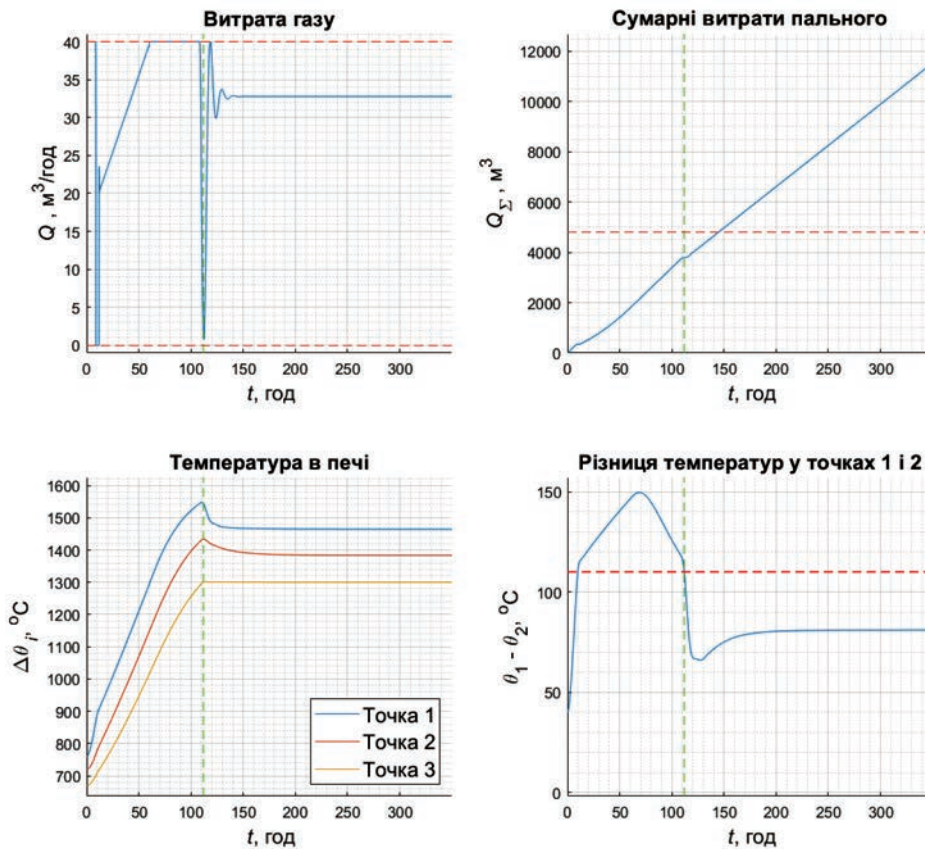


Рис. 2. Перехідний процес із неточною моделлю

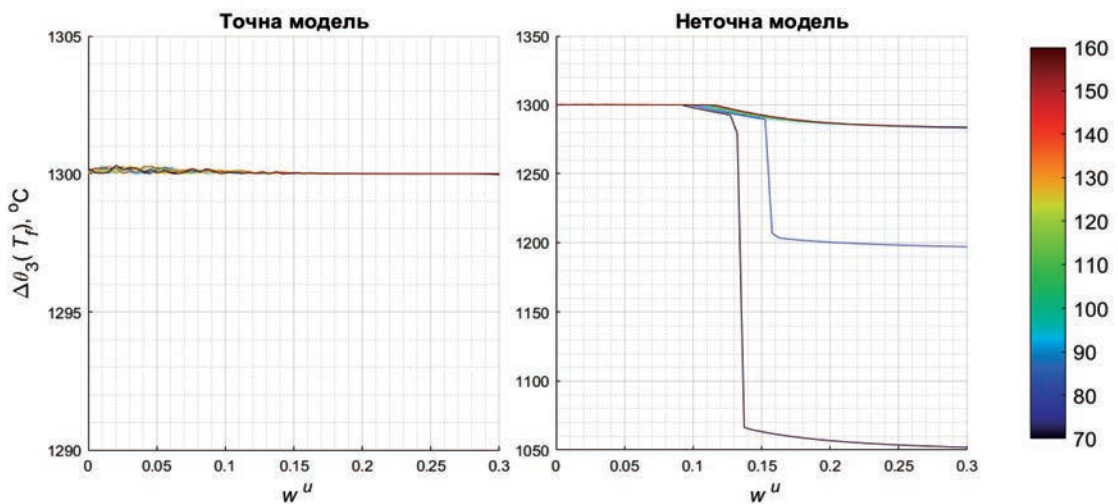


Рис. 3. Кінцева температура точки 3 як функція  $w^u$

З рис. 3 видно, що  $w^u$  практично не впливає на кінцеву температуру точки 3 у випадку точної моделі. Шуми на початковій ділянці можна пояснити способом обчислення тривалості перехідного процесу. Такий шум наявний і в неточній моделі, однак є непомітним через менший масштаб. Різде зниження кінцевої температури з неточною моделлю зі збільшенням  $w^u$  спричи-

нене неможливістю досягнути значення завдання за відведений час.

Фактичний максимальний перепад температур (рис. 4) та його вихід за максимально допустиму межу (рис. 5) свідчать про дотримання обмежень, навіть із недосягненням порогового значення на рівнях 150 і 160°C. Для неточних моделей наявне суттєве перевищення обмеження, і тим більше,



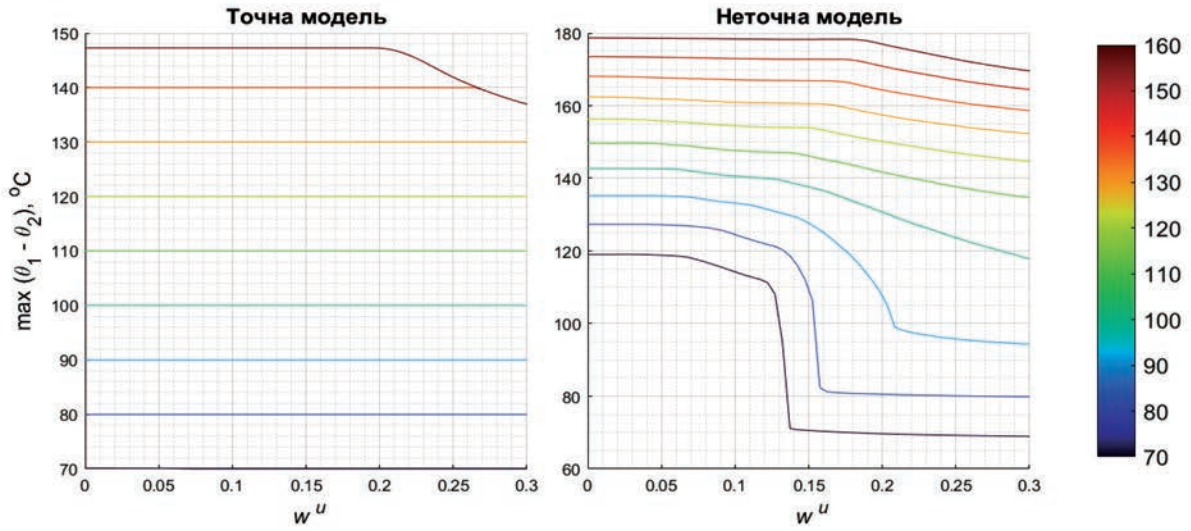


Рис. 4. Максимальна різниця температур точок 1 і 2 як функція  $w^u$

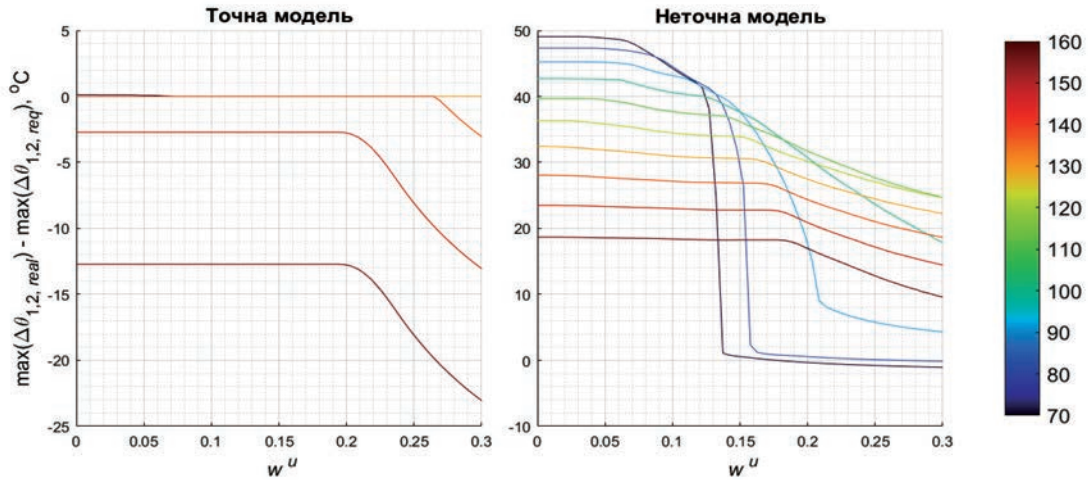


Рис. 5. Різниця допустимої та фактичної максимальних різниць температур точок 1 і 2 як функція  $w^u$

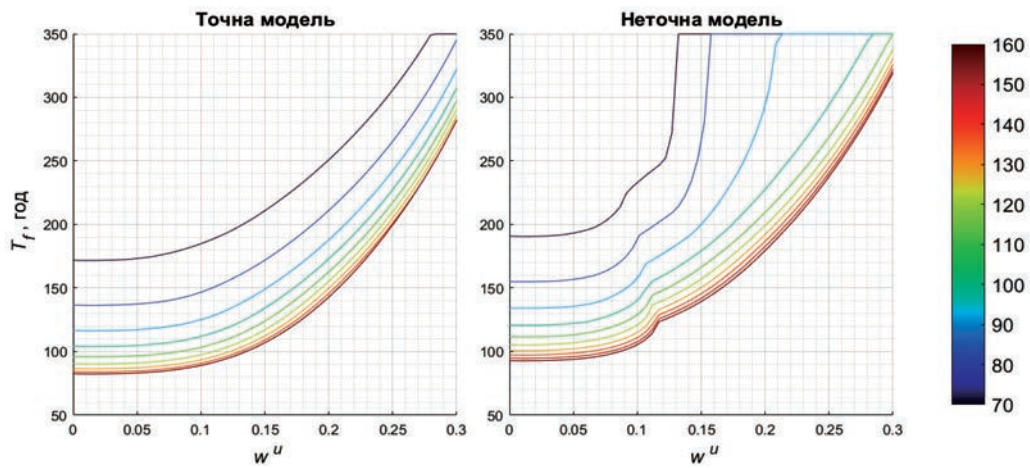


Рис. 6. Тривалість перехідного процесу як функція  $w^u$

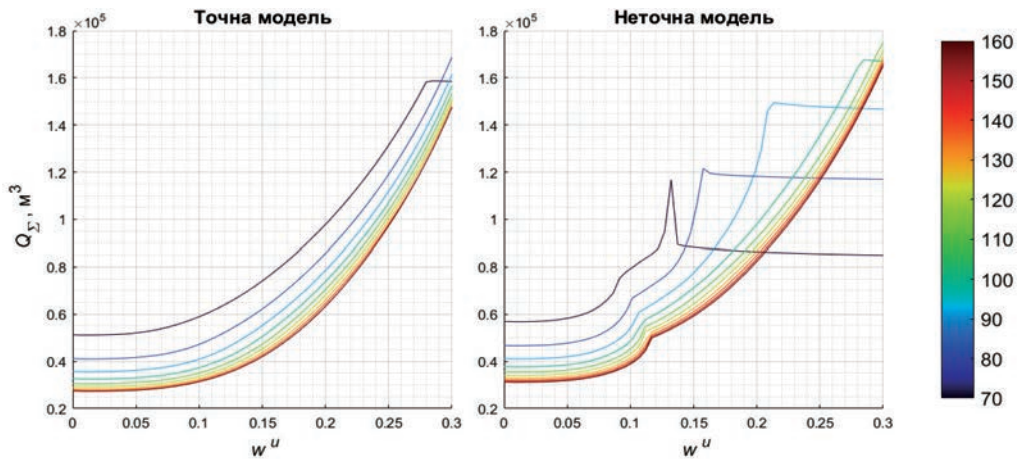


Рис. 7. Сумарна витрата палива як функція  $w^u$

чим меншим є порогове значення. Зміна  $w^u$  не дає практично корисних результатів.

Тривалість перехідного процесу (рис. 6) і сумарна витрата палива (рис. 7) збільшуються разом із  $w^u$ , що свідчить про недоцільність використання  $w^u$  як параметра налаштування в даному випадку. Це також дає опосередковані докази доцільності використання критерію мінімальної швидкодії як рівнозначного критерію мінімальної витрати палива.

На рис. 8 показані графіки зменшення тривалості процесу (враховано лише нагрівання) й витрат палива за цей процес відносного до регламентних (стала витрата газу  $Q = 30 \text{ м}^3$ ,  $T_f = 160 \text{ год}$ ), де за аргумент узято максимальну допустиму різницю температур точок 1 і 2. Якщо  $(\theta_1 - \theta_2)_{max} \geq 80^\circ\text{C}$ , то економія часу й палива складає понад 10 % і понад 15 % відповідно. Обмеження на рівні  $(\theta_1 - \theta_2)_{max} \leq 70^\circ\text{C}$  призводять до збільшення витрат палива й підвищення тривалості процесу порівняно з регламентним.

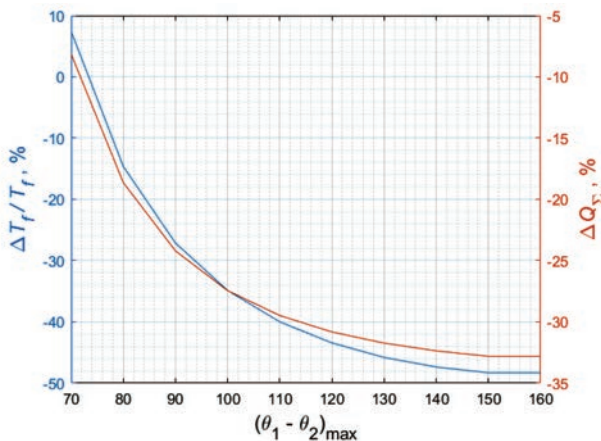


Рис. 8. Залежність відносної економії часу й палива від  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$

Для забезпечення дотримання обмежень можливо налаштувати регулятор на менший максимальний перепад температур, ніж насправді є допустимим. Наприклад, для випадку з  $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 110^\circ\text{C}$  можна задати  $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 70^\circ\text{C}$ . Результати симуляції показано на рис. 9.

З рис. 9 видно, що навіть у цьому випадку не вдалося повністю усунути перевищення допустимого обмеження (на  $5^\circ\text{C}$ ) попри те, що величину обмеження було зменшено на величину порушення його в початковому процесі. Це спричинено тим, що нижче порогове значення призводить до більшого порушення (рис. 5). Окрім того, тривалість процесу зросла зі 110 до 230 год (на 109 %), а витрата палива з 4000 до 6000  $\text{м}^3$  (на 50 %). Це доводить необхідність пошуку альтернативних способів урахування неточності моделювання для забезпечення перебігу процесу в заданих межах.

**Висновки.** На основі моделі було досліджено замкнену систему керування з МП-регулятором залежно від вагового коефіцієнту при величині керуючого впливу (витрати палива) в критерії оптимальності за показниками: кінцеве значення найменшої температури серед заготовок, найбільший перепад температур всередині однієї заготовки, тривалість перехідного процесу, сумарна витрата палива за перехідний процес. Показано недоцільність використання цього коефіцієнта як параметра налаштування регулятора через збільшення тривалості нагрівання та витрат палива на нього. Найкраще керування відповідає нульовому значенню вагового коефіцієнта.

Якщо модель точна, то за допустимого перепаду температур  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$  понад  $80^\circ\text{C}$  МП-регулятор забезпечує дотримання заданих обмежень, при цьому зменшивши тривалість перехідного процесу на 10 % і більше, і зменшивши витрати

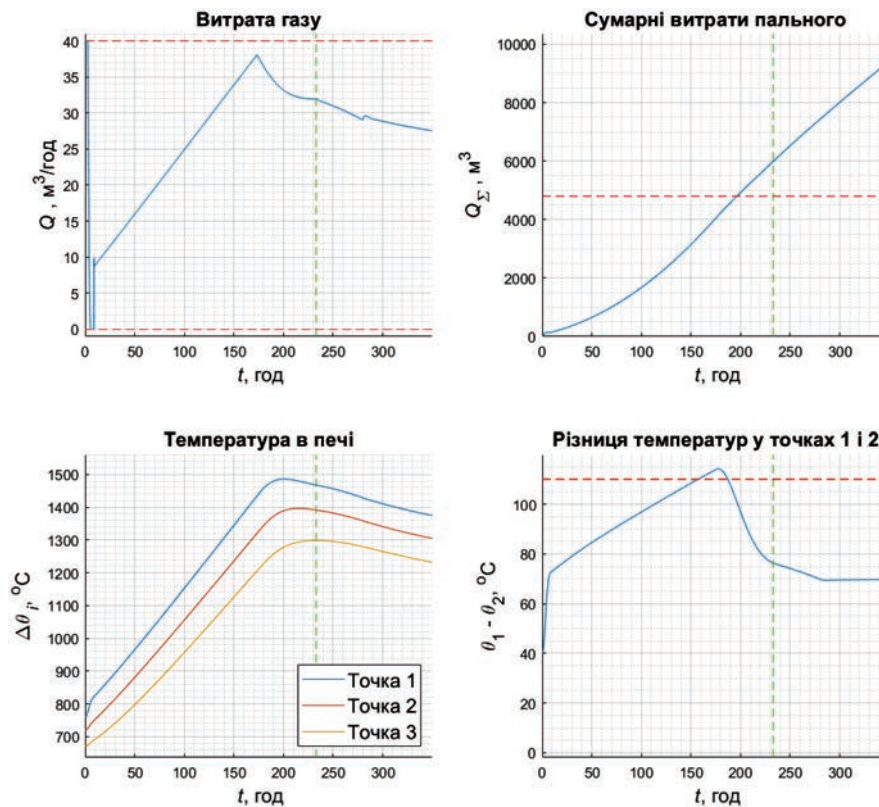


Рис. 9. Перехідний процес з меншим пороговим значенням  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$

палива на 15 % і більше (залежно від обмеження на  $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ ).

Недостатньо точна модель робить якісне керування практично неможливим. Симуляція для обмеження на максимальний перепад температур у  $110^\circ\text{C}$  із заданим для контролера обмеженням у  $70^\circ\text{C}$  показала збільшення три-

валості процесу на 109 % і збільшення витрати палива на 50 %, а також порушення обмеження на  $5^\circ\text{C}$  проти  $40^\circ\text{C}$ , які були зафіксовані раніше. Це доводить необхідність пошуку інших способів пом'якшення негативного впливу неточності моделі на якість керування, що і є предметом подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
2. Жученко О. А. Система керування вуглеграфітовим виробництвом. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 1. С. 72–78.
3. Жученко Л.К. Постановка задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 5. С. 81–85.
4. Жученко А. І., Путятін Р. О. Задача керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2023. № 4. С. 32–34.
5. Жученко А. І., Коржик М. В., Кутузов С. В. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції: монографія / НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», Київ, 2013. С. 201–217.
6. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглеграфітових виробів: дис. докт. філософії: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
7. Жученко О. А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами. *Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнеспроцесів»* 2015. С. 15–25.
8. Zhuchenko O., Korotynskiy A. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process. *Slovak international scientific journal*. 2020. VOL. 2. № 37.
9. Model Predictive Control Toolbox Documentation: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/mpc/index.html> (дата звернення: 13.09.2023).

**Zhuchenko A.I., Putiatin R.O. INVESTIGATION OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL OF THE FIRING PROCESS OF CARBON GRAPHITE PRODUCTS WITH REGARD TO MODEL INACCURACY**

*The efficiency of the model-predictive control system for the burning process of carbon products was investigated when using both accurate (in a certain sense) and inaccurate mathematical models. The following were considered as indicators of control efficiency: the final temperature value in the billet with the lowest temperature, the largest temperature difference in the billet with the highest temperature, the duration of the burning transient, and the total fuel consumption during the transient.*

*Given that the objective of this study was to analyze not so much absolute values as trends in changes in control performance indicators when the parameters of the mathematical model used in the control system deviate from their nominal values, second-order aperiodic links for all studied channels were considered as models. The numerical values of the mathematical models were identified from the experimental data.*

*The article presents the results of a study of the impact of changes in each of the parameters of mathematical models (transmission coefficients, time constants) on control efficiency. These results are qualitative in nature, i.e., they show whether an increase (decrease) in a given parameter contributes (does not contribute) to control efficiency.*

*The peculiarities of the model-predictive control system in terms of using accurate and inaccurate mathematical models are investigated. The conditions for determining the duration of transient processes are formulated.*

*The precise mathematical model improves control efficiency and heating speed and reduces fuel consumption. At the same time, the set limits on the heating rate are observed, which minimizes the amount of rejects.*

*The inaccuracy of the model leads to an increase in the temperature difference in the hot workpiece (with a significant violation of the constraints), increases the duration of the transient process and the total fuel consumption compared to the control based on an accurate model.*

*The necessity of finding alternative ways to take into account the inaccuracies of mathematical models used in the system of modeling and forecasting control of the process of burning carbon products to ensure the process within the specified technological limits is shown.*

**Key words:** control efficiency, MP controller, inaccurate model, control quality, burning, carbon graphite products.

**Киричек Г.Г.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Тягунова М.Ю.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Братчиков В.В.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## СИСТЕМА КЕШУВАННЯ ДАНИХ В РОЗГАЛУЖЕНІЙ МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ

На даний час технологія кешування даних є ключовою в інформаційних системах при забезпеченні їх швидкодії та ефективності. Вона включає збереження копій даних у сховищах швидкої дії, таких як оперативна пам'ять, з метою подальшого доступу до них, без необхідності повторного запиту первинних джерел інформації. Метою роботи є дослідження методів та засобів автоматизації кешування даних у розгалуженій мікросервісній архітектурі та реалізація системи автоматизованого кешування для веб-платформ з метою впровадження етапів кешування даних. Об'єктом дослідження є процес реалізації високопродуктивної системи кешування даних для розгалуженої мікросервісної архітектури із використанням архітектури *token ring* та інструментів синхронізації між нодами. Предметом дослідження є моделі, методи та засоби автоматизації кешування даних у розгалуженій мікросервісній архітектурі. Система реалізована із використанням архітектури *token ring* та має механізми синхронізації між вузлами. Для створення моделі системи та реалізації кешування обрано фреймворк *Spring Boot* та інструмент *Maven* у середовищі *Intelij IDEA*. Процес розгалуженого кешування виконаний за допомогою *Maven*, *Docker* та із використанням власного реалізованого механізму кешування та синхронізації даних для розгалуженої мікросервісної архітектури. Для реалізації системи проаналізовані три популярні мови програмування: *Java*, *Phyton*, *C#* за чотирма основними критеріями: швидкодія, екосистема, підтримка розподілених систем, масштабованість та підтримка операцій. Враховуючи переваги в швидкості, можливості масштабування та наявності великої кількості бібліотек обрана мова програмування *Java*. Авторами проведено дослідження продуктивності системи, в порівнянні з існуючими рішеннями на основі аналізу швидкісних характеристик використання механізму кешування. Реалізована високопродуктивна система кешування даних в розгалуженій мікросервісній архітектурі істотно підвищує якість послуг, які дозволяють зберігати та отримувати доступ до даних швидше, зменшуючи навантаження на сервери та оптимізуючи мережеві ресурси.

**Ключові слова:** *docker, maven, redis, spring, кластер, оптимізація.*

**Постановка проблеми.** Сучасний світ інформаційних технологій відзначається надзвичайною динамікою розвитку та нескінченим потоком даних, які потребують обробки та надійного збереження. Переваги мікросервісної архітектури, що дозволяє будувати розподілені та масштабовані системи є незаперечними [1]. Проте, разом із зростанням об'ємів додатків і збільшенням потоку даних, виникає необхідність в ефективному управлінні цими даними та доступі до них. Тому важливою складовою для забезпечення високої продуктивності в мікросервісній архітектурі є системи кешування даних. Такі системи визначаються як критичний аспект в забезпеченні швидкодії мікросервісних додатків, особ-

ливо в умовах високого навантаження та даних, які надзвичайно швидко змінюються [2]. Кешування дозволяє зберігати ці дані та мати до них доступ швидше, зменшуючи навантаження на сервери та оптимізуючи ресурси [3]. *Memcached* використовує клієнт-серверну архітектуру та зберігає дані у форматі ключ-значення, де кожен ключ пов'язаний з певним значенням. Для реалізації системи кешування найкраще використовувати перевірені та надійні мови програмування і фреймворки [4], а також потрібно добре розумітися в побудові архітектур та знати декілька мов програмування: *Java*, *Javascript*, *Phyton*, або *C#* а також вміти конфігурувати кластер із серверів, наприклад використовуючи *docker-compose* [5].

Середовище IntelliJ IDEA, при реалізації та виконанні коду, аналізує його, виявляє помилки та пропонує належні рішення, а також будує синтаксичне дерево відразу ж при вводі коду [4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Системи збереження та кешування даних відіграють важливу роль у підвищенні продуктивності та швидкості доступу до інформації [2]. Маємо основні поняття та визначення, пов'язані із подібними системами, включаючи Redis (Remote Dictionary Server), Apache Ignite та Memcached. Redis є дистрибутивною системою кешування та збереження даних у пам'яті, яка використовує ключ-значення при збереженні даних та доступу до інформації [6]. Вона використовує клієнт-серверну архітектуру і підтримує різні типи даних, включаючи рядки, хеші (асоціативні масиви), списки, множини та сортовані множини [7]. Apache Ignite є розподіленою системою для збереження даних, яка поєднує в собі функції кешування та обчислення. Архітектура Apache Ignite робить його потужним інструментом при реалізації додатків, які вимагають збільшення швидкості доступу до даних, проведення розподілених операцій і аналітики, дозволяючи покращити продуктивність та надійність додатків, які обробляють великі обсяги даних [6]. Memcached (Memory Cache Daemon) є простою та ефективною системою кешування даних, яка базується на розподіленій пам'яті та відома швидкістю доступу до інформації і легкістю використання [2].

При необхідності синхронізувати дані між нодами, в мікросервісних архітектурах застосовується декілька базових алгоритмів [8]. Алгоритм Лівайна для LSM-дерев (Log-Structured Merge Tree) застосовується в розподілених системах, використовуючи підходи мультиверсійності для оптимізації читання та запису в розподіленому середовищі. Основною перевагою є висока продуктивність та швидкий доступ до даних, що робить цей алгоритм ефективним для розподілених систем з великим обсягом даних. Алгоритм Шутдайна (Conflict-Free Replicated Data Types (CRDT)) є класом алгоритмів з відсутністю конфліктів, які дозволяють синхронізувати дані без необхідності вирішення конфліктів в системах, де можуть виникати асинхронні зміни [9]. І алгоритм Vector Clocks застосовується для визначення порядку подій в розподіленому середовищі. Кожна нода має свій вектор часу, який використовується для визначення, які зміни вже враховані в системі. Перевагами є визначення порядку подій та зменшення конфліктів [10].

**Метою роботи** є дослідження методів та засобів автоматизації кешування даних у розгалуженій мікросервісній архітектурі та реалізація системи автоматизованого кешування для веб-платформ з метою впровадження етапів кешування даних. Об'єктом дослідження є процес реалізації високопродуктивної системи кешування даних для розгалуженої мікросервісної архітектури з використанням архітектури token ring та інструментів синхронізації між нодами. Предметом дослідження є моделі, методи, інструментальні та програмні засоби автоматизації кешування даних у розгалуженій мікросервісній архітектурі.

У рамках дослідження запропоновано логічну модель системи автоматизованого кешування даних. Процес реалізації високопродуктивної та надійної системи, спрямований на вирішення конкретних завдань із синхронізацією на основі архітектури token ring. Архітектура дозволяє підтримувати актуальність даних та забезпечувати консистентність системи навіть в розподіленому середовищі. Під час аналізу існуючих систем та мов програмування враховані найкращі практики та рекомендації із використання Redis, Apache Ignite та Memcached [7–9]. Реалізована система повинна відповідати вимогам надійності та продуктивності і бути інструментом для застосувань в розгалуженій мікросервісній архітектурі, дозволяючи отримувати швидкий доступ на запис та читання даних з кешу.

**Виклад основного матеріалу.** Система кешування даних між мікросервісами використовує вдосконалений алгоритм синхронізації для ефективного управління і підтримки актуальності даних між різними кеш-нодами. Основна мета цього алгоритму полягає в зниженні затримок, пов'язаних із мережею, і забезпеченні консистентності інформації, розподіленої між різними складовими системами. Алгоритм реалізований таким чином, щоб забезпечити ефективне керування синхронізацією даних і уникнути надмірної завантаженості мережі [11]. Це сприяє підвищенню ефективності системи кешування та забезпечує мінімізацію затримок при отриманні актуальних даних. Такий підхід дозволяє системі оперативно реагувати на зміни в даних та забезпечує їх узгодженість в усьому середовищі мікросервісної архітектури [12]. Основні кроки алгоритму включають такі дії: визначення сусідніх нод; ініціалізація синхронізації; обмін даними; підтвердження, оновлення та актуалізація [10].

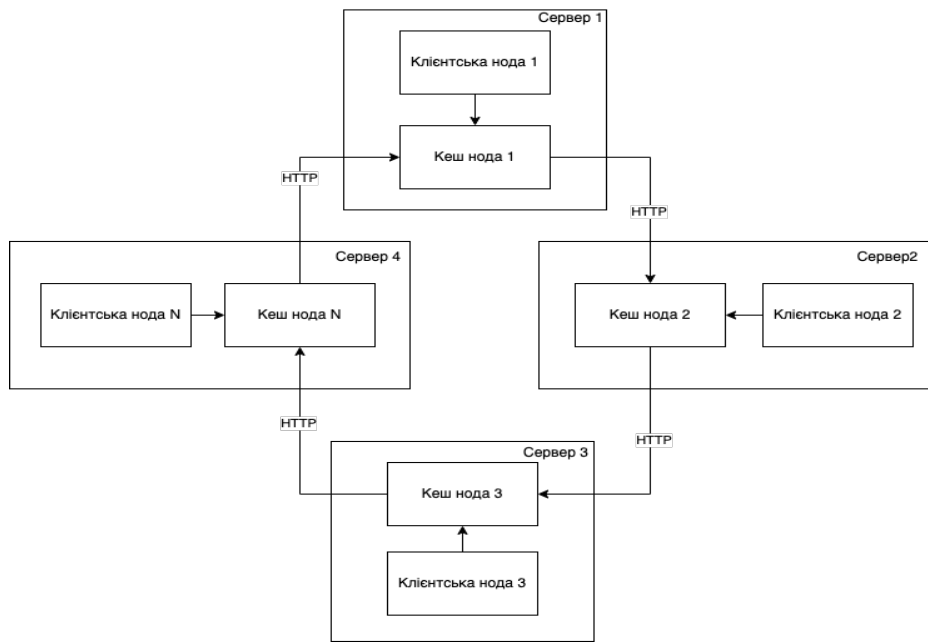


Рис. 1. Логічна схема системи

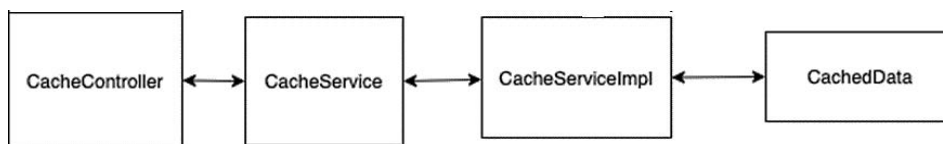


Рис. 2. Логічна схема модулів підсистеми «кеш нода»

Логічна схема системи зображена на рисунку 1.

Реалізація системи застосовує Java [13], Spring Boot та використовує архітектуру MVC, наведемо структуру її основних модулів (рис. 2).

Для створення кеш-ноди, яка передає дані по запиту клієнта та синхронізується із сусідньою нодою за принципом token-ring, реалізуємо модулі для кеш-ноди. CacheController.java є класом контролера, що відповідає за обробку HTTP-запитів від клієнтів та за відповідь на них. Він містить логіку для обміну даними з сусідніми нодами за принципом token-ring. Загалом, CacheController виступає як посередник між клієнтами та кеш-сервісом:

```
@RestController
@RequestMapping("node")
@RequiredArgsConstructor
public class CacheController {
 private final CacheService cacheService;
 @Value("${cache.node.force.delay}")
 private Long forceDelayTime;
 @SneakyThrows
 @PostMapping("{initiator}")
 public ResponseEntity<Object> sync(@RequestBody
 CachedData data, @PathVariable String initiator) {
 sleep(forceDelayTime);
 cacheService.update(initiator, data);
 return ResponseEntity.ok("");
 }
}
```

CacheStorageService.java, клас зберігає локальні дані кешу в оперативній пам'яті та надає доступ до цього сховища:

```
@Service
@Getter
public class CacheStorageService {
 private final Map<String, CachedData> DATA
 = new HashMap<>();
}
```

CacheService.java визначає методи для роботи з кешем, включаючи збереження, отримання та оновлення даних [14]. В ньому визначена логіка для синхронізації з сусідніми нодами:

```
public interface CacheService {
 void sync(String initiator, CachedData data);
 void update(String initiator, CachedData data);
}
```

CacheServiceImpl.java, клас реалізує інтерфейс 'CacheService' та містить логіку для роботи з кешем, включаючи логіку синхронізації з сусідніми нодами за принципом token-ring. Для формування дистрибутиву та керування залежностями використовуємо фреймворк Maven.

Модуль тестування даних запускається окремо і налаштовується для кожної ноди. Цей модуль здатен проводити тестування з навантаженням, створювати нові записи у кеші та зчитувати їх,

а також показувати середній час операцій. Для більшої гнучкості тестування та можливості аналізу даних додані спеціальні параметри для симуляції затримки мережі. Для комплексної перевірки реалізовано тестовий стенд, на базі docker контейнерів [5], які об'єднанні у спільну мережу за допомогою технології docker-compose.

Маючи дані тестувань наведемо показники швидкості систем у вигляді таблиці. Для цього проведено по три тестування, для кожної з трьох нод (табл. 1), записів 1000 генерованих даних і 1000 генерованих даних зі штучною затримкою та по три зчитування, для кожної з трьох нод (табл. 2), 1000 тестових даних і 1000 тестових даних зі штучною затримкою.

Таблиця 1  
Результат з тестування запису 1000 генерованих даних

| № | Нода   | Середній час обробки одного запису, мс | Штучна затримка, мс | Середній час обробки одного запису, мс |
|---|--------|----------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| 1 | Нода 1 | 186                                    | 60                  | 241                                    |
| 2 | Нода 1 | 182                                    | 60                  | 244                                    |
| 3 | Нода 1 | 182                                    | 60                  | 250                                    |
| 4 | Нода 2 | 184                                    | 60                  | 243                                    |
| 5 | Нода 2 | 188                                    | 60                  | 246                                    |
| 6 | Нода 2 | 185                                    | 60                  | 244                                    |
| 7 | Нода 3 | 182                                    | 60                  | 342                                    |
| 8 | Нода 3 | 184                                    | 60                  | 346                                    |
| 9 | Нода 3 | 182                                    | 60                  | 248                                    |

Таблиця 2  
Результат з тестування зчитування 1000 тестових даних

| № | Нода   | Середній час обробки одного запису, мс | Штучна затримка, мс | Середній час обробки одного запису, мс |
|---|--------|----------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| 1 | Нода 1 | 2                                      | 60                  | 62                                     |
| 2 | Нода 1 | 2                                      | 60                  | 62                                     |
| 3 | Нода 1 | 3                                      | 60                  | 63                                     |
| 4 | Нода 2 | 4                                      | 60                  | 62                                     |
| 5 | Нода 2 | 2                                      | 60                  | 64                                     |
| 6 | Нода 2 | 2                                      | 60                  | 62                                     |
| 7 | Нода 3 | 3                                      | 60                  | 64                                     |
| 8 | Нода 3 | 2                                      | 60                  | 66                                     |
| 9 | Нода 3 | 4                                      | 60                  | 62                                     |

Після отримання результатів впровадженої системи стенд змінено на стенд на базі Redis і проведені аналогічні тести.

Результати тестів кеш системи на базі Redis наведено в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3  
Результат запису 1000 генерованих даних на базі Redis

| № | Нода   | Середній час обробки 1 запису, мс | Штучна затримка, мс | Середній час обробки 1 запису, мс |
|---|--------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1 | Нода 1 | 24                                | 60                  | 90                                |
| 2 | Нода 1 | 30                                | 60                  | 88                                |
| 3 | Нода 1 | 28                                | 60                  | 96                                |
| 4 | Нода 2 | 40                                | 60                  | 102                               |
| 5 | Нода 2 | 36                                | 60                  | 94                                |
| 6 | Нода 2 | 38                                | 60                  | 88                                |
| 7 | Нода 3 | 42                                | 60                  | 92                                |
| 8 | Нода 3 | 48                                | 60                  | 94                                |
| 9 | Нода 3 | 48                                | 60                  | 100                               |

Таблиця 4  
Результат зчитування 1000 тестових даних на базі Redis

| № | Нода   | Середній час обробки 1 запису, мс | Штучна затримка, мс | Середній час обробки 1 запису, мс |
|---|--------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1 | Нода 1 | 10                                | 60                  | 78                                |
| 2 | Нода 1 | 12                                | 60                  | 72                                |
| 3 | Нода 1 | 8                                 | 60                  | 76                                |
| 4 | Нода 2 | 16                                | 60                  | 76                                |
| 5 | Нода 2 | 14                                | 60                  | 72                                |
| 6 | Нода 2 | 10                                | 60                  | 80                                |
| 7 | Нода 3 | 16                                | 60                  | 76                                |
| 8 | Нода 3 | 14                                | 60                  | 78                                |
| 9 | Нода 3 | 10                                | 60                  | 78                                |

З метою агрегації результатів і наведення висновків, середні значення по всім операціям наведені у таблиці 5.

Таблиця 5  
Таблиця зі зведеним результатом вимірювань

| № | Нода   | Тип операції | Середній час (реалізація), мс | Середній час (Redis), мс |
|---|--------|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1 | Нода 1 | Запис        | 215                           | 47                       |
| 2 | Нода 2 | Запис        | 216                           | 45                       |
| 3 | Нода 3 | Запис        | 212                           | 48                       |
| 1 | Нода 1 | Зчитування   | 32                            | 40                       |
| 2 | Нода 2 | Зчитування   | 34                            | 44                       |
| 3 | Нода 3 | Зчитування   | 32                            | 46                       |

На рисунках 3 і 4 наведено порівняння результатів запису та зчитування.

Наведені результати вимірювань дозволяють зробити висновки, що попри зменшення швидкості запису нових даних в впровадженій системі досягається приріст в швидкості зчитування даних близько 25%, що є вагомою перевагою для систем з високим навантаженням.



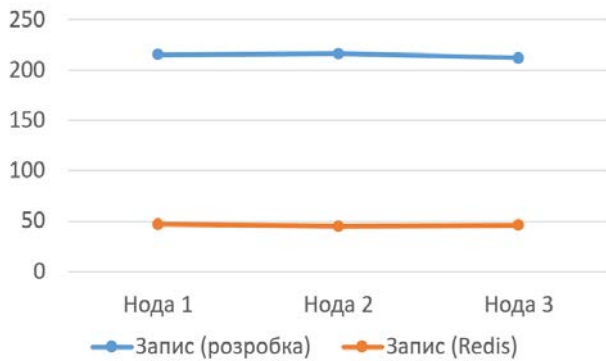


Рис. 3. Графік порівняння результатів запису

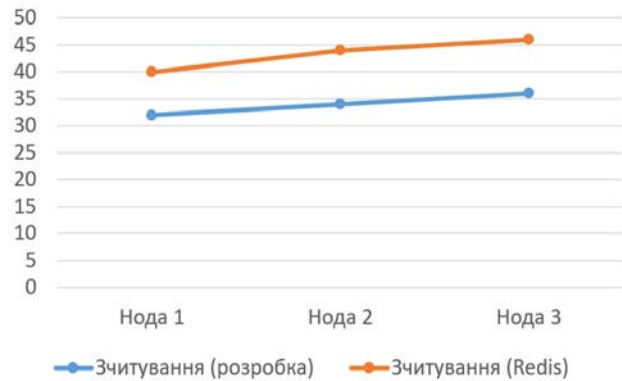


Рис. 4. Графік порівняння результатів зчитування

**Висновки.** У роботі проведено дослідження актуальних на сьогодні методів та алгоритмів реалізації систем кешування даних з використанням різних архітектур та інструментів синхронізації між нодами. У процесі дослідження реалізовано функціональну та високопродуктивну систему, спрямовану на вирішення конкретних завдань. Синхронізація в системі реалізована на основі архітектури token ring та працює надійно. Архітектура дозволяє підтримувати актуальність даних та забезпечувати консистентність системи навіть в розподіленому середовищі. Під час аналізу існуючих систем та мов програмування враховані найкращі практики та рекомендації з використання Redis, Apache Ignite та Memcached. Реалізована система відпо-

відає вимогам, забезпечує надійність та продуктивність і є цінним інструментом для застосувань в розгалуженій мікросервісній архітектурі. Вона дозволяє отримати швидкий доступ на зчитування даних з кешу, так як дані зберігаються локально в кожній ноді і немає необхідності витрачати ресурси на звернення до іншого ресурсу в мережі. Авторами проведено тестування системи та дослідження швидкісних характеристик реалізованої системи у порівнянні з іншим аналогом. Отримані часові характеристики у результаті тестування: для запису даних  $t = 214$  мс для реалізованої системи та  $t = 45$  мс для системи на базі Redis, а також для зчитування даних  $t = 32$  мс для реалізованої системи та  $t = 44$  мс для системи на базі Redis.

#### Список літератури:

1. Киричек Г.Г., Щетінін М.О. Конфігурація серверів з використанням Ansible. *Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects: International scientific conference. Riga, 2021.* P. 15–17.
2. Bazylevych R., Burtnyk R. Algorithms for software clustering and modularization. *In CSIT-2015*, P. 30–33.
3. Киричек Г.Г., Гаркуша В.Ю. Віртуалізація хостів на основі Proxmox VE в умовах надлишкового використання ресурсів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки».* 2021. Вип. 32 (71). № 1. С. 78–84.
4. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережних пристроїв та додатків. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки».* 2021. Вип. 32(71). № 2. С. 229–234.
5. Nickoloff J., Kuenzli S. Docker in action. *Simon and Schuster*, 2019.
6. Acharya S. Apache Ignite Quick Start Guide: Distributed data caching and processing made easy. *Packt Publishing Ltd*, 2018.
7. Nelson J. Mastering redis. *Packt Publishing Ltd*, 2016.
8. Richardson C. Microservices patterns: with examples in Java. *Simon and Schuster*, 2018.
9. Walls C. Spring in action. *Simon and Schuster*, 2022.
10. Newman S. Building microservices. *O'Reilly Media, Inc*, 2021.
11. Kirichek, G., Kyrychek, D., Hrushko, S., Timenko, A. Implementation the Protection Method of Data Transmission in Network. *In: ATIT-2019*, P. 29–132.
12. Balalaie, A., Heydarnoori, A., Jamshidi, P., Tamburri, DA, Lynn, T. Microservices migration patterns. *Software: Practice and Experience*, 48 (11), 2018. P. 2019–2042.
13. Horstmann C. S. Core Java SE 9 for the impatient. *Addison-Wesley Professional*, 2017.
14. Bloch J. Effective java. *Addison-Wesley Professional*, 2017.

**Kyrychek H.H., Tiahunova M.Yu., Bratchykov V.V. DATA CACHING SYSTEM IN DISTRIBUTED MICROSERVICE ARCHITECTURE**

*Currently, data caching technology is key in information systems while ensuring their speed and efficiency. It involves saving copies of data in high-speed storage, such as RAM, in order to access them later, without the need to re-request the original sources of information. The purpose of the work is to research the methods and data caching automation tools in a branched microservice architecture and the implementation of an automated caching system for web platforms with the aim of implementing stages of data caching. The object of research is the process of implementing a high-performance data caching system for a branched microservice architecture using the token ring architecture and synchronization tools between nodes. The subject of research are models, methods and data caching automation tools in a branched microservice architecture. The system is implemented using the token ring architecture and has synchronization mechanisms between nodes. To create a system model and implement caching, the Spring Boot framework and the Maven tool in the IntelliJ IDEA environment were chosen. The distributed caching process is implemented using Maven, Docker, and using our own implemented data caching and synchronization mechanism for distributed microservice architecture. To implement the system, three popular programming languages: Java, Python, C# were analyzed according to four main criteria: speed, ecosystem, support for distributed systems, scalability and support for operations. Given the advantages in speed, scalability and the availability of a large number of libraries, the Java programming language was chosen. The authors conducted a study of the system performance in comparison with existing solutions based on the analysis of the speed characteristics of the caching mechanism use. The implemented high-performance data caching system in a branched microservice architecture significantly improves the quality of services that allow you to store and access data faster, reducing the load on servers and optimizing network resources.*

**Key words:** *docker, maven, redis, spring, cluster, optimization.*

**Kolomoiets S.O.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## INTELLIGENT MEDICAL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

*The article is devoted to the analysis of modern intelligent systems in medicine based on artificial intelligence. The work aims to analyze the promising areas of application of intelligent medical systems based on artificial intelligence, to identify the most promising ones for use in Ukraine and to explore their advantages and disadvantages. The article provides a rationale for the expediency of using AI-based systems, analyzes the disadvantages and ways to eliminate them. One of the key advantages is the ability to analyze huge amounts of medical data and extract useful information from it, which helps doctors in accurate diagnosis, treatment planning, saves time and makes the approach to treatment personalized. The author formulates the main requirements for such systems: filling in personal data by the patient and answering questions before the appointment, initial examination and prescription of tests, operation of an artificial neural network and its conclusions, and verification of all available data by a narrow specialist for the final treatment strategy. It is proposed to consider three main areas of diseases that are the largest causes of death both in Ukraine and in the world. Other important aspects discussed in this article include ensuring the confidentiality of medical data and addressing ethical issues in the use of artificial intelligence in medicine. It also discusses possible obstacles and challenges associated with the introduction of intelligent medical systems. The article emphasizes the importance and potential of intelligent medical systems based on artificial intelligence to improve the efficiency and accuracy of medical diagnosis and treatment. They are of great importance to the medical community and society as a whole and can contribute to improving the overall healthcare system. This work opens up the possibility of improving the process of diagnosing diseases that are difficult to detect and have no clear protocols for treatment.*

**Key words:** artificial intelligence, artificial neural networks, intelligent system, medical diagnostics, training.

**Formulation of the problem.** Modern medicine is on the verge of revolutionary changes due to the active use of artificial intelligence (AI) and the creation of intelligent medical systems. The integration of artificial intelligence into medical practice is becoming a key point in improving the processes of diagnosing, treating, and monitoring patients. Intelligent medical systems capable of analyzing large volumes of medical data enable not only accurate and fast diagnostics, but also provide support in decision-making by medical professionals.

Recent years have witnessed significant advances in the use of AI in medicine. Due to the increasing availability of data, the development of computing technologies, and the advancement of machine learning methods, intelligent medical systems are becoming more efficient and powerful. For example, systems for automated medical image analysis can detect pathologies with impressive accuracy, and health data analysis systems can predict the development of diseases at early stages, allowing for timely intervention and prevention of complications.

However, despite the variety of achievements in this area, there are issues and challenges that require further research and the development of innovative solutions. Ensuring patient privacy, ethical issues of using artificial intelligence in medicine, and the problem of limited and unrepresentative data are just some of the issues that require attention in the context of intelligent medical systems.

**Task statement.** The purpose of the article is to analyze the promising areas of application of intelligent medical systems based on artificial intelligence, to identify the most promising ones for use in Ukraine, and to explore their advantages and disadvantages.

**Analysis of recent research and publications.** After analyzing the research and publications of recent years, we can identify the following promising areas of medical systems based on artificial intelligence:

1. Medical Imaging: AI has made significant advancements in medical imaging, particularly in areas like radiology and pathology. Researchers have been working on AI algorithms that can assist in the detection and diagnosis of various medical

conditions, such as cancer, through the analysis of medical images, including X-rays, MRIs, CT scans, and histopathological slides [1–2].

2. Disease Prediction and Risk Assessment: AI-based systems are being developed to predict the risk of various diseases based on patient data, genetics, and lifestyle factors. These systems can assist in early disease detection and the development of personalized treatment plans [3].

3. Drug Discovery: AI is being used to accelerate drug discovery processes. Researchers are using machine learning models to analyze biological data, identify potential drug candidates, and predict their effectiveness in treating specific diseases [4].

4. Natural Language Processing (NLP): NLP techniques are applied to extract valuable information from electronic health records (EHRs), clinical notes, and medical literature. AI-powered NLP systems help healthcare professionals better understand patient histories and make informed decisions [5].

5. Remote Patient Monitoring: AI-enabled devices and applications are being used for remote patient monitoring, especially for chronic disease management. These systems can collect and analyze patient data in real-time, allowing for timely interventions and reducing the need for frequent hospital visits [6].

6. Robot-Assisted Surgery: AI-driven robotic systems are assisting surgeons in performing complex surgical procedures with enhanced precision and minimally invasive techniques [7].

7. Ethical and Privacy Considerations: As AI becomes more integrated into healthcare, there is a growing focus on addressing ethical concerns and ensuring patient privacy and data security. Research on ethical guidelines and data protection is an important aspect of AI in healthcare [8].

8. Clinical Decision Support: AI-based clinical decision support systems are being developed to provide healthcare practitioners with evidence-based recommendations for patient care, improving diagnosis and treatment planning [9].

9. Healthcare Workflow Optimization: AI is used to streamline administrative tasks, optimize hospital operations, and improve resource allocation, ultimately reducing costs and improving the overall efficiency of healthcare delivery [10].

10. Explainable AI (XAI): Researchers are working on making AI systems more transparent and interpretable, especially in critical healthcare applications where trust and understanding of the decision-making process are essential [11–12].

11. Validation and Regulatory Approval: Ongoing research also focuses on validating AI algorithms and

obtaining regulatory approvals, which are crucial steps in bringing AI-based medical systems into clinical practice [13–14].

#### **Outline of the main material of the study.**

Having analyzed the sources of information, we can identify the main advantages and disadvantages of AI-based medical systems.

##### Advantages of intelligent medical systems:

1. Improved diagnostic accuracy: Intelligent systems can analyze medical images and data with higher accuracy, which helps in the early detection and accurate diagnosis of various diseases, including cancer and other serious pathologies.

2. Improving the effectiveness of treatment: Intelligent systems can develop individualized treatment plans based on patient characteristics, which contributes to more effective and personalized treatment.

3. Reducing time: AI can perform routine tasks and data analysis much faster than humans, allowing healthcare professionals to focus on more complex tasks.

4. Increased accessibility of medical services: Intelligent healthcare systems can be used for remote patient monitoring and telemedicine, reducing geographical limitations on access to healthcare.

5. Reducing human error: Automated systems are less prone to errors, which can improve patient safety and avoid negative consequences from undiagnosed or misdiagnosed diseases.

##### Disadvantages of intelligent medical systems:

1. Ethical issues: The use of AI in medicine raises ethical dilemmas, such as data privacy, responsibility for decisions, and disclaimers in case of errors or incorrect decisions.

2. Data privacy: The collection and processing of medical data during the operation of intelligent systems requires strict adherence to privacy and data protection standards.

3. Training on a limited amount of data: AI models may require a large amount of data to train, and it is sometimes difficult to find the right amount of data for rare diseases or specific populations.

4. Need for human expertise: AI may have limited understanding of context and situations that require human expertise and clinical experience.

5. Cost and infrastructure: Implementing intelligent healthcare systems can require significant hardware and infrastructure support costs.

Let's take a closer look at the disadvantages of intelligent medical systems and whether they can be circumvented. The problem of ethical issues can be solved if the intelligent system is only auxiliary in making a diagnosis and choosing tactics and

treatment regimens, i.e. it will give its conclusions in parallel to the doctor as an auxiliary tool. Data privacy and confidentiality can be ensured through information protection at the level of the state or the institution where the doctor works, and the law on medical confidentiality applies to the doctor.

Training models based on limited data and the problem of non-representativeness are significant challenges in the field of artificial intelligence, especially in tasks related to medicine and other fields. Here are strategies and solutions that can be used to address these issues:

1. Collecting more data: The first step is to try to collect more data if possible. This may involve expanding the database, collaborating with other healthcare institutions, or using additional sources of information

2. Synthetic data generation: Using generative models such as GANs (Generative Adversarial Networks) to create synthetic data can help expand the dataset if real data is not enough.

3. Use of pre-trained models: Using pre-trained models, especially large models with neural networks that have been trained on big data, can provide an improved starting point for a model trained on limited data.

4. Balanced sampling: When using unrepresentative data, sampling methods that increase the representativeness of the samples should be preferred, for example, by using random sampling or weighting the data.

5. Overfitting and regularization: It is important to avoid overtraining the model on limited data. Use regularization techniques and limit model complexity to prevent overfitting.

6. Anomaly and duplicate analysis: Data mining and data processing techniques can be used to remove anomalies and duplicates.

7. Expert input: It is important to incorporate clinical experience and expert knowledge into the model training process, as this can help make more informed decisions.

8. Validation on representative data: Once the model is trained, it is important to validate it with representative data to assess its performance in real-world settings.

9. Combining with other sources of information: Combining information from different sources, such as clinical data, images, and genetic data, can enrich the dataset and improve the quality of the model.

The problem of overcoming training on a limited amount of data can be overcome by involving the largest specialized institutions to create a large sample of data for training the neural network, thereby

solving the problem of the need for human expertise: experts from specialized institutions will provide their comments when training the artificial neural network. The issue of infrastructure cost remains, but if the system is implemented at the local level, rather than at the national or global level, the cost of creation and maintenance will not be high.

Based on the above, we can conclude that the advantages significantly outweigh the disadvantages and the proposed steps can correct the disadvantages.

Comparing the causes of mortality in the world and in Ukraine according to the World Health Organization (WHO) (Table 1). The three leading causes of death in the world and in Ukraine are the same, so it is worth paying attention to cardiovascular disease, cancer, and respiratory disease. Many studies have been conducted that can identify abnormalities for these three diseases using artificial intelligence-based image recognition, so it is worth exploring other aspects of these diseases, namely the recognition and classification of poorly diagnosed diseases, and assistance to primary care physicians in decision-making.

Table 1

**Causes of mortality in the world and Ukraine**

| №  | World                            | Ukraine                    |
|----|----------------------------------|----------------------------|
| 1  | Cardiovascular Diseases          | Cardiovascular Diseases    |
| 2  | Cancer                           | Cancer                     |
| 3  | Respiratory Diseases             | Respiratory Diseases       |
| 4  | Infectious Diseases              | Liver Disease              |
| 5  | Alzheimer's Disease and Dementia | Injuries                   |
| 6  | Diabetes                         | Suicides                   |
| 7  | Kidney Disease                   | Infectious Diseases        |
| 8  | Liver Disease                    | Alcohol-related conditions |
| 9  | Traffic Accidents                | Malnutrition               |
| 10 | Suicides                         |                            |
| 11 | Hypertension                     |                            |
| 12 | Malnutrition                     |                            |

Since patients first go to family doctors or therapists, the algorithm for an intelligent medical system would look like Figure 1.

**Conclusions.** Artificial intelligence is actively used in medicine, its advantages outweigh its disadvantages and make its use expedient. The optimization of the medical system is achieved by improving diagnostics, reducing the workload of medical staff, providing a personalized approach to patient treatment, and making medical care more accessible. The three leading causes of death are cardiovascular disease, cancer, and respiratory diseases. Recently, more and more systems using

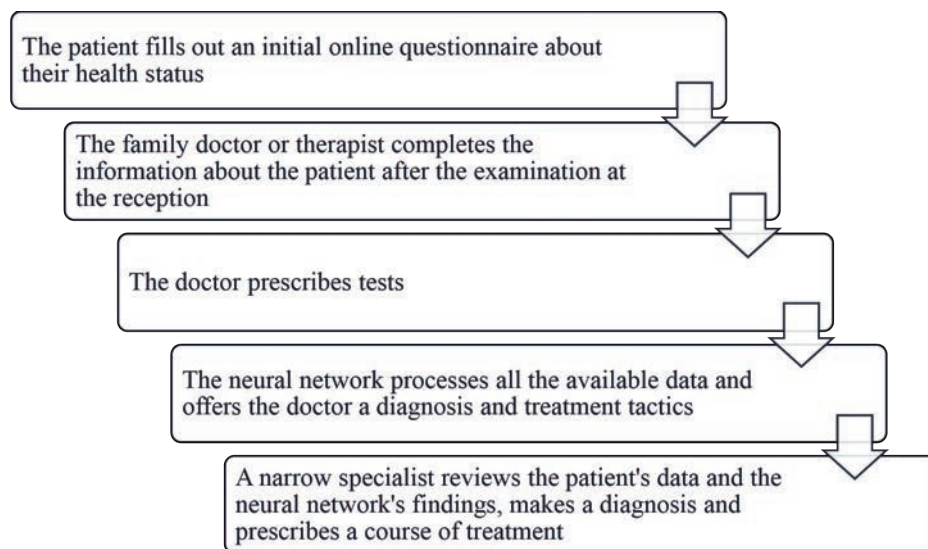


Fig. 1. The algorithm for an intelligent medical system

artificial intelligence have been developed and researched, but the issue of diagnosing and treating difficult-to-diagnose diseases is still a problem for doctors, which reveals a promising area for the application of artificial intelligence in medicine.

Intelligent medical systems based on artificial intelligence have the potential to change the face of medicine, improve the quality of diagnosis and treatment, and make medical care more accessible and efficient.

#### Bibliography:

1. Luís Pinto-Coelho How Artificial Intelligence Is Shaping Medical Imaging Technology: A Survey of Innovations and Applications. *Bioengineering (Basel)*. 2023.
2. Najjar, R. Redefining Radiology: A Review of Artificial Intelligence Integration in Medical Imaging. *Diagnostics*. 2023.
3. Yogesh Kumar, Apeksha Koul, Ruchi Singla, Muhammad Fazal Ijaz Artificial intelligence in disease diagnosis: a systematic literature review, synthesizing framework and future research agenda. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2023.
4. Han R., Yoon H., Kim G., Lee H., Lee Y. Revolutionizing Medicinal Chemistry: The Application of Artificial Intelligence (AI) in Early Drug Discovery. *Pharmaceuticals*. 2023.
5. Xi Yang, Aokun Chen, Nima PourNejatian, Hoo Chang Shin, Kaleb E. Smith, Christopher Parisien, Colin Compas, Cheryl Martin, Anthony B. Costa, Mona G. Flores, Ying Zhang, Tanja Magoc, Christopher A. Harle, Gloria Lipori, Duane A. Mitchell, William R. Hogan, Elizabeth A. Shenkman, Jiang Bian, Yonghui Wu A large language model for electronic health records. *Digital Medicine*. 2022.
6. Thanveer Shaik, Xiaohui Tao, Niall Higgins, Lin Li, Raj Gururajan, Xujuan Zhou, U. Rajendra Acharya Remote patient monitoring using artificial intelligence: Current state, applications, and challenges. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*. 2023.
7. Pradipta Biswas, Sakura Sikander, Pankaj Kulkarni Recent advances in robot-assisted surgical systems. *Biomedical Engineering Advances*. 2023.
8. Li F., Ruijs N., Lu Y., Ethics & AI: A Systematic Review on Ethical Concerns and Related Strategies for Designing with AI in Healthcare. *AI* 2023.
9. Shaikh F., Dehmeshki J., Bisdas S. Artificial Intelligence-Based Clinical Decision Support Systems Using Advanced Medical Imaging and Radiomics. *Current Problems in Diagnostic Radiology*. 2021.
10. Peigong Li, Bastone A., Talal Ali Mohamad, Schiavone F. How does artificial intelligence impact human resources performance. Evidence from a healthcare institution in the United Arab Emirates. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2023.
11. Hulslen, T. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts and Challenges in Healthcare. *AI*. 2023
12. Saranya A., Subhashini R. A systematic review of Explainable Artificial Intelligence models and applications: Recent developments and future trends. *Decision Analytics Journal*. 2023.
13. Gonzales-Gonzalo C., Thee E.F., Klaver C.C.W., Lee A.Y., Schlingemann R.O., Tufail A., Verbraak F., Sanchez C.I. Trustworthy AI: Closing the gap between development and integration of AI systems in ophthalmic practice. *Progress in Retinal and Eye Research*. 2022.
14. Tsopra R. A framework for validating AI in precision medicine: considerations from the European ITFoC consortium. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2021.

**Коломоєць С.О. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕДИЧНІ СИСТЕМИ  
НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

*Стаття присвячена аналізу сучасних інтелектуальних систем в медицині на основі штучного інтелекту. Робота має на меті проаналізувати перспективні сфери застосування інтелектуальних медичних систем на основі штучного інтелекту, визначити найбільш перспективні для використання в Україні та дослідити їх переваги та недоліки. У статті наведено обґрунтування доцільності використання систем на основі штучного інтелекту, розібрані недоліки та шляхи їх усунення. Однією з ключових переваг є здатність аналізувати величезні обсяги медичних даних та виділяти з них корисну інформацію, що допомагає лікарям у точній діагностиці, плануванні лікування, економить час та робить підхід до лікування персоналізованим. Сформульовано основні вимоги до подібних систем: заповнення пацієнтом персональних даних та відповіді на питання до прийому, первинний огляд та призначення аналізів, робота штучної нейронної мережі та її висновки, перевірка вузьким спеціалістом усіх наявних даних для остаточної стратегії лікування. Запропоновано розглянути три основних напрямки захворювань, які є найбільшими причинами смертності як в Україні, так і світі. До інших важливих аспектів, розглянутих у цій статті, належить забезпечення конфіденційності медичних даних та вирішення етичних питань у використанні штучного інтелекту в медицині. Також розглядаються можливі перешкоди і виклики, пов'язані з впровадженням інтелектуальних медичних систем. Стаття підкреслює важливість і потенціал інтелектуальних медичних систем на основі штучного інтелекту для підвищення ефективності та точності медичної діагностики та лікування. Вони мають велике значення для медичної спільноти та суспільства в цілому і можуть сприяти поліпшенню загального стану охорони здоров'я. Ця робота відкриває можливості покращення процесу діагностики захворювань які складні для виявлення і не мають чітких протоколів для лікування.*

**Ключові слова:** інтелектуальна система, навчання, медична діагностика, штучний інтелект, штучні нейронні мережі.

**Комлева Н.О.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## ІНЖИНІРИНГ БІЗНЕС-ВИМОГ ПРИ РОЗРОБЦІ СКЛАДНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ

*У роботі детально розглянуто низку важливих аспектів інжинірингу бізнес-вимог у контексті розробки складних діагностичних систем, визначаючи потенційні проблеми та виклики, які можуть виникнути на різних етапах процесу. Розглянута взаємодія інжинірингу бізнес-вимог із загальною базою знань у сфері інженерії програмного забезпечення, як відображено у SWEBOK (Software Engineering Body of Knowledge), що підкреслює важливість розуміння цього аспекту у контексті діагностичних систем.*

*Показано, що найчастіше виділяють три рівні вимог: бізнес-вимоги як це високорівневі цілі організації або замовників системи, вимоги користувачів та формалізовані системні, функціональні вимоги, обмеження і зовнішні інтерфейси. У роботі акцент зроблено саме на бізнес-вимогах.*

*В аналізі бізнес-вимог до розробки систем діагностики докладно розглянуто різні аспекти, такі як ступінь структуризації проблеми, кількість етапів діагностичних рішень та режим прийняття діагностичних рішень. Виявлено, як ці аспекти можуть впливати на процес визначення бізнес-вимог та на результати самої розробки діагностичних систем.*

*Особлива увага приділена створенню узагальненої схеми проектування та використання систем діагностики, що сприяє кращому розумінню та управлінню різними аспектами процесу розробки. Схема проектування систем діагностики містить наступні складові: модель об'єкта діагностування, яка будується експертами з використанням відповідного інтерфейсу, модель системи діагностики з інтерфейсом налаштування цієї моделі та аналізатор моделі систем діагностики. Схема, яка демонструє робочий режим системи діагностики, містить об'єкт діагностування, складові для первинної обробки даних об'єкта та для обробки даних відповідно до моделі системи діагностики. Оператор керує робочим процесом, отримує результати роботи системи діагностики та виконує їх верифікацію. Ця схема враховує не тільки технічні аспекти, але і бізнес-потреби, що є важливим елементом успішної реалізації діагностичних систем.*

*У контексті формалізації бізнес-правил використано природну мову, що надає можливість більш ефективно та зрозуміло виражати вимоги та правила. Запропонована формалізація визначає чіткі рамки для взаємодії бізнес-вимог із технічними аспектами розробки діагностичних систем, забезпечуючи їхню відповідність та взаємодію на кожному етапі процесу.*

**Ключові слова:** інженерія програмного забезпечення, вимоги, система діагностики, об'єкт діагностування, формалізація бізнес-правил, природна мова.

**Постановка проблеми.** Проблема інжинірингу бізнес-вимог при розробці складних діагностичних систем виникає через недостатню визначеність та змінюваність вимог замовників. Низька точність формулювання бізнес-вимог та їх нестабільність веде до непорозумінь та помилок у процесі розробки. Негативний вплив на процес інжинірингу бізнес-вимог виникає також при нечіткості стратегії управління змінами в бізнес-вимогах. Це може призвести до затримок у розробці та невдач у реалізації діагностичних систем. Крім того, потенційні загрози успішній розробці діагностичних систем можуть виникати через обмеженість фінансових, людських та технічних ресурсів, необхідності інтеграції нових технологій та апаратних рішень, відсутність високого рівня безпеки та конфіденційності даних тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Діагностичні системи знаходять своє застосування в різних сферах життя, де необхідно виявляти або прогнозувати певні стани, хвороби або проблеми. Розглянемо деякі сфери застосування систем діагностики.

Сучасні технології дозволяють створювати медичні діагностичні системи, які можуть виявляти патології та ризики захворювань з високою точністю [1, с. 48]. Це дозволяє рано виявляти хвороби та забезпечувати швидше та ефективніше лікування [2, с. 1].

В технічній галузі системи діагностики використовуються для виявлення несправностей та забезпечення ефективного технічного обслуговування [3, с. 7]. Вони дозволяють визначати потреби у ремонті чи обслуговуванні на основі аналізу даних про функціонування обладнання.



У критично важливих інфраструктурних сферах енергетики та енергозабезпечення, де безпека є надзвичайно важливою, своєчасне та послідовне виявлення та діагностика несправностей стає дуже важливим операційним процесом [4, с. 1387].

При діагностуванні надзвичайно важливо звертати увагу на якість вхідних даних, оскільки точність та репрезентативність вхідної інформації безпосередньо впливають на надійність та ефективність діагностичного процесу [5, с. 110]. Забезпечення чіткості та зрозумілості у представленні результатів діагнозу є ключовим фактором для сприйняття та інтерпретації інформації [6, с. 234].

При розробці у сфері програмної інженерії потрібно орієнтуватись на документ SWEBOOK (Software Engineering Body of Knowledge) [7, с. 1]. Поточна версія якого містить суму з 15 областей знань, в тому числі: software requirements – вимоги до програмного забезпечення (ПЗ), software design – проектування ПЗ, software construction – конструювання ПЗ, software testing – тестування ПЗ, software maintenance – супровід ПЗ, software engineering process – процес програмної інженерії, software quality – якість ПЗ та інші.

Вимога (requirement) – бажана властивість, характеристика або умова діагностичної системи, яку повинна задовольняти ця система в процесі своєї експлуатації. В загальному випадку збір вимог може бути нетривіальним та носити ітеративний характер.

Зазвичай виділяють три рівні вимог:

1. бізнес-вимоги (business requirements), які містять високорівневі цілі організації або замовників системи;

2. вимоги користувачів, які включають бізнес-правила, атрибути якості тощо;

3. формалізовані системні, функціональні вимоги, обмеження і зовнішні інтерфейси.

Для створення діагностичної системи, як і для інших програмних систем, найважливішим документом є документ Концепція («Бачення»). Він створюється на основі вимог двох перших рівнів вимог.

На межі першого і другого рівня знаходиться документ Концепція («Бачення»), який містить вимоги у текстовому вигляді. Це найважливіший документ програмного проекту, який на високому рівні абстракції описує проблему розробки системи діагностики.

Дана робота присвячена інженерії бізнес-вимог до розроблюваних систем діагностики. Інженерії бізнес-вимог враховує не тільки технічні аспекти, але й зосереджується на стратегічних та практичних вимогах, що визначають успіх систем діагностики в контексті бізнес-середовища.

**Метою роботи** є аналіз та формалізація з використанням природної мови бізнес-правил до розробки систем діагностики в залежності від ступеня структуризації проблеми, кількості етапів діагностичних рішень та режиму прийняття діагностичних рішень.

Таблиця 1

**Бізнес-вимоги до систем діагностування залежно від ступеня структуризації проблеми**

| Рівень структуризації проблеми | Опис                                                                                                                                                                                                                                         | Приклад                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гарно структуроване рішення    | Система характеризується чітко визначеними правилами та процедурами, може легко застосовувати алгоритмічні методи для прийняття рішень. Проблеми легко розкладаються на конкретні кроки, для яких існують стандартні процедури та алгоритми. | 1. Автоматизація обробки результатів лабораторних тестів, де є стандартні критерії для інтерпретації результатів.<br>2. Розпізнавання стандартних паттернів на знімках рентгенів для діагностики та класифікації захворювань.<br>3. Моніторинг вітальних функцій: вимірювання та аналіз вітальних показників, таких як пульс, артеріальний тиск та температура, застосовуючи стандартні протоколи. |
| Погано структуроване рішення   | Проблеми менш чітко визначені, і для їх розв'язання необхідно враховувати багато нюансів та варіантів. Вимагається експертний аналіз та врахування багатофакторності.                                                                        | Для розробки ефективного плану реабілітації система повинна враховувати фізичний стан пацієнта, його індивідуальні потреби та динаміку відновлення. Процес погано структурований через велику кількість факторів, які на нього впливають.                                                                                                                                                          |
| Неструктуроване рішення        | Проблема повністю не визначена, і вирішення вимагає творчого підходу та експертного розгляду. Часто можливі кілька альтернативних варіантів рішень.                                                                                          | 1. Розробка стратегії діагностування для нового вірусу або захворювання, які ще не мають стандартних протоколів ідентифікації.<br>2. Визначення діагнозу для пацієнтів із специфічними супутніми захворюваннями.                                                                                                                                                                                   |

Таблиця 2

## Бізнес-вимоги до систем діагностування залежно від кількості діагностичних етапів

| Етапи                     | Опис                                                                                                                          | Приклад                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 етап                    | Діагностичні рішення мають один чітко визначений етап реалізації за стандартною процедурою.                                   | Застосування стандартного алгоритму для визначення типу хвороби.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Мала кількість етапів     | Процес діагностики включає кілька чітко визначених етапів, але їх кількість обмежена і може бути легко врахована та керована. | Розробка плану діагностування пацієнта, який включає набір незалежних послідовних етапів діагностики.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Велика кількість етапів   | Реалізація діагностичного рішення включає велику кількість етапів, і кожен етап вимагає окремого управління та контролю.      | Діагностування хворих з хронічними захворюваннями: створення такої системи може включати аналіз медичних потреб, розробку індивідуалізованих діагностичних планів, впровадження моніторингу стану пацієнтів та системи звітності.                                                                                                                                                                                                             |
| Невідома кількість етапів | Рішення вимагає творчого підходу, і кількість етапів не може бути передбаченою наперед.                                       | 1. Розробка та впровадження нового методу діагностування для рідкісного захворювання, де процес реалізації може змінюватися залежно від отриманих результатів.<br>2. Створення системи медичного діагностування на основі штучного інтелекту, яка використовує алгоритми штучного інтелекту. Цей процес може включати етапи розробки моделей, навчання їх на великій кількості даних, тестування та поетапне впровадження в медичну практику. |

Таблиця 3

## Бізнес-вимоги до систем діагностування залежно від режиму прийняття рішень

| Режим прийняття рішень   | Опис                                    | Приклад                                                                                                                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Індивідуалізований режим | Особисте прийняття діагностичних рішень | Вибір методу діагностування хронічного захворювання.                                                                                                 |
| Груповий режим           | Колективне прийняття рішень             | Ситуація розгляду діагностичного плану для пацієнта зі складними мультисистемними захворюваннями.                                                    |
| Системний режим          | Автоматизоване прийняття рішень         | Використання машинного навчання та аналіз зображень для розпізнавання патологічних ознак на медичних знімках, таких як знімки рентгенів, КТ або МРТ. |

**Виклад основного матеріалу.** Проведемо класифікацію видів рішень для діагностичних систем на прикладі медичної діагностики (табл. 1–3).

На рисунку 1 показана узагальнена схема проектування та використання систем діагностики, яка надає високорівневий огляд ключових етапів їх розробки та експлуатації.

Проектувальник діагностичної системи використовує інтерфейс, який дозволяє створювати та налаштовувати моделі для вирішення конкретних завдань в обраній сфері. Проектувальник може визначати параметри, обирати вхідні дані та конфігурувати параметри аналізу.

Модель системи діагностики є ядром системи та включає в себе методи аналізу та обробки даних. Ця модель відповідає за прийняття рішень, базуючись на налаштованих параметрах та вхідних даних.

Аналізатор моделі відповідає за оцінку її ефективності. Користувачі можуть змінювати параметри моделі, переналаштовувати та адаптувати її до змін в вхідних даних чи вимогах предметної області.

Формулювання бізнес-вимог зручно проводити з використанням природньої мови, зрозумілої для всіх учасників проекту. Для спрощення обробки формулювань, а також забезпечення

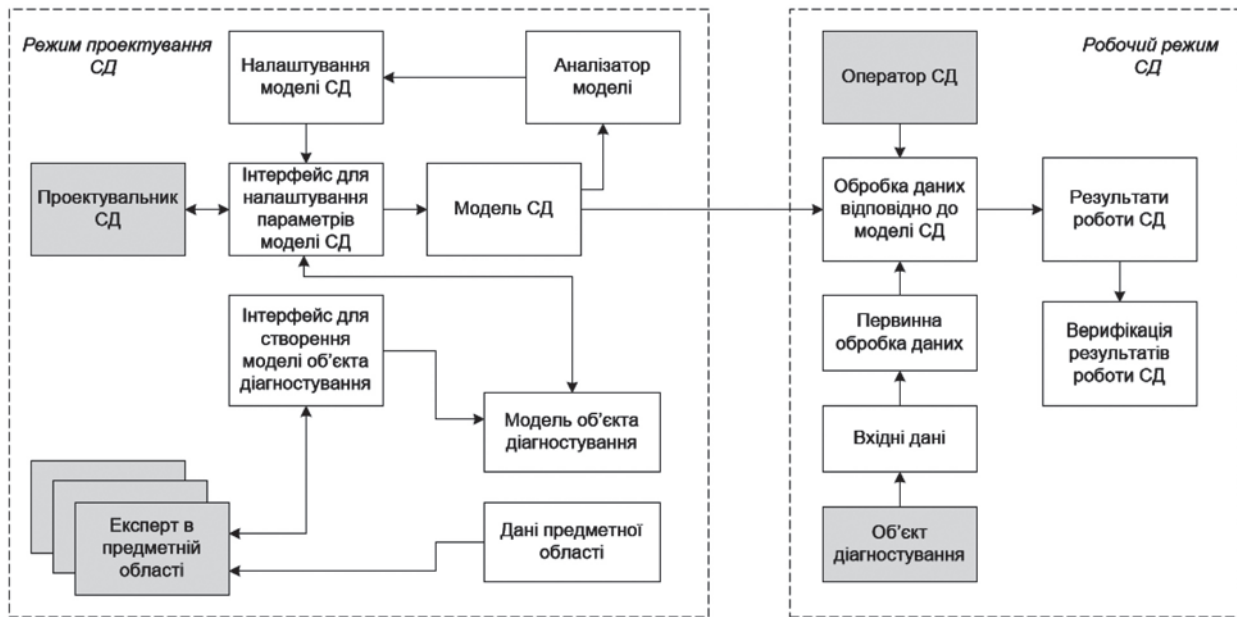


Рис. 1. Узагальнена схема проектування та використання систем діагностики

однозначності та повноти інформації використаємо шаблон: <Складова підмета> <Складова присудка з формулюванням бізнес-вимоги> <Складова другорядних членів речення з уточненням бізнес-вимоги >.

Визначимо формулювання бізнес-вимог з використанням природної мови за вказаним шаблоном для різних аспектів системи на прикладі медичного діагностування.

Діагностика різних захворювань: <Система> <повинна забезпечувати можливість діагностики різних захворювань> <на основі медичних зображень, лабораторних аналізів та інших клінічних даних>.

Висока точність та надійність діагнозу: <Система> <повинна мати високу точність та надійність діагнозу> <для уникнення помилкових результатів та неправильного лікування пацієнтів>.

Можливість інтеграції з медичними інформаційними системами: <Система (модуль інтеграції)> <повинна бути здатна інтегруватися з існуючими медичними інформаційними системами> <для обміну даними та створення єдиної платформи для медичного персоналу>.

Оптимізація часу проведення діагностики та отримання результатів: <Система (модуль налаштування та оптимізації)> <повинна працювати ефективно та оптимізувати час проведення діагностики та отримання результатів> <шляхом автоматизованого аналізу рентгенів, КТ, МРТ та інших зображень>.

Масштабованість: <Система> <повинна бути масштабованою> <для обробки великої кількості

даних та взаємодії з великою кількістю пацієнтів одночасно>.

Захист конфіденційності та безпеки медичних даних: <Система (модуль безпеки)> <повинна забезпечити високий рівень безпеки та конфіденційності медичних даних> <включаючи шифрування, аутентифікацію та контроль доступу>.

Можливість регулярних оновлень та технічної підтримки: <Система (модуль оновлень)> <повинна мати можливість регулярних оновлень та технічної підтримки> <для вдосконалення функціоналу та врахування нових наукових досліджень та медичних стандартів>.

Легка інтеграція нових технологій: <Система (модуль інтеграції або оновлень)> <повинна бути здатна легко інтегрувати нові технології> <зокрема розумні сенсори, штучний інтелект, та інші інновації в галузі медичної діагностики>.

**Висновки.** У роботі розглянуто проблеми інжинірингу бізнес-вимог, які потенційно присутні при розробці складних діагностичних систем. Показано місце вимог до розробки програмного забезпечення у документі SWEBOOK (Software Engineering Body of Knowledge). Проведено аналіз бізнес-вимог до розробки систем діагностики в залежності від ступеня структуризації проблеми, кількості етапів діагностичних рішень та режиму прийняття діагностичних рішень. Створено узагальнену схему проектування та використання систем діагностики. Запропонована формалізація бізнес-правил з використанням природної мови.

**Список літератури:**

1. Komleva N. O., Cherneha K. S., Tymchenko B. I., Komlevoy O. M. Intellectual Approach Application for Pulmonary Diagnosis. *IEEE First International Conference «Data Stream Mining & Processing»*. Lviv. August 23–27, 2016. P. 48–52. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7583505/> DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583505
2. Schütze D., Holtz S., Neff M., Köhler S.M., Schaaf J., Frischen L.S., Sedlmayr B., Müller B.S. Requirements analysis for an AI-based clinical decision support system for general practitioners: a user-centered design process. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. Vol. 23, Is. 1, article No. 144. 2023. Pp. 1–10.
3. Liang R., Ran W., Chen Y., Zhu R. Fault Diagnosis Method for Rotating Machinery Based on Multi-scale Features. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. Vol. 36, Is. 1. 2023. Pp. 1–13.
4. Wang S., Shi Q., Qi K., Ma G., Wang D. A novel priority selection system for nuclear power plant. *10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, NPIC and HMIT*. 2017. Vol. 2, pp. 1387–1396.
5. Крісілов В.А., Комлева Н.О., Бурдейний Є.І Програмна система аналізу якості джерел медичної статистичної інформації. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2019. Том 30 (69) № 5. Ч. 1. С. 109–115. [http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/5\\_2019/part\\_1/19.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/5_2019/part_1/19.pdf)
6. Komleva N. , Liubchenko V., Zinovatna S. Evaluation of the Quality of Survey Data and its Visualization Using Dashboards. 15th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine, September 23-26, 2020. Vol. 2. Lviv, 2020. – P. 234–237. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321970.
7. Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK). URL: <https://www.computer.org/education/bodies-of-knowledge/software-engineering>

**Komleva N.O. ENGINEERING OF BUSINESS REQUIREMENTS  
IN THE DEVELOPMENT OF COMPLEX DIAGNOSTIC SYSTEMS**

*The paper examines in detail a number of important aspects of business requirements engineering in the context of developing complex diagnostic systems, identifying potential problems and challenges that may arise at various stages of the process. The interaction of business requirements engineering with the general software engineering knowledge base as reflected in the SWEBOK (Software Engineering Body of Knowledge) is discussed, emphasizing the importance of understanding this aspect in the context of diagnostic systems.*

*It is shown that three levels of requirements are most often distinguished: business requirements such as high-level goals of the organization or system customers, user requirements and formalized system, functional requirements, restrictions and external interfaces. The work focuses on business requirements.*

*In the analysis of business requirements for the development of diagnostic systems, various aspects are considered in detail, such as the degree of structuring of the problem, the number of stages of diagnostic decisions, and the mode of making diagnostic decisions. It is revealed how these aspects can affect the process of determining business requirements and the results of the development of diagnostic systems.*

*Special attention is paid to the creation of a generalized scheme for the design and use of diagnostic systems, which contributes to a better understanding and management of various aspects of the development process. The design scheme of diagnostic systems includes the following components: a model of the diagnostic object, which is built by experts using the appropriate interface, a model of the diagnostic system with an interface for setting up this model, and an analyzer of the model of diagnostic systems. The scheme, which demonstrates the working mode of the diagnostic system, contains the object of diagnosis, components for the initial processing of the data of the object and for processing the data according to the model of the diagnostic system. The operator manages the work process, receives the results of the diagnostic system and performs their verification. This scheme takes into account not only technical aspects, but also business needs, which is an important element of the successful implementation of diagnostic systems.*

*In the context of the formalization of business rules, natural language is used, which makes it possible to more effectively and clearly express requirements and rules. The proposed formalization defines a clear framework for the interaction of business requirements with the technical aspects of the development of diagnostic systems, ensuring their compliance and interaction at each stage of the process.*

**Key words:** software engineering, requirements, diagnostic system, diagnostic object, formalization of business rules, natural language.

**Корнійчук О.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Граф М.С.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ КОНФІДЕНЦІЙНОСТІ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НА ПРИКЛАДІ ПОБУДОВИ МАЙДАНЧИКУ ДЛЯ ДЕРЖАВНИХ ЗАКУПІВЕЛЬ

Ця стаття присвячена дослідженню методів та алгоритмів забезпечення конфіденційності у децентралізованих системах, з особливим акцентом на розробку платформи для державних закупівель на основі технології блокчейн. У світлі актуальності теми конфіденційності даних у децентралізованих мережах, особливо у сфері державних закупівель, автори провели всебічний аналіз існуючих криптографічних методів, таких як міксування, кільцеві підписи, схеми зобов'язань, гомоморфне приховування та докази з нульовим розкриттям інформації, з метою виявлення їхньої ефективності у забезпеченні приватності особистості користувача та захисту даних.

Основна увага була зосереджена на неінтерактивних доказах з нульовим розкриттям інформації та гомоморфному шифруванні, які виявилися ключовими в контексті реалізації приватності та конфіденційності в блокчейн-платформах для державних закупівель. Автори розкривають важливість встановлення балансу між прозорістю операцій, ефективністю обробки транзакцій та забезпеченням належного рівня конфіденційності даних, враховуючи вимоги, такі як GDPR. Підкреслюється, що використання сучасних криптографічних методів може забезпечити необхідний рівень приватності без втрати переваг децентралізації, що є ключовим для успішної інтеграції блокчейн-технологій у сферу державних закупівель.

Дослідження акцентує увагу на значній ролі різних криптографічних методів у розв'язанні викликів, пов'язаних із забезпеченням конфіденційності в блокчейн-системах, особливо у контексті державних закупівель, де вимоги до прозорості та конфіденційності є одночасно високими. Висвітлюються можливості та обмеження кожного з аналізованих методів, надаючи чітке розуміння того, як кожен з них може бути використаний для досягнення оптимального балансу між безпекою та ефективністю в державних закупівлях. Такий підхід дозволяє забезпечити комплексне вирішення проблеми конфіденційності у децентралізованих системах, відкриваючи нові перспективи для розвитку блокчейн-технологій у державному секторі.

**Ключові слова:** блокчейн, державні закупівлі, електронні майданчики, методи збереження конфіденційності, Zero-Knowledge Proof, шифрування.

**Постановка проблеми.** Застосування децентралізованих мереж було завжди досить складною задачею, разом з тим однією з найперспективніших технологій наразі є блокчейн. Концепт, який був запропонований у 2008 році Сатоші Накамото через революційну публікацію про Біткоїн, швидко став однією з найперспективніших технологій сучасності. Його основні переваги, такі як децентралізація, резистентність даних та прозорість, відкрили широкі можливості для різноманітних сфер застосування – від криптовалют до системи смарт-контрактів. Однак, разом з ростом популярності та розширенням можливостей блокчейну, постали його обмеження та виклики. Одним з ключових викликів є питання конфіденційності даних, що стає особливо значущим

у контексті використання блокчейну в будь-яких системах, особливо державних, таких як публічних закупівлях.

Блокчейни за своєю природою поділяються на закриті та відкриті системи. Закриті для задач, в яких відкритість даних є одним з пріоритетів, не підходять за своєю сутністю [1]. Саме публічні блокчейни є прозорими та відкритими реєстрами, що, з одного боку, забезпечують надійність та прозорість угод, але з іншого – викликають питання захисту приватності інформації. Подібні проблеми з конфіденційністю ставлять під сумнів можливість широкого впровадження блокчейну в сферах, де чутливість даних є критичною, зокрема в державних закупівлях.

У державних закупівлях прозорість та швидкість прийняття рішень є фундаментальними, але

забезпечення конфіденційності даних не менш важливе. Захист особистих даних та відповідність загальному регламенту захисту даних, прийнятому в межах законодавства Європейського союзу (англ. General Data Protection Regulation або GDPR), ставлять перед блокчейном нові завдання. Вирішення цих задач вимагає комплексного підходу, який поєднує технологічні інновації та юридичну відповідність. Це включає інтеграцію передових криптографічних методів та розробку архітектурних рішень, які можуть гарантувати конфіденційність без втрати переваг децентралізації.

Отже, розробка блокчейн-платформи для державних закупівель, яка балансує між прозорістю, швидкістю обробки транзакцій та конфіденційністю, є надзвичайно важливою та актуальною. Це створює потенційний напрямок для дослідження, що об'єднує в собі технологічні інновації та відповідність сучасним вимогам захисту даних.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Задачу забезпечення приватності поділяють на дві основних категорії, що зображені на рисунку 1 – це забезпечення приватності особистості користувача, щоб не було можливості встановити взаємозв'язок між користувачем та транзакцією, яку він зробив, та збереження приватності самих даних задля запобігання розкриття їх третім особам, що не мають мати доступу до них.

В рамках статті було проаналізовано 6 статей і вибрано дві для детального огляду, серед

яких «Privacy-preserving solutions for Blockchain: review and challenges» [3] та «A Survey on Privacy Vulnerabilities in Permissionless Blockchains» [4], автори яких детально наводять приклади алгоритмів та методів, які застосовуються для цих задач. Серед алгоритмів, які займаються забезпеченням конфіденційності особистості користувача можна виділити наступні категорії:

1. Міксування (Mixing);
2. Кільцевий підпис (Ring Signatures);
3. Схеми зобов'язань (Commitment schemes);
4. Гомоморфне приховування (Homomorphic hiding);
5. Докази з нульовим розкриттям інформації (Zero-Knowledge Proofs).

В свою чергу алгоритми, що покликані захистити дані складаються з наступного списку:

1. Диференціальна конфіденційність (Differential Privacy);
2. Докази з нульовим розкриттям інформації (Zero-Knowledge Proofs);
3. Гомоморфне приховування (Homomorphic hiding).

Чітко видно, що деякі категорії алгоритмів повторюються між собою, це пов'язано з тим, що деякі алгоритми незважаючи на свою категорію однаково добре підходять для обидвох задач або використовують різні алгоритми однієї і тієї самої категорії. Водночас для вирішення задач з побудови майданчика для державних закупівель важливим є обидва типи задач, оскільки потрібно

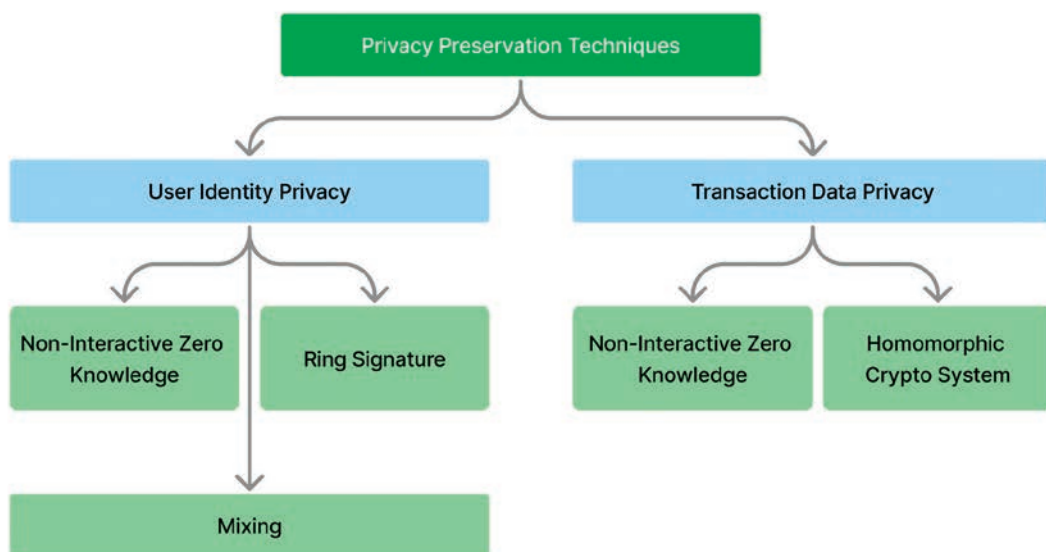


Рис. 1. Умовний поділ алгоритмів на ті, що забезпечують приватність користувача та даних користувача

вирішити не тільки задачу приховування деталей пропозиції на умовному тендері, а також захистити дані самого замовника, тобто користувача.

**Метою статті** є проведення аналізу найбільш вживаних алгоритмів та методів забезпечення конфіденційності особистості користувача та його даних в децентралізованих мережах.

**Викладення основного матеріалу.** В рамках побудови системи для проведення державних закупівель необхідно чітко розуміти які дані і яким чином потрібно захистити. Питання конфіденційності наразі є критично важливим не тільки для створення конкретної системи, а для масового впровадження до побудови систем децентралізованого підходу, що допоможе суттєво підвищити інші показники [5]. Саме тому для вирішення цих задач існує велика множина алгоритмів, кожен з яких має свій підхід для забезпечення конфіденційності. Розглянемо їх більш детально.

**Міксування** – це методи, що використовуються для анонімізації різних послуг із множиною користувачів. Започатковані у 1981 році для анонімізації електронної пошти, ці методи базуються на групуванні всіх повідомлень від різних користувачів, їх затримці, а потім пересиланні одночасно або в випадковому порядку. Це робить неможливим кореляцію між дією користувача щодо створення повідомлення і його рухом у мережі. Однак, ця техніка не допомагає вирішити проблему персональної інформації, яка може бути в повідомленні.

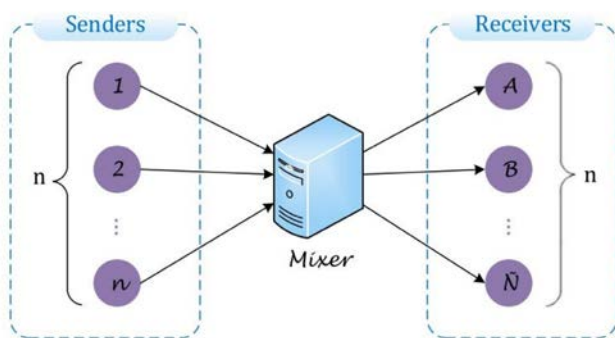


Рис. 2. Архітектура міксувального сервісу [6]

Централізоване міксування використовує веб сайти для анонімізації транзакцій, де користувачі обмінюються транзакціями з метою приховування зв'язків між вхідними та вихідними операціями. Хоча ці веб-сайти пропонують послуги міксування за плату, вони мають низку обмежень, таких як вразливість до атак відмови в обслуговуванні (англ. distributed denial-of-service або DDOS), оскільки централізований міксер залиша-

ється однією точкою збою. Це стає перешкодою для розподіленої природи блокчейн-мережі, де централізація служб міксування суперечить базовому принципу децентралізації.

На протигагу централізованому міксуванню, децентралізоване міксування пропонує підхід, що дозволяє групі недовічених користувачів публікувати свої повідомлення одночасно та анонімно без потреби в посередництві третьої сторони. Це виключає необхідність плати за міксування та знижує ризик DDOS-атак.

Однак, незважаючи на переваги міксувальних служб у забезпеченні анонімності ідентичності, вони мають власні проблеми. Користувачі міксувальних служб зіштовхуються з високою затримкою очікування, оскільки їм потрібно чекати, поки інші учасники створять свої транзакції, щоб приховати зв'язки між вхідними та вихідними операціями. Це веде до затримок у завершенні транзакцій. Крім того, більшість міксувальних серверів – це веб-сайти або інше програмне забезпечення третіх сторін, що робить їх ненадійними в контексті усунення проблем конфіденційності в блокчейн-мережах. Існує також ризик зловмисного використання міксувальних служб, оскільки сервер має інформацію про всі вхідні та вихідні пари, і приватність в цьому випадку залежить від чесності посередника. Крім того, міксувальні служби зазвичай вимагають оплати за приховування ідентичності користувачів.

Проведення державних закупівель має певні строки і кінцеві дати, саме тому недолік у вигляді недетермінованого часу завершення транзакцій може суттєво вплинути на їх результати.

**Ring Signature або Кільцевий підпис.** Кільцеві підписи в криптографії є одним із різновидів підписів, які використовуються для досягнення анонімності в блокчейнах. Цей метод був вперше представлений у 2001 році Рональдом Ривестом. Основна ідея кільцевого підпису полягає в тому, що користувач обирає групу учасників для створення кільця, включаючи себе. Кожен учасник у кільці має публічний ключ. Один з користувачів підписує повідомлення своїм приватним ключем та публічними ключами всіх інших учасників. Вузол, що верифікує, знає, що один з членів підписав повідомлення, але не може визначити, хто саме це зробив, таким чином досягаючи анонімності.

Механізм роботи кільцевого підпису можна порівняти з підписом на чеку спільного банківського рахунку, де всі учасники підписують транзакцію своїми публічними ключами разом із приватним ключем ініціатора. Після того, як кожен

учасник кільця підписав транзакцію, вона подається на перевірку та верифікацію.

Основні переваги кільцевих підписів включають неможливість підробки та анонімність. Анонімність поділяється на такі властивості, як невідстежуваність та невстановлюваність. Невстановлюваність означає, що верифікатор не може визначити зв'язок між двома транзакціями, а невідстежуваність – що підписувача не можна ідентифікувати. Ці властивості призвели до розвитку декількох протоколів забезпечення приватності на основі кільцевих підписів, які широко використовуються в блокчейн-мережах.

Однак існують і певні проблеми з кільцевими підписами. Наприклад, великий розмір кільця означає збільшення кількості учасників, що може підвищити ризик деанонізації. Транзакції з кільцевим підписом великі за розміром, що може становити проблему для масштабування блокчейнів через потребу у більшому обсязі пам'яті для зберігання записів усієї блокчейн-мережі. В рамках системи тендерів кількість учасників обмежена певним числом, що в цілому нівелює ризик деанонізації шляхом створення через великий розмір кільця.

**Протоколи доказу нульового розкриття.** Протоколи доказу нульового розкриття (англ. Zero-Knowledge Proof або ZKP), запроваджені у 1980-х роках, стали однією з найбільш широко використовуваних криптографічних технік для забезпечення передачі активів через розподілену мережу блокчейну на основі peer-to-peer мережі з покращеним рівнем конфіденційності. Метою доказів нульового розкриття є підтвердження справжності транзакції без надання верифікатору будь-яких даних про транзакцію [7]. Концепція полягає в тому, що засвідчувач має сформулювати формальний доказ, щоб довести істинність певного твердження, не надаючи верифікатору жодної додаткової та корисної інформації. Варіант ZKP, відомий як non-interactive zero-knowledge proof, широко використовується у блокчейнах, оскільки він виключає необхідність взаємодії між засвідчувачем та верифікатором, замість цього вимагаючи лише одного повідомлення, яке має бути відправлене від засвідчувача до верифікатора. Важливо зазначити, що не всі схеми ZKP є не взаємодіючими.

Більшість протоколів ZKP, які є в літературі, є взаємодіючими (interactive), що означає що засвідчувач має відповідати на різні повідомлення, які надсилає верифікатор, що призводить до багаторазових раундів спілкування. Однак для блокчейнів та інших технологій розподіленого рес-

стру бажано уникати спілкування, оскільки вузли верифікації не можуть належним чином домовитися про те, як обирати ці повідомлення, через те, що в багатьох конструкціях їх потрібно обирати випадково, тоді як алгоритм верифікації має бути детермінованим для досягнення консенсусу або це зробить складність комунікації системи дуже слабкою. Ця властивість робить non-interactive ZKP придатними для анонімної та розподіленої верифікації повідомлень у блокчейнах.

Концепція вперше з'явилася у 1985 та призначена для створення протоколів збереження конфіденційності в мережах блокчейнів.

Non-interactive ZKP мають відповідати наступним трьом властивостям:

1. Повнота: все, що є істинним, має доказ.
2. Обґрунтованість: все, що може бути доведено, є істинним.
3. Нульове розкриття: значення відкривається лише коли є доведеним.

Протоколи доказу з нульовим розкриттям мають свої недоліки, такі як складність обчислень, оскільки перевірка та створення доказів може вимагати значних обчислювальних ресурсів, складність реалізації системи та, порівняно з іншими алгоритмами, гірша масштабованість. Але при правильному проектуванні та завчасно визначеними вимогами до системи можна досягти збалансованого використання цих протоколів чим суттєво підвищити безпеку системи в цілому.

**Homomorphic hiding або Гомоморфне приховування.** Ще одним методом обміну даними та виконання операцій над ними без розкриття приватних значень є гомоморфне шифрування, яке походить від приватного гомоморфізму, запропонованого Рональдом Ривестом у 1978 році. У цьому випадку функція шифрування має певні властивості, що дозволяють виконувати операції над зашифрованим текстом та отримувати зашифрований результат, так само ніби операції були виконані над відкритим текстом, а потім зашифровані за допомогою тієї ж функції шифрування.

Одним з найкращих прикладів гомоморфного приховування є схема шифрування RSA. Задано публічний ключ  $(e, n)$  та приватний ключ  $(d)$ , цілі числа, які відповідають рівності  $n = p \cdot q$ , де  $p$  та  $q$  є простими числами, та  $d \cdot e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$ . Шифрування повідомлення  $x$  визначається за формулою

$$E(x) \equiv x^e \pmod{n}, \quad (1)$$

Тоді множення групи є гомоморфною властивістю шифрування RSA:

$$E(x) E(y) = x^e y^e \equiv (xy)^e \pmod{n} = E(xy), \quad (2)$$



Гомоморфне приховування є одним із фундаментальних інструментів для створення zk SNARKs та приватних розподілених обчислень загалом, що є схемою доведення-верифікатора, яка використовується у блокчейні.

Ще одне пряме використання гомоморфного шифрування у блокчейні – це пари ключів ECDSA Bitcoin, які мають адитивні та мультиплікативні гомоморфні властивості. Пара ключів  $(a, A)$ , відповідно приватні та публічні значення, та інша пара  $(b, B)$  можуть створити третю дійсну адресу Bitcoin, додавши ключі як  $(a+b, A+B)$ . Це створює можливість використання адреси  $(a+b, A+B)$  заволодівши парою ключів  $(b, B)$  та отримавши приватний ключ  $(A+B)$ . Таким чином, користувач може продати свою адресу іншому, не маючи потреби захищати доставку приватного ключа  $b$ , а лише користувач з приватним ключем  $a$  зможе використовувати  $(a+b, A+B)$ .

**Схеми зобов'язань.** Схеми зобов'язань є фундаментальною концепцією в криптографії та безпечному зв'язку. Вони є аналогічними до цифрового еквіваленту «запечатаних конвертів» і відіграють важливу роль у різних криптографічних протоколах, включаючи безпечне голосування, системи аукціонів та докази з нульовим розкриттям інформації.

Суть схем зобов'язань полягає в тому, що одна сторона (той, хто дає зобов'язання) зобов'язується щодо певного значення, одночасно тримаючи це значення в таємниці від інших. Пізніше, ця сторона може розкрити зобов'язане значення. Процес складається з двох основних етапів: етап зобов'язання, де сторона обіцяє певне значення, не розкриваючи його, і етап розкриття, де це значення стає відомим і може бути перевіреном.

Основні властивості схем зобов'язань включають:

1. Незмінність: після надання зобов'язання, його не можна змінити.
2. Приховування: в зобов'язанні не міститься інформації про фактичне значення до моменту його розкриття.

Ці властивості забезпечують, що зобов'язання може бути використане як надійний спосіб захисту інформації, а також як інструмент для створення довіри в цифрових взаємодіях. Схеми зобов'язань є ключовим елементом у багатьох аспектах криптографічної безпеки і мають широке застосування в сучасних цифрових системах.

Схеми зобов'язань та докази з нульовим розкриттям інформації (ZKP) відіграють взаємопов'язані ролі у криптографії, особливо у контексті державних закупівель. Схеми

зобов'язань дозволяють учаснику системи зобов'язатися щодо певного значення, приховуючи його до моменту розкриття. Це важливо для забезпечення надійності та повноти інформації в процесах, де важливим є гарантування правдивості даних, наприклад, у аукціонах або при поданні тендерних пропозицій.

З іншого боку, ZKP дозволяє стороні довести іншій стороні істинність певного твердження без розкриття будь-якої конкретної інформації, крім самого факту істинності твердження. Це особливо корисно у контексті забезпечення конфіденційності та безпеки в системах державних закупівель, де важливо встановити достовірність інформації, не розкриваючи чутливих даних.

У системах державних закупівель схеми зобов'язань можуть використовуватися на етапі подання тендерних пропозицій, де учасники зобов'язуються надати певну інформацію або пропозицію без її розкриття до визначеного моменту. Це дозволяє забезпечити чесність та прозорість процесу тендеру.

ZKP, у свою чергу, можуть використовуватися на етапі верифікації пропозицій, щоб переконатися у їхній відповідності вимогам без необхідності розкриття деталей пропозиції до моменту відбору переможця. Це допомагає забезпечити конфіденційність інформації та захист від недобросовісної конкуренції.

Описані методи, що дозволяють вирішувати проблеми конфіденційності користувача та його даних, мають певні недоліки, серед яких найбільш поширеним є складність обчислень, оскільки для кожного алгоритму та методу необхідно проводити певний об'єм обчислень, на що витрачається час, який має бути детермінований в децентралізованих системах для стабільної роботи. Вирішенням конкретно цього питання є створення окремих допоміжних сервісів, які будуть робити обчислювально роботу, а саму валідацію результатів вже проводити в рамках блокчейну. В рамках аналізу прийшли до висновку, що забезпечення комплексного підходу до безпеки в плані приватності даних можливо досягти шляхом збалансованого використання пари алгоритмів.

Для забезпечення приватності даних пропонується використання протоколів доведення з нульовим доказом через простоту верифікації на блокчейні та доволі високу надійність до взлому. В свою чергу, захист особистості користувача можна реалізувати також через використання кільцевого підпису, що неможливість ідентифікації учасника тендеру.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У даному дослідженні розглянуто методи та алгоритми забезпечення конфіденційності в системах державних закупівель. При розгляді особлива увага приділяється можливості побудови платформи для державних закупівель, використовуючи технологію блокчейн. Найбільш детально розглянуто такі криптографічні методи, як Mixing, Ring Signatures, Commitment schemes, Homomorphic hiding, і Zero-Knowledge Proofs. Перераховані методи спрямовані на забезпечення приватності користувачів та захисту їхніх даних. Особлива увага дослідження була зосереджена на невзаємодіючих доказах нульового розкриття та гомоморфному шифруванні, їх застосування в контексті блокчейну для державних закупівель.

Важливим аспектом проєктування систем для проведення державних закупівель є забезпечення балансу між прозорістю, швидкістю обробки транзакцій та конфіденційністю. Це створює унікальні виклики та вимагає ретельного розгляду як технологічних можливостей, так і юридичних вимог, зокрема відповідність загальному регламенту захисту даних (GDPR). Необхідно підкреслити, що ефективність цих методів та алгоритмів можна підвищити шляхом розумного комбінування та планування архітектури з розуміння всіх вимог до системи державних публічних закупівель.

Результати дослідження показують, що збалансованого використання передових криптографічних методів і підходів може ефективно забезпечити необхідний рівень приватності, не жертвуючи при цьому перевагами децентралізації.

#### Список літератури:

1. Корнійчук О. В., Граф М. С. Аналіз існуючих механізмів прийняття рішень в децентралізованих системах для застосування в державних закупівлях. *Технічні науки та технології*. 2023. № 1(91). С. 156-160. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-156-160](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-156-160).
2. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash. 2009. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
3. Bernabe J. B., Canovas J. L., Hernandez-Ramos J. L., Moreno R. T., Skarmeta A. Privacy-preserving solutions for Blockchain: review and challenges. *IEEE Access*. 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2950872. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336937331>.
4. Junejo A. Z., Hashmani M. A., Alabdulatif A. A. A Survey on Privacy Vulnerabilities in Permissionless Blockchains. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. Vol. 11, № 9. P. 130. URL: [www.ijacsa.thesai.org](http://www.ijacsa.thesai.org).
5. Корнійчук О.В., Граф М.С. Дослідження переваг використання децентралізованих систем. Тези доповідей V Всеукраїнської науково-технічної конференції "Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення". Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 142-143. ISBN 978-966-683-593-5.
6. Kappos G., Yousaf H., Maller M., Meiklejohn S. An Empirical Analysis of Anonymity in Zcash. *27th USENIX Security Symposium*. USA. 2018.
7. Pieprzyk, J., Hardjono, T., and Seberry, J. *Fundamentals of Computer Security*. 2nd ed. [Berlin, Germany]: Springer Science & Business Media, 2013. 697 p. ISBN 978-3-540-43101-5.

#### **Korniichuk O.V., Hraf M.S. METHODS AND ALGORITHMS OF PRESERVING CONFIDENTIALITY IN DECENTRALIZED SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF BUILDING PUBLIC PROCUREMENTS SYSTEM**

*This article is dedicated to the exploration of methods and algorithms for ensuring data privacy in decentralized systems, focusing specifically on the development of a platform for public procurement using blockchain technology. In light of the growing significance of data privacy in decentralized networks, especially in the field of public procurement, the authors have conducted a comprehensive analysis of existing cryptographic methods such as mixing, ring signatures, commitment schemes, homomorphic hiding, and zero-knowledge proofs, aiming to determine their effectiveness in ensuring user privacy and data protection.*

*Particular emphasis was placed on non-interactive zero-knowledge proofs and homomorphic encryption, which emerged as key in the context of implementing privacy and confidentiality on blockchain platforms for public procurement. The authors highlight the importance of balancing transaction transparency, processing efficiency, and ensuring an adequate level of data confidentiality, considering requirements such as the GDPR. It is emphasized that the use of advanced cryptographic methods can provide the necessary level of privacy without losing the benefits of decentralization, which is crucial for the successful integration of blockchain technologies in public procurement.*

*The study emphasizes the significant role of various cryptographic methods in addressing challenges associated with ensuring confidentiality in blockchain systems, especially in the context of public procurement, where the demands for transparency and confidentiality are simultaneously high. The possibilities and limitations of each analyzed method are illuminated, providing a clear understanding of how each can be utilized to achieve an optimal balance between security and efficiency in public procurement. This approach allows for a comprehensive solution to the issue of confidentiality in decentralized systems, opening new perspectives for the development of blockchain technologies in the public sector.*

**Key words:** *blockchain, government procurement, electronic platforms, methods of preserving confidentiality, Zero-Knowledge Proof, encryption.*

**Костинчук О.В.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Зима І.В.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## ВЛАСТИВОСТІ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ

*У статті розглянуто організування систем резервного електропостачання у будинку або квартирі та вирішення проблем, пов'язаних з обмеженим постачанням.*

*Автономні джерела живлення набувають все більшого значення в сучасному світі. Зі зростанням попиту на енергію та необхідністю пошуку сталих рішень, характеристики автономних джерел живлення стали предметом зацікавленості в керуванні електроенергією. Однією з ключових властивостей автономних джерел живлення є їх здатність генерувати енергію самостійно. На відміну від традиційних джерел живлення, які залежать від зовнішнього постачання, автономні джерела живлення можуть генерувати енергію з відновлюваних джерел, таких як сонячна, вітрова або гідроенергія.*

*Надійність є важливою властивістю автономних джерел живлення. У критично важливих додатках, де безперебійне електропостачання має важливе значення, автономні джерела живлення є надійним рішенням. Ці джерела живлення можуть бути оснащені системами резервного копіювання або накопичувачами енергії для забезпечення безперервного електроживлення навіть у разі збою або тимчасового переривання основного джерела живлення.*

*Проблема керування сегментами електромереж полягає в ефективному поділі та оптимізації енергоспоживання між захищеним і незахищеним сегментами. Дублювання електророзподілу для різних сегментів створює надмірність і може призвести до неефективного використання ресурсів. Треба визначити критерії під'єднання обладнання до захищеного сегмента на основі життєво важливих потреб і комфортних умов, щоб мінімізувати втрати енергії.*

*Важливо надати пріоритет енергозбереженню для галузей і секторів та знайти інноваційні рішення для вирішення проблем, пов'язаних з обмеженим постачанням.*

*Властивості автономних джерел живлення роблять їх привабливим об'єктом керування електроживленням. Здатність генерувати енергію незалежно, масштабованість, ефективність і надійність роблять їх придатними для широкого спектру застосувань. Оскільки попит на стійкі та надійні енергетичні рішення продовжує зростати, важливість ефективного управління автономними джерелами живлення стає все більш очевидною. Розуміючи і використовуючи властивості автономних джерел енергії, ми можемо забезпечити більш стійке і ефективне майбутнє для виробництва електроенергії та керування нею.*

**Ключові слова:** автономні джерела живлення, безперебійне живлення, оптимізація енергоспоживання, відновлювальні джерела, система керування.

**Постановка проблеми.** Автономні джерела живлення набувають все більшого значення в сучасному світі. Зі зростанням попиту на енергію та необхідністю пошуку сталих рішень, характеристики автономних джерел живлення стали предметом зацікавленості в керуванні електроенергією. У цьому есе досліджуються властивості автономних джерел живлення як об'єкта управління електропостачанням.

Однією з ключових властивостей автономних джерел живлення є їх здатність генерувати енергію самостійно. На відміну від традиційних джерел живлення, які залежать від зовнішнього постачання, автономні джерела живлення

можуть генерувати енергію з відновлюваних джерел, таких як сонячна, вітрова або гідроенергія. Така незалежність забезпечує більшу гнучкість в управлінні енергоспоживанням, оскільки наявність енергії не залежить від зовнішніх факторів.

Ще однією важливою властивістю автономних джерел живлення є їх масштабованість. Ці джерела живлення можуть бути спроектовані таким чином, щоб задовольнити специфічні вимоги до потужності системи або пристрою. Незалежно від того, чи це невелике застосування, чи велика електромережа, автономні джерела живлення можуть бути адаптовані для забезпечення необхідної вихідної потужності. Масштабованість робить їх

придатними для широкого спектру застосувань, від віддалених від електромережі місць до міських умов.

Ефективність – ще одна важлива властивість автономних джерел живлення. Зважаючи на зростаючу увагу до сталого розвитку та енергозбереження, важливо максимізувати ефективність виробництва електроенергії. Автономні джерела живлення призначені для перетворення доступної енергії в корисну з мінімальними втратами. Така ефективність не тільки забезпечує оптимальну вихідну потужність, але й зменшує вплив виробництва електроенергії на навколишнє середовище.

Надійність також є важливою властивістю автономних джерел живлення. У критично важливих додатках, де безперебійне електропостачання має важливе значення, автономні джерела живлення є надійним рішенням. Ці джерела живлення можуть бути оснащені системами резервного копіювання або накопичувачами енергії для забезпечення безперервного електроживлення навіть у разі збою або тимчасового переривання основного джерела живлення.

Проблема керування сегментами електромереж полягає в ефективному поділі та оптимізації енергоспоживання між захищеним і незахищеним сегментами. Дублювання електророзподілу для різних сегментів створює надмірність і може призвести до неефективного використання ресурсів. Треба визначити критерії під'єднання обладнання до захищеного сегмента на основі життєво важливих потреб і комфортних умов, щоб мінімізувати втрати енергії. Підключення до захищеного сегмента основного обладнання для життєзабезпечення будинку, стаціонарного освітлення, певних розеток і малоспоживаючих пристроїв розглядають як розв'язання цієї проблеми. Але потрібно враховувати особливості під'єднання різних типів обладнання, як наприклад, низьковольтні світлодіодні джерела світла, для оптимального використання енергії та запобігання втратам потужності. Варіанти автономного або захищеного сегмента, що перемикається, варто розглядати, виходячи із середнього енергоспоживання, щоб забезпечити найефективніше керування електроживленням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Система безперебійного резервного електропостачання для будинку стане в пригоді в таких випадках:

- на дачі або у квартирі часто відключають електрику;
- на потужність, що підключається, встановлено ліміт, а виділеної не вистачає;
- в електромережі періодично виникає перенапруження;
- подається електроенергія низької якості.

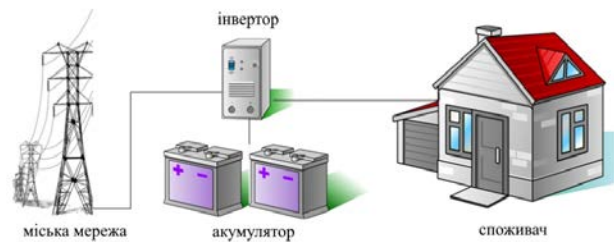


Рис. 1. Система безперебійного резервного електропостачання для будинку

У такий комплект безперебійного живлення входять інвертор (джерело безперебійного живлення – ДБЖ) і комплект акумуляторних батарей (КАБ) для безперебійного електропостачання. У звичайному режимі навантаження в системі ДБЖ + КАБ за допомогою безперебійника здійснюється заряджання батареї з метою підтримання її номінальної ємності. У разі перевищення параметрами зовнішньої мережі критичних значень або відключення електроенергії система резервного живлення для будинку дає змогу всім електроприладам, під'єднаним до неї, автоматично перейти на живлення від акумулятора через інвертор.

Резервування енергії в домашніх умовах можна забезпечити шляхом використання спеціального призначеного для цього обладнання.

Для забезпечення електрикою замиського будинку може слугувати кілька джерел:

- центральна електрична мережа;
- паливні електростанції;
- відновлювальні джерела.

Центральне забезпечення електрикою досить дороге задоволення і не завжди застосовується в замиських будинках.

Паливні електростанції вважаються автономним забезпеченням електроенергії, оскільки працюють на основі палива. Вони мають один великий недолік, який ґрунтується на тому, що паливні генератори не можуть забезпечувати цілодобове безперебійне забезпечення електроенергії всього будинку. Також генератор під час своєї роботи видає досить неприємні звуки. Таке джерело електроенергії дешеве, але постійною необхідно треба купувати паливо.

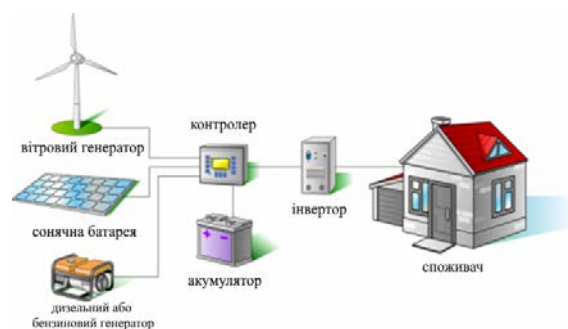


Рис. 2. Схема роботи паливної електростанції для приватного будинку

Генератори можуть подавати електричний струм, незалежно від погодних умов і стану центральних електричних мереж. Такий метод забезпечення електрикою дачного будиночка вважається економічно вигідним, оскільки генератор працює не постійно. Але є такий тип генераторів, які здатні виробляти електроенергію постійно, вони вимагають значних фінансових витрат.

Відновлюваними джерелами подачі електроенергії можуть бути вітер або сонце. Природні джерела енергії вважаються екологічно чистими і з кожним роком набирають все більшої популярності.

Відновлювальні джерела електричної енергії не потребують палива і зайвих витрат, оскільки їхня вартість залежить від цінової політики такої системи електрозабезпечення, екологічно чисті джерела енергії вважаються економічно вигідними.



Рис. 3. Сонячні батареї, розташовані на даху будинку

Сонячна електростанція як резервне джерело електропостачання дає змогу перетворити сонячну енергію в електричну. Час її автономної роботи не обмежений, «паливо» є доступним і безкоштовним, а використання не має негативного впливу на природу і дає змогу впливати на ціну електроенергії. Але, як і у випадку з газовим генератором, при малому споживанні електрики економія незначна. До того ж, вартість такої резервної електростанції порівняно висока, а якщо виникає необхідність переїзду, це створює незручності.

Вироблення електрики в таких системах залежить від кількості сонячної енергії, що надходить на спеціальний фотоелектричний модуль. А сонячна енергія в кожному регіоні може бути різною. Тому варто заздалегідь перед вкладенням у сонячні батареї оцінити кількість сонячної енергії, що надходить у певному місці, і скласти креслення розташування панелей. Це можна зробити на основі досліджень різноманітних метеостанцій або гідрометеослужб.

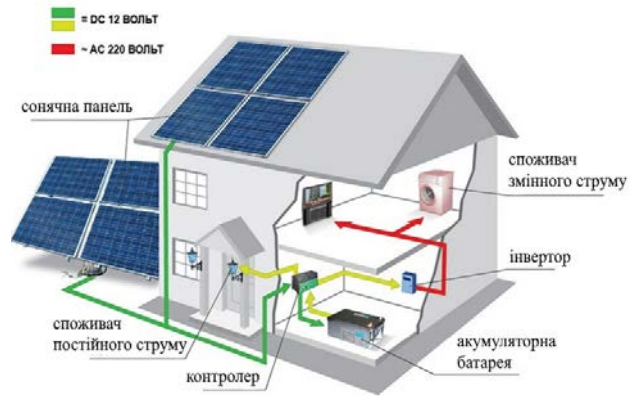


Рис. 4. Схема підключення системи автономного електропостачання невеликого дачного будинку

Метою статті є організувати систему резервного електропостачання у своєму будинку або квартирі останніми подіями з аварійними вимиканнями електромереж на території України.

Важливо надати пріоритет енергозбереженню для галузей і секторів та знайти інноваційні рішення для вирішення проблем, пов'язаних з обмеженим постачанням.

**Виклад основного матеріалу.** У сучасному світі безперебійне електроживлення має вирішальне значення для безперебійного функціонування різних галузей і секторів. Будь то лікарня, центр обробки даних або виробничий підрозділ, надійне джерело живлення має важливе значення для забезпечення безперебійної роботи.

Автономний захищений сегмент живиться інвертором, який не має функції заряджання акумуляторів від мережі. Це повністю самостійна електромережа, яка не має нічого спільного з будинковою електромережею, що живиться від громадських джерел електроенергії. Утім заземлення, якщо воно є, повинно бути спільним для всього електрообладнання.



Рис. 5. Схема електропостачання з автономним захищеним сегментом на сонячній батареї.

У такому способі жодні катаклізми в громадській незахищеній мережі не вплинуть на функціонування автономної. Мінусом є те, що через велику нерівномірність надходження дарової енергії режим енергокористування, що забезпечується автономною мережею, весь час змінюється,

і для ефективного використання безоплатної енергії автономної мережі треба час від часу перемикаєти споживачів із незахищеного сегмента в автономний і назад.

У разі аварії на громадській електромережі за необхідності ніщо не заважає відключити вхідний автомат і живити незахищений сегмент внутрішньої мережі від аварійного генератора. Якщо десь знадобиться лише невелика потужність, але підключатися до автономного сегмента там незручно, можна з'єднати обидва сегменти тимчасовою перемичкою, живлячи незахищений сегмент від автономного, однак у разі недотримання правильної послідовності дій це може бути дуже небезпечно як для людей, так і для обладнання. Спочатку треба відключити від незахищеного сегмента всіх потужних споживачів, а сам цей сегмент відключити від загальної мережі. Потім під'єднати перемичку, що являє собою дріт достатнього перерізу і довжини з вилами на обох кінцях, спочатку в розетку знеструмленого (незахищеного) сегмента, і тільки потім у розетку автономного сегмента. Під час відновлення зовнішнього електропостачання послідовність дій строго зворотна.

Якщо інвертор підтримує режим заряджання акумуляторів від зовнішньої мережі, то, як правило, він дає змогу легко організувати захищений сегмент, що перемикається, який може житися від зовнішньої мережі, але коли напруга в ній зникає, автоматично переходить на автономне енергопостачання, по суті будучи різновидом звичайного джерела безперебійного живлення (UPS). Перемикання займає частки секунди, тому лампочки можуть злегка блимнути, але блоки живлення телевізорів, комп'ютерів та інших побутових пристроїв, як правило, мають таку малу затримку без збоїв у роботі.

Система, що використовує такий інвертор, може працювати як у повністю автономному режимі, так і використовувати в захищеному сегменті мережі всі переваги, які надають громадська мережа або аварійний генератор, насамперед можливість тривалого під'єднання досить потужних пристроїв без побоювання швидкого розрядження акумуляторів.



Рис. 6. Схема електропостачання з захищеним сегментом з перемиканням (ЗП – вбудований в інвертор зарядний пристрій)

Один із недоліків такої системи полягає в тому, що поки є зовнішня напруга, захищений сегмент житиметься від зовнішньої мережі, навіть якщо для його поточного навантаження вистачає автономної енергії. Інший недолік полягає в можливості проникнення в захищений сегмент стрибків напруги із зовнішньої мережі (наприклад, під час влучання блискавки), які можуть пошкодити сам інвертор або під'єднані до захищеного сегмента пристрої. І те, і інше посилюється тим, що захищений сегмент зазвичай підключається до зовнішньої мережі безпосередньо, через реле.

Сегмент, що заряджається, аналогічний автономному, за винятком того, що низьковольтна частина пов'язана з незахищеним сегментом через зарядний пристрій, який забезпечує заряджання акумуляторів за наявності напруги в суспільній мережі, де можна використовувати блок заряджання. Зазначу, що автомобільні зарядні пристрої зазвичай занадто слабкі і розраховані строго на 12 В, але існують спеціальні зарядні пристрої для систем автономного електропостачання. Як варіант, можна спробувати взяти зарядний блок з інвертора з функцією зарядки акумуляторів.



Рис. 7. Схема електропостачання із захищеним сегментом, що заряджається

Перевагою такого рішення є забезпечення роботи захищеного сегмента навіть за нестачі дармової енергії за рахунок підживлення від незахищеного. Крім того, таке «непряме» підживлення забезпечує набагато кращий захист від позаштатних ситуацій у громадській мережі, оскільки підживлення здійснюється не прямою комутацією через реле, а через низьковольтний сегмент із потужними акумуляторами, які здатні якщо не поглинути, то помітно згладити вельми сильні короточасні викиди напруги, а якщо перевантаження буде надто тривалим, воно або «виб'є» захисний автомат, або, у найгіршому разі, випалить зарядний пристрій, – в обох варіантах захищений сегмент перейде в автономний режим, причому за звичайного ж зникнення напруги в громадській мережі зарядний пристрій просто припиняє свою роботу, і захищений сегмент переходить в автономний режим із живленням тільки від акумуляторів і дармової енергії без жодних

стрибків і «моргань», навіть найкороточасніших. Нарешті, сучасні зарядні пристрої зазвичай автоматично припиняють заряджання в разі досягнення акумуляторами певного рівня заряду і відновлюють його лише в разі їхнього розрядження до заданого порогу, а тому в разі наявності достатнього надходження дарової енергії та невеликої її витрати енергія з громадської мережі в захищеному сегменті використовуватися не буде.

Недоліком порівняно з сегментом, що перемикається, є, по-перше, постійна робота інвертора на навантаження. По-друге, хоча миттєва споживана потужність обмежена лише потужністю інвертора (короткочасний дефіцит потужності заповняють акумулятори), у довготривалому режимі середня споживана потужність не повинна перевищувати суми потужностей зарядного пристрою і мінімального потоку дарової енергії. При цьому якщо потік дарової енергії тривалий час буде мінімальним (похмурі короткі дні або штиль), а споживання в захищеному сегменті виявиться досить великим, акумулятори також довгий час можуть залишатися неповністю зарядженими, оскільки енергія від зарядного пристрою буде витрачатися не стільки на їхній заряд, скільки на поточне споживання. Це не надто корисно для акумуляторів, але абсолютно не смертельно для них. Зрештою настане період, коли потік дарової енергії посилиться і акумулятори зарядяться до кінця.

Але слід зауважити, що в такій конфігурації заряджання акумуляторів здійснюється одразу двома зарядними пристроями – контролером первинного джерела (вітрогенератора або сонячних панелей) і мережевим зарядним пристроєм. При цьому обидва ці пристрої, як правило, автономні і нічого не «знають» один про одного. У результаті параметри зарядки можуть істотно відрізнятися від оптимальних, що негативно позначиться як на обсязі запасеної енергії, так і на терміні служби акумуляторів. Забезпечення оптимальних параметрів заряджання в такій конфігурації

є окремим непростим завданням, як, зрештою, і в разі будь-яких систем, у яких кілька зарядних пристроїв працюють на один банк акумуляторів. Проте в більшості випадків і контролери, і зарядні пристрої під час своєї роботи орієнтуються на поточну напругу на блоці акумуляторів, а вона єдина для всіх зарядних пристроїв, скільки б їх не було, тож надто серйозне узгодженість режимів мало ймовірна. Крім того, виробники найбільш просунутих і дорогих систем обладнання для автономного електропостачання пропонують рішення з урахуванням таких колізій. На жаль, загально визнаних стандартів інформаційної взаємодії зарядних пристроїв і контролерів поки що немає, і повністю узгоджена робота можлива лише в разі використання обладнання однієї й тієї самої фірми. Слід зауважити, що для сонячних батарей останнім часом стали з'являтися комбіновані блоки, що з'єднують у собі контролер заряду, інвертор і мережевий зарядний пристрій, де користувачеві залишається лише вибрати пріоритети джерел живлення, але потужність таких комбінованих пристроїв зазвичай не дуже велика.

**Висновки.** У даному дослідженні розглянуто пріоритет енергозбереженню для галузей і секторів та інноваційні рішення для вирішення проблем резервного електропостачання у своєму будинку або квартирі, пов'язаних з обмеженим постачанням. Отже, властивості автономних джерел живлення роблять їх привабливим об'єктом керування електроживленням. Здатність генерувати енергію незалежно, масштабованість, ефективність і надійність роблять їх придатними для широкого спектру застосувань. Оскільки попит на стійкі та надійні енергетичні рішення продовжує зростати, важливість ефективного управління автономними джерелами живлення стає все більш очевидною. Розуміючи і використовуючи властивості автономних джерел енергії, ми можемо забезпечити більш стійке і ефективно майбутнє для виробництва електроенергії та керування нею.

#### Список літератури:

1. Z. Zhang, K. Sato, Y. Nagasaki, M. Tsuda, D. Miyagi, T. Komagome, K. Tsukada, T. Hamajima, Y. Ishii, D. Yonekura, Continuous operation in an electric and hydrogen hybrid energy storage system for renewable power generation and autonomous emergency power supply, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 41, 2019, Pages 23384-23395, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.028>....
2. Автономне живлення у квартирі: 3 поширені способи, <https://www.megatrade.ua/news/reviews/avtonomne-zhivlennya-u-kvartiri-3-poshirenikh-sposobi/>
3. Kah Poh Lee, Chern Wei Chng, Dong Ling Tong, Kwan Lee Tseu, Optimizing Energy Consumption on Smart Home Task Scheduling using Particle Swarm Optimization, *Procedia Computer Science*, Volume 220, ISSN 1877-0509, 2023, Pages 195-201, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.027>.
4. Pedro C. Bolsi, Edemar O. Prado, Antonio Cezar C. Lima, Hamiltom C. Sartori, José Renes Pinheiro, Battery autonomy estimation method applied to lead-acid batteries in uninterruptible power supplies, *Journal of Energy Storage*, ISSN 2352-152X, Volume 58, 106421, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106421>

5. Muhammad Aamir, Kafeel Ahmed Kalwar, Saad Mekhilef, Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ISSN 1364-0321, Volume 58, 2016, Pages 1395-1410, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.335>

6. Yanquan Zhang, Ruidong Chang, Jian Zuo, Veronika Shabunko, Xian Zheng, Regional disparity of residential solar panel diffusion in Australia: The roles of socio-economic factors, *Renewable Energy*, ISSN 0960-1481, Volume 206, 2023, Pages 808-819, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.111>

7. Vasundhara Gaur, Corey Lang, House of the rising sun: The effect of utility-scale solar arrays on housing prices, *Energy Economics*, ISSN 0140-9883, 106699, Volume 122, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106699>

8. Sakhile Twala, Xianming Ye, Xiaohua Xia, Lijun Zhang, Optimal integration of solar home systems and appliance scheduling for residential homes under severe national load shedding, *Journal of Automation and Intelligence*, ISSN 2949-8554, Volume 2, Issue 4, 2023, Pages 227-238, <https://doi.org/10.1016/j.jai.2023.12.001>

### **Kostynchuk O.V., Zyma I.V. PROPERTIES OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY AS A POWER CONTROL OBJECT**

*The article explores the organisation of backup power supply systems in a house or apartment and the solution of problems associated with limited supply.*

*Off-grid power supplies are becoming increasingly important in the modern world. With the growing demand for energy and the need to find sustainable solutions, the characteristics of stand-alone power supplies have become a subject of interest in the power management industry. One of the key features of stand-alone power supplies is their ability to generate energy independently. Unlike traditional power supplies that depend on an external supply, stand-alone power supplies can generate energy from renewable sources such as solar, wind or hydroelectric power.*

*Reliability is an important feature of off-grid power supplies. In mission-critical applications where uninterrupted power supply is essential, off-grid power supplies are a reliable solution. These power supplies can be equipped with backup systems or energy storage to ensure continuous power supply even in the event of a failure or temporary interruption of the main power supply.*

*The challenge of managing power grid segments is to effectively separate and optimise power consumption between protected and unprotected segments. Duplication of power distribution for different segments creates redundancy and can lead to inefficient use of resources. Criteria for connecting equipment to the protected segment should be defined based on vital needs and comfort conditions to minimise energy losses.*

*It is important to prioritise energy conservation for industries and sectors and find innovative solutions to address supply constraints.*

*The properties of stand-alone power sources make them an attractive target for power management. Their ability to generate power independently, scalability, efficiency and reliability make them suitable for a wide range of applications. As the demand for sustainable and reliable energy solutions continues to grow, the importance of efficiently managing off-grid power supplies is becoming increasingly apparent. By understanding and harnessing the properties of off-grid power sources, we can ensure a more sustainable and efficient future for electricity generation and management.*

**Key words:** *autonomous power supplies, uninterrupted power supply, optimisation of energy consumption, renewable energy sources, control system.*



УДК 621.311.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/26>**Кулінченко Г.В.**

Сумський державний університет

**Панич А.О.**

Сумський державний університет

**Бугаць П.І.**

Сумський державний університет

**Давиденко І.Л.**

Сумський державний університет

**Левковський О.В.**

Сумський державний університет

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ УСТАНОВКИ УТИЛІЗАЦІЇ ТИСКУ ГАЗУ

*Основні тенденції досліджень по підвищенню енергоефективності генеруючих установок альтернативної енергетики представляються конкретними аспектами досліджень установок генерації певного типу. Ці аспекти визначаються галузями знань, що формують відомі методи досліджень. Це стосується генераторів, турбін або систем керування. Проте, більш перспективним представляється системний підхід, який передбачає комплексний аналіз об'єкта керування, коли складові загального процесу розглядаються во взаємодії. Розглядаючи детандер-генераторний агрегат (ДГА), який використовується для утилізації надлишкового тиску газорозподільчих мереж, враховано специфіку вихрової турбіни, що задіяна в якості детандера. Враховуючи тенденції побудови генеруючих установок альтернативної енергетики, проаналізовані варіанти застосування генераторів різних типів. Фактори вибору типу генератора не обмежуються габаритно-вартісними показниками. Забезпечення характеристик якості генерації електроенергії є узагальнюючим фактором, що визначає ефективність генерації, оскільки розбудова засобів керування установкою генерації залежить від застосованих підходів та технічних засобів. Метою роботи є розробка методів для оцінки параметрів якості генерації електричної енергії, що продукується ДГА. Головне завдання при цьому представляється як дослідження характеру взаємодії електричних та механічних процесів, де фактором змін є тип задіяного генератора. В роботі розглянуто функціонування математичних моделей ДГА, в яких по черзі використовуються асинхронний, синхронний та синхронний з постійними магнітами генератори в умовах дії збурень електричного навантаження. Отримано експериментальні дані, що необхідні для структурно-параметричного синтезу регулятора ДГА. Враховуючи взаємозв'язок електричних та механічних параметрів функціонування ДГА, наявність обмотки збудження синхронного генератора в якості окремого контуру керування відкриває можливість підвищення керованості ДГА при зміні навантаження. Опрацьовано методіку оцінки параметрів електричної генерації установки утилізації надлишкового тиску газу.*

**Ключові слова:** детандер-генераторний агрегат, генератор, якість електроенергії, математична модель.

**Постановка проблеми.** Виходячи із завдань розбудови системи керування детандер-генераторним агрегатом (ДГА), який забезпечує утилізацію надлишкового тиску газових мереж, першочерговою задачею представляється формалізація опису складових цієї системи. Не викликає сумнівів твердження, що суттєвим фактором забезпечення ефективної роботи ДГА є вибір типу генератора цього агрегату. Твердження зумовлено тим, що

крім основного призначення, генератор виконує функції стабілізації та регулювання параметрів, які визначають якість генерованої електроенергії.

У складі ДГА використовують різні типи генераторів, при цьому кожний із них має свої переваги та недоліки. Тому, в залежності від вибраного генератора, формують відповідну структуру системи керування та алгоритми взаємодії із мережею навантаження, оскільки кожний тип генератора

має свої відмінності. Відповідно, можливість мінімізації наслідків стрибкоподібних змін навантаження визначається динамікою вибраного типу генератора.

Традиційно керування генераторними установками спрямовано на підтримку балансу потужностей турбогенератора і навантаження, а також на утримання частоти напруги, що генерується. В той же час досвід експлуатації генераційних агрегатів показує, що параметри вхідного потоку детандера можуть теж довільно змінюватися у часі, викликаючи коливання частоти обертання ДГА.

Таким чином взаємовплив різних по характеру фізичних процесів ускладнює структуру системи керування ДГА та не дає однозначної відповіді на вибір типу генератора ДГА. Звернемося до чинників, що визначають вибір типу генератора.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підходи до вибору генераторів для різних турбін диктуються специфікою галузі, в якій передбачається використовувати досліджуване джерело енергії, наприклад, для міні ГЕС [1]. Аналізуючи завдання забезпечення функціонування вітрових енергетичних установок (ВЕУ), принцип дії яких нагадує роботу ДГА, можна констатувати, що основні зусилля по розробках ВЕУ спрямовані на удосконалення їх конструкції. У складі ВЕУ використовуються або асинхронні генератори (АГ), або синхронні (СГ). При цьому АГ може бути як із короткозамкненим ротором, так і з фазним ротором. Використовувані у ВЕУ типи СГ різняться за типом збудження (електромагнітне, магнітоелектричне) або за принципом збудження поля, наприклад, індукторним.

Суттєвого поширення в наш час набули дослідження, що спрямовані на використання у ВЕУ асинхронізованих синхронних генераторів [2].

Проте, найбільший об'єм застосування у відновлюваній енергетиці набуває синхронний генератор на постійних магнітах (СГПМ) [3]. Це пов'язано з тим, що він має просту конструкцію, високий ККД та прийнятні експлуатаційні характеристики.

Переваги АГ теж асоціюються з надійністю функціонування, простотою конструкції, та особливо, низькою вартістю. Ці переваги знецінюються завдяки складності вирішення завдань стабілізації вихідної напруги АГ та необхідності компенсації реактивної потужності навантаження, пов'язаної із забезпеченням збудження АГ. Останні чинники суттєво гальмували використання АГ в установках генерації України внаслідок відсутності малогабаритних конденсаторів, які забезпечують збу-

дження АГ. Хоча поява компактних конденсаторів полегшує вирішення схемних задач забезпечення збудження АГ, проте реалізація алгоритмів комутації та надійних комутаторів конденсаторів на промислому рівні залишаються відкритими [4].

Вирішення завдань стабілізації робочих режимів АГ у складі генераторної установки досягається з допомогою додаткових технічних засобів, але їх використання дещо знижує ККД установки. Тому АГ частіше використовується в генераційних установках малої потужності.

Вибір типу генератора для ДГА ускладнюється відсутністю чітких критеріїв та рекомендацій щодо цього вибору. Тому економічні критерії, де аналізуються масо-габаритні та експлуатаційні характеристики, хоч і зменшують поле пошуку потрібних генераторів [5], але їх вплив на формування підходів до побудови ефективних систем електрогенерації мінімальний.

Основні тенденції досліджень по підвищенню енергоефективності генеруючих установок представлені окремими аспектами функціонування установки генерації конкретного типу, наприклад, генератора, турбіни або системи керування. Проте, максимальну ефективність установки генерації може отримати лише за системним підходом, коли установка генерації розглядається як комплексний об'єкт.

Для оцінки параметрів функціонування установки генерації, зокрема, дослідженні параметрів стійкості, визначенні оптимальних режимів роботи, доцільний комплексний аналіз механічних характеристик джерела механічної енергії та навантажувальних характеристик генератора [6]. Механічні характеристики турбіни визначаються діючими потоками та аеродинамікою простору турбіни, що формує момент обертання джерела механічної енергії. Врахування взаємодії елементів турбіни достатньо важливо при розбудові системи керування ДГА, оскільки зміна моменту обертання турбіни здійснюється шляхом впливу на потоки, що створюють обертальний момент турбіни.

Дослідження згаданих процесів взаємодії АГ та ТДА з використанням їх механічних характеристик показало [7], що зміна моменту навантаження може суттєво впливати на напругу статора генератора. Наслідки збурення електричного навантаження, що проявляються у зміні частоти обертання турбіни, долаються шляхом керування величиною ємностей, які використовуються для самозбудження АГ. При цьому треба враховувати, що процес регулювання напруги АГ відбувається за рахунок зміни частоти обертання агрегату, яка у свою чергу визначається

моментом обертання турбіни. Ці зміни впливають на частоту генерованого струму.

Вочевидь, що зміна електричного навантаження ДГА впливає і на частоту обертання СГ, який може використовуватися у складі ДГА. Відсутність числових даних, що необхідні для коректного порівняння ефективності згаданих генераторів, обумовлює кроки, які здатні подолати ситуацію, що склалася.

Відповідно, актуальність цієї роботи полягає в отриманні даних, що дозволять сформулювати підходи до вибору генераторів ДГА. Врахування відмінностей механічних характеристик генераторів, що використовуються в ДГА, дає змогу визначити тактику комплексної розробки системи керування установкою генерації.

**Метою роботи** є розробка методів для оцінки параметрів якості генерації електричної енергії, що продукується ДГА. Головне завдання при цьому представляється як дослідження характеру взаємодії електричних та механічних процесів, де фактором змін є тип задіяного генератора.

Постановка задачі формулюється як розробка засобів моделювання згаданих процесів та оцінка результатів моделювання, відповідно до поставленої мети в умовах дії збурень, які супроводжують процес споживання згенерованої енергії.

**Виклад основного матеріалу.** Підґрунтям вирішення поставленої задачі є створення співставних умов для оцінки параметрів, що характеризують процес електрогенерації. До таких параметрів належать відхилення та коливання напруги, провали та кидки напруги або зміни частоти цієї напруги. Відповідно, для досягнення поставленої мети досліджень використовуються моделі стандартів, які дають змогу порівняти параметри генерації електроенергії генераторами різних типів.

При моделюванні генерації ДГА задіяна модель вихрової турбіни [8], яка використовується в якості джерела механічної енергії. На схемі, що зображена на рис. 1, турбіна представлена блоком, вихід якого характеризується параметром  $M_T$  (момент турбіни), а вхідним параметром є перепад тиску  $\Delta P$ , що діє на лопаті турбіни.

Ключовим елементом моделі ДГА (рис. 1) є елемент підсумовування, яким відображується взаємодія моменту обертання турбіни, моменту реакції генератора  $M_G$  на електричне навантаження та аеродинамічного моменту опору  $M_A$ . Саме результат взаємодії моментів  $M_m$  визначає швидкість обертання агрегату:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G - M_A, \quad (1)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції агрегату;  $\omega$  – швидкість обертання агрегату;  $M_T$ ,  $M_G$ ,  $M_A$  – момент турбіни, генератора та аеродинамічний момент відповідно.

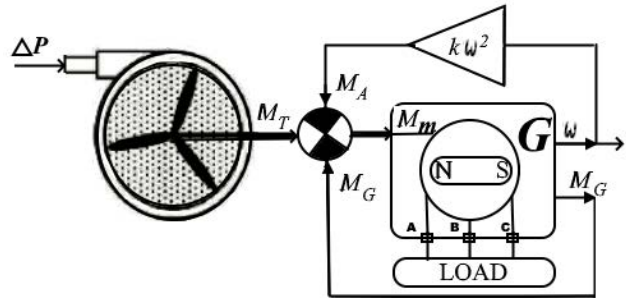


Рис. 1. Схема моделі ДГА

Основним завданням дослідження моделі ДГА є отримання даних, що відображують вплив електричного навантаження LOAD на режим функціонування генератора  $G$ . Ці дані необхідні для побудови регулятора ДГА, який забезпечить мінімізацію коливань параметрів споживаної енергії. Згадані коливання, що пов'язані із змінами електричного моменту  $M_G$ , впливають не тільки на параметри згенерованої напруги, але й на режим роботи усього ДГА.

Методика оцінки параметрів генерації базується на порівнянні характеристик напруги генерації ДГА, в якому задіяні генератори різного типу. Повертаючись до результатів аналізу типів генераторів, що працюють в альтернативній енергетиці, можна констатувати, що для генерації використовуються як АГ, так і СГ [9, 10]. Таким чином, змінюючи по черзі генератори, що під'єднуються до однієї вихрової турбіни (ВТ) вибраної конструкції, отримуються дані для оцінки параметрів генерації ДГА.

Зважаючи на можливість стабілізації моменту обертання турбіни з допомогою регулятора [11], можна вважати, що задіяна ВТ є джерелом сталого моменту обертання  $M_T$ . Це припущення дає змогу значно спростити схему моделі і представити її у вигляді, як зображено на рис. 2.

Як видно із схеми рис. 2, в моделі задіяно СГПМ (PMSM), до якого під'єднано симетричне активне навантаження. Підхід до моделювання СГПМ базується на рівняннях динаміки, що описують його функціонування у координатах  $d, q$  [12]:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\dot{E}_N}{x_d} [U_d - r_s i_d + n x_q i_q] \quad (2)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{\omega_N}{x_q} [U_q - r_s i_q - (x_d i_d + \psi_M) n] \quad (3)$$

$$M_e = \psi_M i_q + (x_d - x_q) i_d i_q \quad (4)$$

$$\frac{dn}{dt} = [M_e + M_m - Fn] \quad (5)$$

де  $i_d, i_q$  – струми генератора по осях  $d$  та  $q$ ;  $U_d, U_q$  – наруги генератора по осях  $d$  та  $q$ ;  $\omega_N$  – кутова швидкість електричного поля;  $n$  – кутова швидкість обертання турбіни;  $x_d, x_q$  – реактивності статорних обмоток по осях  $d$  та  $q$ ;  $r_s$  – опір обмоток статора;  $\psi_M$  – магнітний потік ротора;  $M_e, M_m$  – електромагнітний та механічний моменти;  $F$  – коефіцієнт тертя.

При цьому вважається, що осі  $d$ - $q$  рівнянь (2)–(5) обертаються синхронно з магнітним потоком ротора СГПМ.

Моделювання збурення навантаження СГПМ здійснюються шляхом перемикання додаткових опорів з допомогою генератора комутуючих сигналів GenZ.

Оскільки найважчим випробуванням системи генерації електроенергії є скидання та накидання електричного навантаження, то при моделюванні досліджуваного ДГА здійснюється імітація стрибкоподібних змін режиму функціонування. На рис. 3 показані осцилограми сигналів, що характеризують зміни режимів навантаження ДГА з використанням СГПМ.

Із отриманих осцилограм видно, що при зміні електричного навантаження СГПМ суттєво зменшується момент і швидкість обертання, а головне – помітно спадає генерована напруга. Реакція системи є похідними даними для формування вимог до регулятора, який використовується для стабілізації частоти обертання та мінімізації коливань електричних параметрів мережи споживання. Згадані дані не є типовими та узагальнюючими, оскільки досліджуваний об'єкт керування (ОК) характеризується нелінійним характером зв'язків його параметрів.

Для компенсації згаданих коливань на практиці використовуються різні регулятори, що забезпечують ефективну експлуатацію лише в певному обмеженому діапазоні коливань.

Оцінка функціонування моделі ДГА, в якій використовується СГ з обмоткою збудження, здійснюється за схемою, де задіяна раніше представлена ВТ (рис. 4). Характер збурень навантаження відповідає схемі моделювання ДГА з використанням СГПМ (рис. 2).

Як видно із схеми рис. 2, в моделі задіяно СГПМ (PMSM), до якого під'єднано симетричне активне навантаження. Підхід до моделювання СГПМ базується на рівняннях динаміки, що описують його функціонування у координатах  $d, q$  [12]:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\dot{E}_N}{x_d} [U_d - r_s i_d + n x_q i_q] \quad (2)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{\omega_N}{x_q} [U_q - r_s i_q - (x_d i_d + \psi_M) n] \quad (3)$$

$$M_e = \psi_M i_q + (x_d - x_q) i_d i_q \quad (4)$$

$$\frac{dn}{dt} = [M_e + M_m - Fn] \quad (5)$$

де  $i_d, i_q$  – струми генератора по осях  $d$  та  $q$ ;  $U_d, U_q$  – наруги генератора по осях  $d$  та  $q$ ;  $\omega_N$  – кутова швидкість електричного поля;  $n$  – кутова швидкість обертання турбіни;  $x_d, x_q$  – реактивності статорних обмоток по осях  $d$  та  $q$ ;  $r_s$  – опір обмоток статора;  $\psi_M$  – магнітний потік ротора;  $M_e, M_m$  – електромагнітний та механічний моменти;  $F$  – коефіцієнт тертя.

При цьому вважається, що осі  $d$ - $q$  рівнянь (2)–(5) обертаються синхронно з магнітним потоком ротора СГПМ.

Моделювання збурення навантаження СГПМ здійснюються шляхом перемикання додаткових опорів з допомогою генератора комутуючих сигналів GenZ.

Оскільки найважчим випробуванням системи генерації електроенергії є скидання та накидання електричного навантаження, то при моделюванні досліджуваного ДГА здійснюється імітація стрибкоподібних змін режиму функціонування. На рис. 3 показані осцилограми сигналів, що характеризують зміни режимів навантаження ДГА з використанням СГПМ.

Із отриманих осцилограм видно, що при зміні електричного навантаження СГПМ суттєво зменшується момент і швидкість обертання, а головне – помітно спадає генерована напруга. Реакція системи є похідними даними для формування вимог до регулятора, який використовується для стабілізації частоти обертання та мінімізації коливань електричних параметрів мережи споживання. Згадані дані не є типовими та узагальнюючими, оскільки досліджуваний об'єкт керування (ОК) характеризується нелінійним характером зв'язків його параметрів.

Для компенсації згаданих коливань на практиці використовуються різні регулятори, що забезпечують ефективну експлуатацію лише в певному обмеженому діапазоні коливань.

Оцінка функціонування моделі ДГА, в якій використовується СГ з обмоткою збудження, здійснюється за схемою, де задіяна раніше представлена ВТ (рис. 4). Характер збурень навантаження відповідає схемі моделювання ДГА з використанням СГПМ (рис. 2).

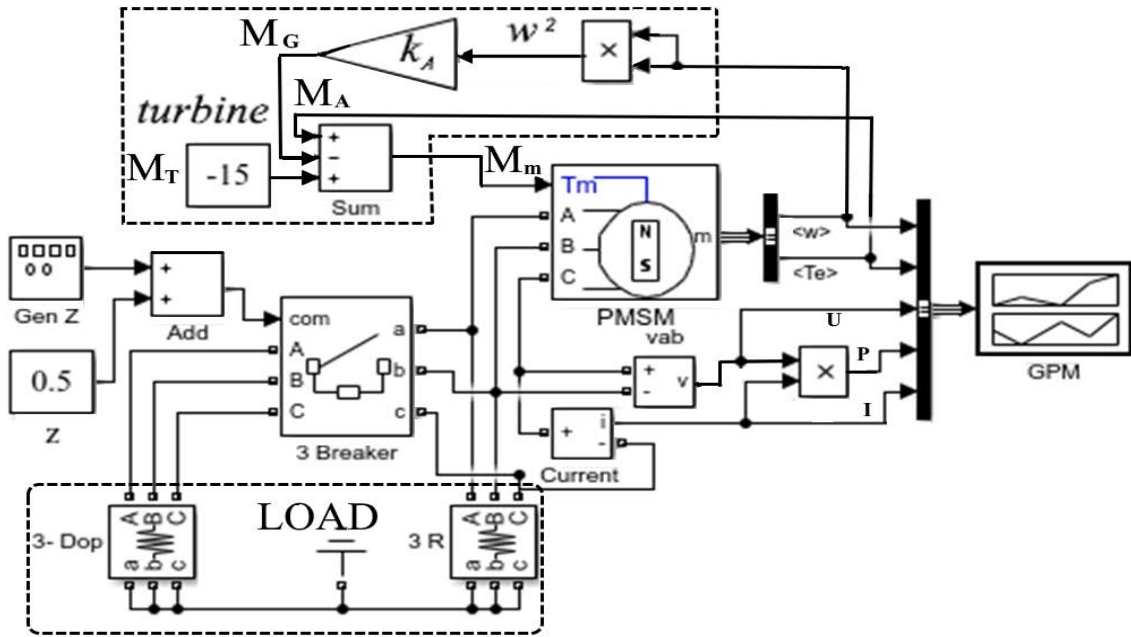


Рис. 2. Модель ДГА в середовищі MATLAB Simulink

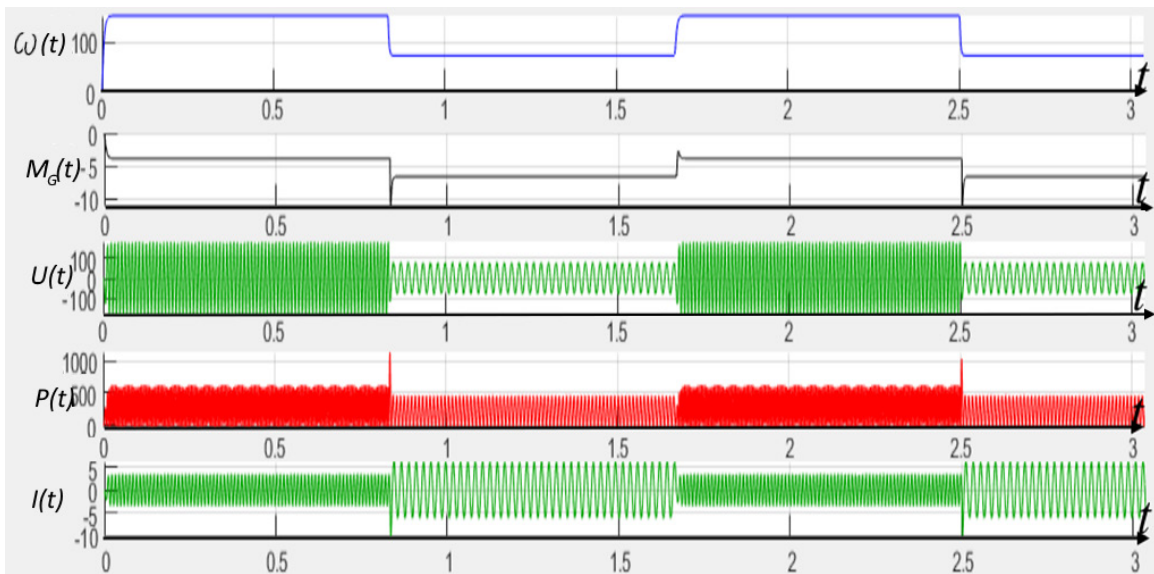


Рис. 3. Осцилограми сигналів, що характеризують зміни режимів ДГА:  
 $\omega(t)$  – швидкість обертання валу ДГА;  $M_G(t)$  – момент СГПМ;  $U(t)$  – фазна напруга;  
 $P(t)$  – потужність згенерованої енергії;  $I(t)$  – струм фази

Побудова моделі у середовищі MATLAB Simulink складнощів не викликає [13] та має 3-хфазну структуру. Рівняння кожної фази складається з послідовного джерела напруги з імпедансом, який задається у таблиці похідних даних [14]. Задіяний блок спрощеної моделі СГ при моделюванні реалізує механічну систему, що відповідає рівнянню (1).

Специфіка моделювання СГ з бібліотеки MATLAB Simulink обумовлює керування його режимами по входу  $P/\omega$ , що враховується співвід-

ношенням між потужністю  $P$  ДГА, його моментом  $M$  та швидкістю обертання  $\omega$ :

$$P = M * \omega \quad (6)$$

Осцилограми сигналів, що відображують зміни параметрів генерації ДГА в умовах зміни режимів навантаження СГ, показані на рис. 5.

Приведені осцилограми показують суттєву перевагу СГ з обмоткою збудження над СГПМ. Це витікає із стабільності рівня згенерованої напруги (навіть у відсутності будь якого регулятора) та

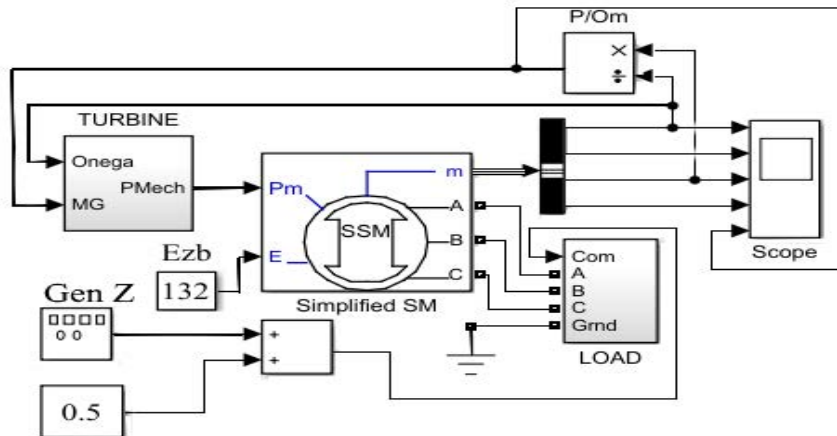


Рис. 4. Схема моделювання ДГА з СГ

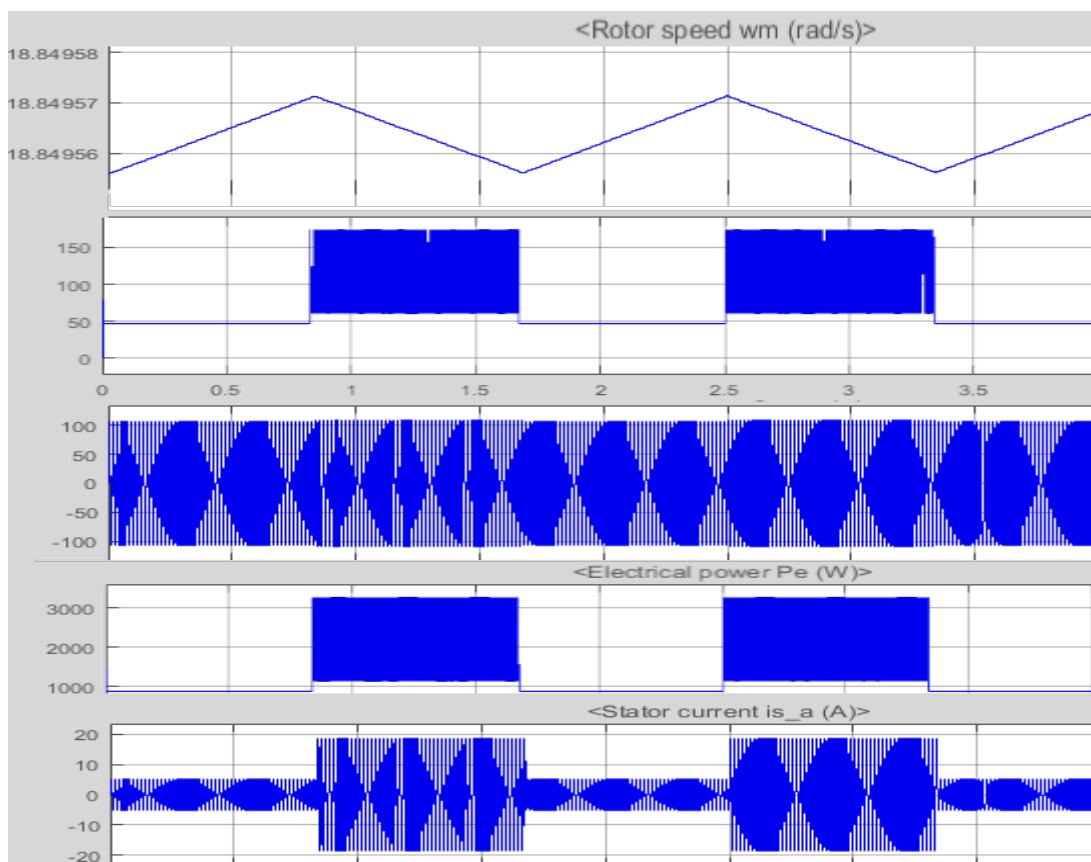


Рис. 5. Осцилограми сигналів, що характеризують зміни режимів ДГА

значень відхилення частоти обертання ДГА від номінальної. Ті коливання моменту, що спостерігаються при зміні навантаження, можуть бути мінімізовані з допомогою регулятора моменту обертання турбіни [11].

Розглядаючи альтернативні варіанти типів генераторів ДГА, можна констатувати, що у значній кількості енергетичних установок розподіленої енергетики, зокрема вітряної, використовуються АГ. Це пояснюється тим, що вони прості в експлу-

атації та мають відносно низьку вартість. Проте, підходи до оцінки вартості не є однозначним, оскільки при її об'єктивній оцінці слід враховувати вартість не тільки самих генераторів, але й системи збудження СГ або батарей конденсаторів (БК) АГ.

Саме БК системи живлення АГ забезпечує створення магнітного поля при автономній роботі в генераторному режимі. При цьому слід враховувати, що значення реактивної потужності, що утримується БК, повинно бути достатнім і при

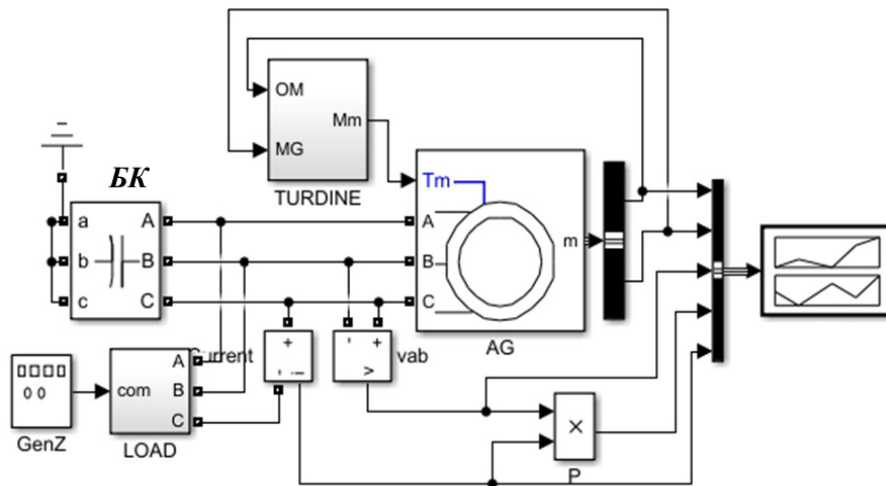


Рис. 6. Схема моделювання ДГА з АГ

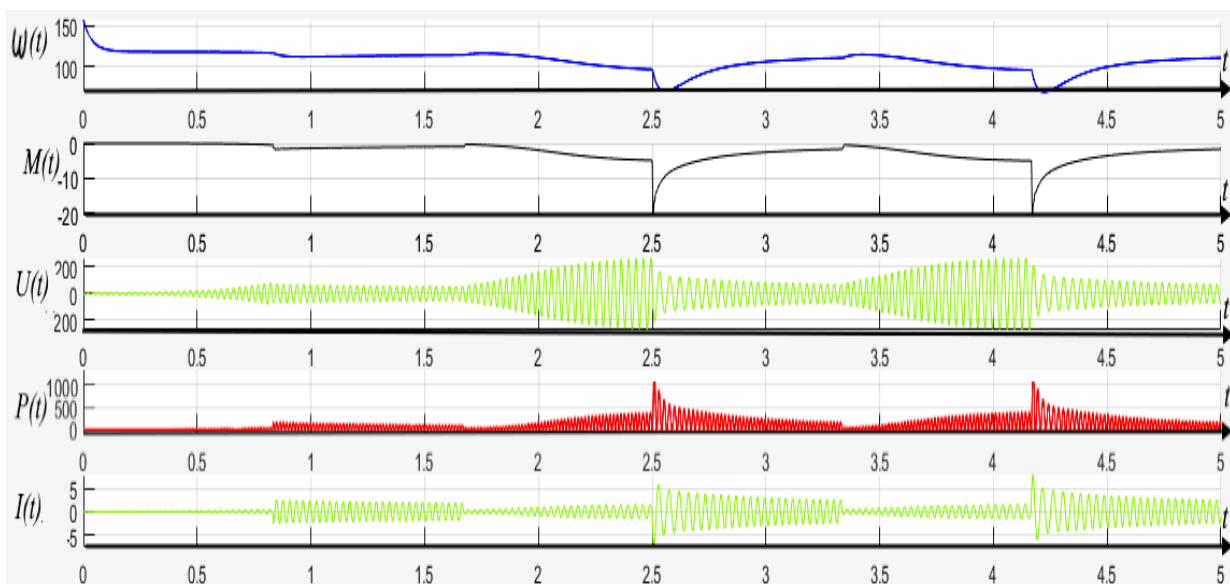


Рис. 7. Характеристика з використанням релейного регулятора

перемиканнях навантаження. У деяких випадках для виконання умов генерації маса і розміри БК можуть перевершувати масу самого АГ [15].

Порівняльна оцінка параметрів генерації моделі ДГА на базі АГ з використанням БК здійснювалася з допомогою схеми, що зображена на рис. 6.

Як і в схемах моделей ДГА із СГПМ та СГ, схема рис. 6 має у своєму складі блок комутованого навантаження LOAD та блок TURBINE. Збудження генератора, як це видно на рис. 7, здійснюється при запуску моделі. На часових осцилограмах параметрів ДГА рис. 7 можна побачити, що разом із зміною навантаження змінюється не тільки напруга, що генерується, але й швидкість та момент обертання.

При певних співвідношеннях струму споживання та значення ємності (на осцилограмах не

показано) відбувається зрив генерації [16]. Тому прийнятне використання АГ в ДГА автономних генеруючих пристроїв залежить від можливостей засобів керування значенням реактивної складової збудження АГ, зокрема від конструктивно-комутуючих особливостей елементної бази – легких конденсаторів для БК. Тоді завдання керування режимами генерації ДГА буде полягати у регулюванні значень ємністю БК, тобто відповідно до режиму навантаження. Оскільки значення ємності БК може змінюватися тільки дискретно, то реалізація згаданих законів керування буде залежати від рівня використаних програмних мікропроцесорних комутуючих пристроїв.

При цьому необхідно враховувати додаткові капітальні витрати на монтаж БК, експлуатаційні

затрати на його обслуговування, а також заходи безпеки пов'язані з вибухонебезпечністю конденсаторів (неполярних) при функціонуванні в режимі зміни напрямку навантаження (скидання/накидання) [17]. До того ж, іноді кількість силових конденсаторів, яка необхідна для забезпечення режиму стійкої генерації АГ, може виявитись недоцільною за економічними міркуваннями.

Таким чином, враховуючи характер перепаду тисків, що діють у ВТ, для компоновки ДГА можна прийняти СГ, які забезпечують стабільну генерацію енергії при дії не тільки активних, а й реактивних навантажень.

**Висновки.** 1. Розглянуто функціонування математичних моделей детандер-генераторних агрегатів, в яких по черзі використовуються АГ, СГ та СГПМ в умовах дії збурень електричного навантаження.

Порівняння отриманих оцінок електромеханічних параметрів генерації ДГА дає змогу прийняти для подальшого розгляду ОК, в якому задіяно синхронний генератор з обмоткою збудження.

2. Отримано експериментальні дані, що необхідні для структурно-параметричного синтезу регулятора ДГА. Враховуючи взаємозв'язок електричних та механічних параметрів функціонування ДГА, наявність обмотки збудження СГ в якості окремого контуру керування відкриває можливості підвищення керованості ДГА при зміні навантаження.

3. Опрацьовано методику оцінки параметрів електричної генерації установки утилізації надлишкового тиску газу. Наступні кроки досліджень передбачають формалізацію операцій, що забезпечать комплексну оцінку параметрів генерації.

### Список літератури:

1. Мезеря А.Ю., Придворов С.С. Аналіз якісних показників використання різних типів генераторів на міні ГЕС. *Машинобудування*. 2023. № 31. С. 60–70. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-61-70>
2. Шевченко В.В., Куліш Я.Р. Аналіз можливостей використання різних типів генераторів для вітроенергетичних установок з урахуванням діапазону потужності. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. Харків: НТУ «ХПІ». № 65(1038). С. 107–117.
3. Головкин В.М., Монахов Є.А., Пономарьов О.І., Коваленко І.Я. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 2(53). С. 29–37.
4. Бойко С., Городній О., Касаткіна І., Долударєва Я., Вершняк Л. Вітроенергетичний комплекс для зарядження акумуляторних батарей. *Технічні науки та технології*. 2021. № 4(22). С. 156–162. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-156-162](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-156-162)
5. Шевченко В.В., Книш С.Ю., Занихайло Є.О. Економічне порівняння вітроенергетичних установок з різними типами електричних генераторів змінного струму. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 4(94). С. 94–98.
6. Тихевич О.О. Аналіз спільної роботи вітротурбіни і асинхронізованого синхронного генератора вітроенергетичної установки. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2003. Вип. 2(37). С. 70–75
7. Клепиков В.Б., Моїсєєв О.М., Семіков О.В. Дослідження режиму роботи асинхронного генератора із самозбудженням при ненасиченому магнітному колі. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. № 3. С. 286–288.
8. Kulinchenko H., Panych A., Leontiev P., Zhurba V. Simulation of the expander of the excess gas pressure utilization plant. *ScienceRise*. 2022. 3(80). P. 3–13. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002545>.
9. Михайлюк О.Б. Задачі, що потребують розв'язання при використанні асинхронних генераторів на електростанціях відновлюваної енергетики. 2016. *Вісник ВПІ*. Вип. 1. С. 96–100.
10. Чередник Н.Г., Бялобржеський О.В. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки у складі системи електропостачання малого промислового підприємства. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2015. Вип. 94. С. 139–146.
11. Kulinchenko H., Zhurba V., Panych A., Leontiev P. Development of the method of constructing the expander turbine rotation speed regulator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2, No. 2 (122). P. 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276587>.
12. Belloni F., Chiameo R., Gandolfi C., Villa A. Simulation model of a Permanent Magnet Synchronous Generator for grid studies. *RE&PQJ*. 2014. Vol. 1, No. 12. P. 276–281. <https://doi.org/10.24084/repqj12.310>
13. Голодний І.М., Лісовенко В.А. Дослідження на комп'ютерній моделі характеристик синхронного генератора. *Енергетика і автоматика*. 2019. № 4. С. 100–107. <https://doi.org/10.31548/energiya2019.04.100>.
14. Spoljaric Z, Miklosevic K., Jerkovic V. Synchronous generator modeling using MATLAB. *SIP 2010 28th International Conference Science in Practice*. Subotica Tech–College of Applied Sciences. Subotica, Serbia, 2010. P. 147–154.



15. Вербовий А.П. Моделювання роботи гідроаккумуляційної електростанції в насосному режимі при живленні від вітроелектростанції з асинхронним генератором. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4(59). С. 56–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).56–63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).56-63)

16. Кулінченко Г.В., Зборщик О.П., Лелюх О.М. Оцінка параметрів генератора детандер-генераторного агрегату. *XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»*: матеріали конференції. Кременчук: КрНУ. 2020. С. 120–122.

17. Мокін Б.І., Мокін О.Б., Жуков О.А. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій. *Вісник ВПІ*. 2007. № 6. С. 52–62.

**Kulinchenko H.V., Panych A.O., Buhaiets P.I., Davydenko I.L., Levkovskiy O.V. THE EVALUATION OF THE GAS PRESSURE UTILIZATION PLANT ELECTRICAL GENERATION PARAMETERS**

*The main trends of research on increasing the energy efficiency of generating plants of alternative energy are represented by specific aspects of research on generating plants of a certain type. These aspects are determined by the fields of knowledge that form known research methods. This applies to generators, turbines or control systems. However, a systemic approach is more promising, which involves a comprehensive analysis of the control object, when the components of the overall process are considered in interaction. Considering the expander-generator unit (EGU), which is used to utilize of the excess pressure of gas distribution networks, the specifics of the vortex turbine used as an expander are taken into account. Considering the trends in the construction of generating plants of alternative energy, the application options of generators of various types were analyzed. Factors for choosing the type of generator are not limited to dimensions and cost indicators. Ensuring the characteristics of the quality of electricity generation is a generalizing factor that determines the efficiency of generation, since the development of means of controlling the generation installation depends on the applied approaches and technical means. The purpose of the work is to develop methods for evaluating the quality parameters of electric energy generation produced by the EGU. The main task is presented as a study of the nature of the interaction of electrical and mechanical processes, where the factor of change is the type of generator involved. The paper examines the operation of mathematical models of EGU, in which asynchronous, synchronous and synchronous generators with permanent magnets are alternately used under the conditions of electrical load disturbances. Experimental data necessary for the structural-parametric synthesis of the EGU regulator were obtained. Considering the relationship between the electrical and mechanical parameters of the EGU operation, the presence of the excitation winding of the synchronous generator as a separate control circuit opens up the possibility of increasing the controllability of the EGU when the load changes. The methodology for evaluating the parameters of the electrical generation of the overpressure gas utilization facility has been developed.*

**Key words:** expander-generator unit, generator, electricity quality, mathematical model.

**Кучеренко О.І.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО СИСТЕМИ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ДРОНІВ

У даній статті виконано огляд досліджень науковців щодо системи побудови маршрутів дронів у залежності від конкретних умов та поставленої мети, наприклад мінімізація витрат енергії, зниження рівня шуму, збільшення ефективної дальності польоту дрона без додаткової зарядки, мінімізація часу польоту тощо. В роботі, у тому числі, розглянуто варіанти вирішення науковцями складних задач, що не мають точного розв'язку. Також розглянуто методи оптимізації розв'язку задач для великої кількості дронів та адресатів. Проведено огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів з врахуванням різних потреб і задач, які іноді можуть бути досить суперечливими, відповідно вимагають індивідуальних алгоритмів вирішення. У той же час результати деяких досліджень можуть бути поєднані для досягнення комплексного ефекту. Важливо відмітити, що розглянуті в роботі алгоритми можна умовно поділити на дві групи: (1) ті, які для побудови маршрутів мають обраховуватись на стороні інформаційної системи та (2) технічними засобами безпосередньо безпілотного літального апарата, наприклад у випадку динамічної побудови маршруту. Розглянуто переваги використання нейромережевого моделювання в частині зменшення часу оперативного формування траєкторії польоту квадрокоптера. В роботі було розглянуто алгоритми розширення зони доставки дронами за допомогою системи громадського транспорту, комбінованої доставки вантажівкою та дроном, побудови маршрутів наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, забезпечення максимального огляду місцевості камерою дрону, зміни формування групи дронів для зменшення використання енергії, мінімізації шумового забруднення безпілотними літальними апаратами. Для більшості озвучених задач існують рішення, що можуть бути використані практично. Проте, досі є зони для додаткових досліджень, оскільки ряд вхідних параметрів не було враховано взагалі або враховано за спрощеними методами.

**Ключові слова:** БПЛА, дрон, маршрут, доставка вантажів, оптимальний маршрут, логістика.

**Постановка проблеми.** У цей час розвиток технологій дає можливості людству автоматизувати надзвичайно велику кількість рутинних задач. Головною особливістю стає те, що пристрої, що виконують автоматизацію рутинних задач, стають все меншими, але у той же час «розумнішими». Однією з задач автоматизації є задача побудови маршрутів доставки вантажів на так званій ділянці «останньої милі» або в умовах жорстких обмежень, наприклад обмеженого часу, ліміт щодо затрат ресурсів, виконання завдання у час пік та ін. Зручним засобом доставки вантажів постають безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони. Завданням науковців все частіше стає розробка методологій побудови оптимальних маршрутів для тих чи інших потреб. Потреби можуть надзвичайно сильно варіюватись – від самої звичайної доставки вантажу з точки А у точку Б або розрахунку найбільш економного з точки зору витрат

маршруту, аж до доволі спеціалізованих задач, таких як, сканування поверхні певної території для виявлення об'єктів, що цікавлять, створення карт місцевості тощо. Також це можуть бути звичайні запити від зацікавлених осіб з метою підвищення рівня комфорту при використанні БПЛА. Для прикладу з метою зниження рівня шумового забруднення, полегшення процесів завантаження та розвантаження та ін. Причому одні можуть прямо суперечити іншим. Відповідно, вирішення проблеми побудови оптимального маршруту буде ризиком у залежності від конкретної потреби.

Існує багато досліджень щодо побудови маршрутів руху БПЛА від початкової точки до пункту призначення. Натомість, через практичну цінність, великої актуальності набувають більш складні задачі, методологія планування маршрутів для яких враховує специфічні вимоги та обмеження, такі як: вплив погодних умов на дальність

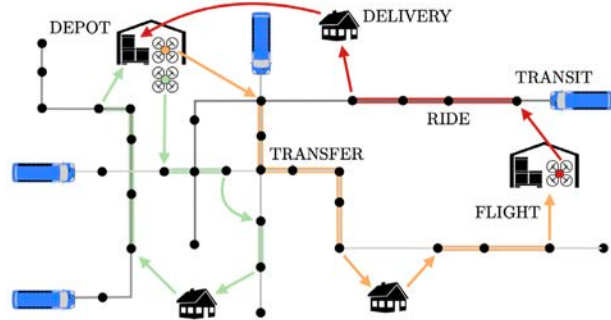
польоту дрона, заборона руху на певних висотах чи заданими районами, синхронізація місцезнаходження дрона з іншими учасниками процесу транспортування вантажів тощо. Велика кількість вхідних параметрів ускладнює алгоритми та методології вирішення поставлених задач, змушуючи дослідників або не враховувати другорядні параметри взагалі, або ж враховувати їх з використанням менш точних спрощених алгоритмів. Розвиток нових технологій, зазвичай, сприяє введенню нових вхідних даних, які також потрібно брати до уваги. Отже, можна стверджувати, що існуючі дослідження не враховують всі можливі параметри, а відповідно є області для додаткових досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задача побудови маршрутів руху дронів набуває все більшого розповсюдження з розвитком технічного прогресу. Велика кількість вчених приділяла увагу цій темі, у тому числі: Алькуз Б. (Alkouz B.) [8], Бугеттайя А. (Bouguettaya A.) [8], Карлссон Й. Г. (Carlsson J. G.) [4], Чаудурі С. (Choudhury S.) [1], Делалай Д. (Delahaye D.) [9], Фелнер А. (Felner A.) [3], Гуо С. (Guo S.) [8], Габібейлі Т. (Habibbeyli T.) [6], Кохендерфер М. Дж. (Kochenderfer M. J.) [1], Лакдари А. (Lakhdari A.) [8], Мао С. (Mao X.) [2], Скоццаро Дж. (Scozzaro G.) [9], Шахзад Б. (Shahzaad B.) [8], Шарон Г. (Sharon G.) [3], Соловей К. (Solovey K.) [1], Сонг С. (Song S.) [4], Штерн Р. (Stem R.) [3], Стертевант Н. (Sturtevant N.) [3], Павоне М. (Pavone M.), Тонг Б. (Tong B.) [2], Вела А. Е. (Vela A. E.) [9], Ванг Дж. (Wang J.) [2], Ванг С. (Wang X) [2], Чжоу Ф. (Zhou F.) [2], Чжен В. (Zheng W.) [2], а також Дашкевич А. О. [7], Шоман О. В. [7], та ін.

**Метою роботи** є огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів, а також досліджень, що можуть вплинути на алгоритми побудови маршрутів.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі [1] розглянуто проблему маршрутизації великого парку безпілотників для одночасної доставки посилок на широких міських територіях. Для збільшення ефективної дальності польоту та простору можливих доставок, а також економії заряду, розглядається можливість окрім прямих польотів, також використання засобів громадського транспорту, таких як автобуси та трамваї (рис. 1). Автори зазначають, що розрахунки ускладнені через великий розмір транзитних мереж. У роботі представлено комплексну алгоритмічну структуру, що прагне мінімізувати максимальний час для виконання будь-якої доставки та вирішує багатогранні

обчислювальні проблеми за допомогою дворівневого підходу. Перший рівень призначає дронам послідовності доставки вантажів з приблизно оптимальним поліноміальним алгоритмом розподілу часу. На другому рівні виконується розподіл шляхом періодичної маршрутизації флоту через транзитну мережу, використовуючи ефективні, обмежені неоптимальні багатоагентні методи пошуку шляху [1].



**Рис. 1. Приклад побудованих маршрутів дронів з використанням засобів громадського транспорту (за Чаудурі С., Соловей К., Кохендерфер М. Дж. та Павоне М.) [1]**

Автори зазначають, що вирішити поставлену задачу можна було б як змішану цілочисельну лінійну програму (MILP), однак в реальних умовах (сотні дронів, тисячі пакунків, великі транзитні мережі) навіть найсучасніші підходи MILP погано масштабуються. Тому методологія авторів полягає у розділенні проблеми на дві окремі підпроблеми, що вирішуються поетапно [1].

Задачею верхнього рівня (першого етапу) автори визначили розподіл завдань, щоб вирішити, які вантажі доставляються яким дроном і в якому порядку. У якості вхідних даних алгоритм верхнього рівня приймає склади та місця доставки посилок, а також оцінку часу подорожі дрона між кожною парою місць. Автори розробили ефективний поліноміальний алгоритм розподілу завдань із приблизно оптимальним діапазоном виконання [1].

У якості задачі для нижнього рівня дослідники визначили задачу планування маршруту для кожного з безпілотників, щоб виконати призначені завдання доставки. Розроблений алгоритм нижнього рівня генерує детальні маршрути розташування безпілотників у просторі та часі, а також транзитних транспортних засобів. Тут же відбувається врахування зміни транзитної мережі в часі. Цей рівень також відповідає за те, що кілька безпілотників не сядуть на транспортний засіб одночасно, жоден транзитний транспортний засіб не

перевищить свою вантажопідйомність, а також за дотримання обмеження щодо енерговитрат дрона. Для ефективного вирішення індивідуальних обмежень та обмежень між дронами, автори розглядають проблему маршрутизації як розширення багатоагентного пошуку шляху (MAPF) до транзитних мереж. Вони адаптували масштабований, обмежений субоптимальний варіант високоефективного вирішувача MAPF під назвою Conflict-Based Search [3] для вирішення проблеми планування набору маршрутів, по одному для кожного дрона (для доставки поточного пакета). Повна послідовність завдань доставки виконується у манері відступаючого горизонту, переплановуючи маршрут наступного завдання дрона після того, як він виконає поточне [1].

Для узгодження розрахунків вищого та нижчого рівнів автори використали сурогатну оцінку витрат. Чим краще сурогатна оцінка, яка використовується для розподілу завдань на першому етапі, тим вищий рівень поєднання зв'язків, тобто тим краще рішення першого етапу для другого [1].

Дослідники продемонстрували ефективність підходу за допомогою широкомасштабного моделювання з двома реальними транзитними мережами, використанням до 200 дронів, 5000 відправлень і до 8000 зупинок у транзитній мережі. Структура виявилась здатною до масштабування, обчислюючи рішення, близькі до оптимальних, які задовольняють численні системні обмеження, як правило, протягом декількох секунд. Дослідники встановили, що їх підхід дозволяє збільшити ефективну дальність польоту за допомогою наземного транспорту до 360% [1].

В роботі [2] розглянуто проблему побудови оптимального маршруту для доставки вантажівкою з безпілотником. Науковці Тонг Б., Ванг Дж., Ванг С., Чжоу Ф., Мао С., Чжен В. зазначають, що більшість наявних досліджень про розв'язання проблеми доставки парою вантажівка-дрон, що є окремим випадком задачі комівояжера з дроном (TSP-D), ігнорують час очікування вантажівки в точках зустрічі. Тому автори створили змішану цілочисельну модель нелінійного програмування, яка враховує часові обмеження та обмеження маршруту, з метою мінімізації загального часу доставки. Запропонована модель розв'язана за допомогою алгоритму пошуку зі змінною околицею та забороненими рухами (Variable Neighborhood Tabu Search Algorithm). На рисунку 2 представлена блок-схема алгоритму [2], де  $K$  – кількість ітерацій,  $T_L$  – список табу,  $\Omega^K$  – поточне рішення,  $\Omega^B$  – оптимальне рішення,

$\Omega^N$  – рішення для сусідства,  $\tau^K$  – поточне значення цільової функції,  $\tau^N$  – значення цільової функції для рішення по сусідству.

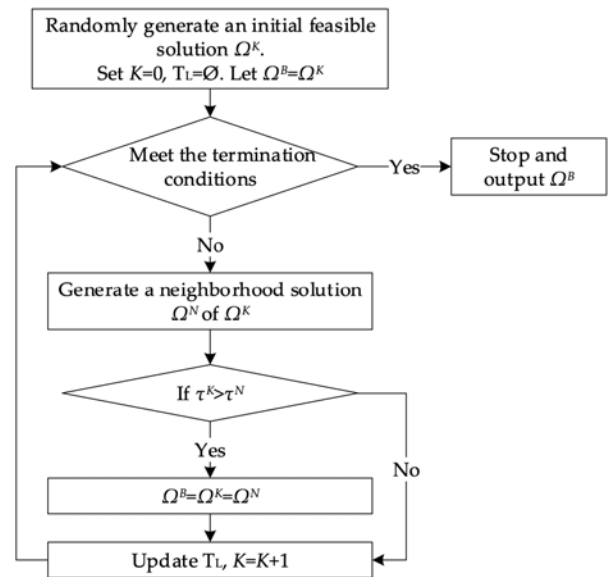


Рис. 2. Блок-схема алгоритму пошуку зі змінною околицею та забороненими рухами за Тонг Б., Ванг Дж., Ванг С., Чжоу Ф., Мао С., Чжен В. [2]

Дослідники встановили, що доставка у тандемі вантажівкою та дроном може ефективно скоротити загальний час доставки на 20,1% порівняно з традиційною доставкою виключно вантажівкою; більша кількість пар вантажівка-дрон може ефективно зменшити загальний час доставки, але гранична вигода поступово зменшується; збільшення лише швидкості вантажівки або швидкості дрона не може мінімізувати час доставки, через необхідність чекати у точці зустрічі. Автори прийшли до висновку, що лише синхронне збільшення швидкостей обох, вантажівки та дрона, можуть суттєво зменшити загальний час доставки [2], а також зазначають, що їх результат узгоджується з висновком, зробленим Карлсоном та Сонгом у [4].

Науковці Карлссон Й. Г. та Сонг С. у своїй роботі [4] зайнялись визначенням ефективності гібридного підходу доставки дроном та вантажівкою. Вони досліджували скільки покращень можна реалізувати математично обґрунтованим способом, за якого БПЛА (або парк БПЛА) надає послуги клієнтам, виконуючи доставки вантажів на кінцевій частині маршруту, повертаючись до вантажівки після доставки вантажу, яка також рухається. Автори зазначають, що незважаючи на те, що апаратне забезпечення для таких систем вже створено та існує (одна конкретна реалізація, яка називається «HorseFly», що була розро-

блена спільно AMP Electric Vehicles та Університетом Цинциннаті), проте поки що не зрозуміло, наскільки такий підхід може насправді забезпечити покращену якість обслуговування [4].

Автори підкреслюють, що проблему маршрутизації «HorseFly» надзвичайно важко розв'язати до оптимальності, оскільки це узагальнення проблеми комівояжера, яка вимагає розгляду місць зустрічі вантажівки та БПЛА. Таким чином, до цієї проблеми використаний підхід з парадигми безперервної апроксимації, в якій замість детальних даних використовуються короткі підсумки, а замість числових методів аналітичні моделі. Автори вирішили звести задачу до невеликого набору параметрів, а потім визначити, як ці параметри впливають на розв'язок задачі. Якщо коротко, розроблена модель припускає, що клієнти розподілені відповідно до відомої щільності ймовірності в евклідовій площині [4].

Карлсон та Сонг у своєму дослідженні зробили формальне визначення проблеми маршрутизації, в якій необхідно координувати вантажівку та один БПЛА (маршрутизація «HorseFly» з однією вантажівкою та одним БПЛА). Оптимальний тур точками  $p_1, \dots, p_n$  – розв'язок оптимізаційної задачі

$$\underset{x_1, \dots, x_n, \sigma \in S_n}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^n \max \left\{ \frac{1}{\phi_0} \|x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)}\|, \frac{1}{\phi_1} (\|x_{\sigma(i)} - p_{\sigma(i)}\| + \|p_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)}\|) \right\}$$

де  $p_1, \dots, p_n$  – набір точок на площині,  $\phi_0, \phi_1 > 0$  – швидкості вантажівки та БПЛА відповідно, причому  $\phi_0 < \phi_1$ ,  $S_n \in \sigma$  – множина всіх перестановок набору  $\{1, \dots, n\}$ , з доданою умовою, що  $\sigma(n+1) = \sigma(1)$  [4].

Автори провели дві обчислювальні симуляції, які підтвердили, що використаний ними підхід безперервної апроксимації є дійсним на практиці. Перше моделювання вони провели в евклідовій площині, тоді як друге використовувало інформацію про пересування в режимі реального часу у дорожній мережі за допомогою Google Directions API [4, 5].

Використовуючи асимптотичний теоретичний аналіз у евклідовій площині, а також набір обчислювальних експериментів, дослідники дійшли висновку, що підвищення ефективності завдяки доповненню вантажівки доставки дроном є пропорційним кореню квадратному зі співвідношення швидкостей вантажівки та дрона. Проте, автори зазначили, що у їх аналізі є слабе місце – вони використовують евристичні методи для обчислення скоординованих маршрутів між вантажівкою та дроном, а не справжнє глобально оптимальне рішення [4].

У роботі [6] Тунджай Габіббейлі (Tunjay Nabibbayli) розповідає про використання техноло-

гічних рішень компанії DJI для керування квадрокоптерами з інтелектуальними режимами польоту з метою наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, що характеризується великими гірськими та лісовими районами. Мова йде про вирішення задач автоматичного керування [6].

Т. Габіббейлі відзначає, що в умовах відсутності необхідної кількості інформації неможливо побудувати точну математичну модель керування маршрутом польоту дрона. Автор пропонує застосовувати методи нечіткої логіки в управлінні квадрокоптером, які передбачають компіляцію евристичних знань та використання інтуїтивно зрозумілих даних. Т. Габіббейлі окреслив два аспекти нечітких підходів до вирішення задач автоматичного керування. Перший – це створення класифікатора можливих ситуацій, де описані цілі та завдання функціонування динамічної системи. Другий підхід передбачає пряме нечітке регулювання змінних об'єкта керування. Автором запропоновано алгоритм створення «розумної» системи уникнення перешкод для автопілотування дрона на основі комбінованого використання системи нечіткого логічного висновку та багатошарової прямої нейронної мережі [6].

В роботі [6] за основу взято квадрокоптер DJI Mavic 2, оснащений шістьма датчиками для виявлення перешкод у всіх напрямках. Завдяки системі автопілота Flight Autonomy всі дані передаються та обробляються постійно в режимі реального часу. У якості алгоритму формування траєкторії польоту запропоновано використати нечітку систему висновків на основі аналізу експертних та емпіричних даних. Цей алгоритм забезпечує наземне автопілотування дрона, оснащеного датчиками виявлення перешкод у п'яти секторах фронтального огляду [6].

Дослідник запропонував свій алгоритм формування маршруту автопілотування квадрокоптера в п'яти напрямках, в якому розглядається обмежений набір логічно послідовних правил у вигляді дев'ятнадцяти інформаційних фрагментів. Наприклад, «Якщо на траєкторії польоту квадрокоптера не виявлено будь-якої перешкоди або вона знаходиться занадто далеко, то немає необхідності змінювати напрямок, висоту і знижувати швидкість» і так далі. На основі фрагментів запропоновано створити правила у символічній формі, які узгоджуються з необхідними діями (реакціями) одного з параметрів: швидкість, поворот, крок. В результаті формується таблиця коефіцієнтів. Вхідними параметрами є дані з п'яти секторів, вихідними: коефіцієнти зміни швидкості, повороту, кроку.

Отримана таблиця є евристичною базою знань, що використовується багаточисловою нейронною мережею для побудови аналітичної моделі формування траєкторії польоту дрона. Результатом роботи нейромережі є робоча апроксимована модель формування траєкторії польоту, у якій врахований відносний вплив кожного з вхідних параметрів [6].

У роботі [7] науковці Дашкевич А.О. та Шоман О.В. пропонують підхід, за допомогою якого можна визначити набір точок, які забезпечать максимальний огляд місцевості камерою дрону. Зазначається, що це може бути корисним у плануванні маршрутів польоту дронів при аерофотозйомці територій [7].

Спосіб вирішення задачі максимального огляду місцевості автори формулюють наступним чином. У якості вхідних даних використовується полігональна модель місцевості. Алгоритм передбачає розташування півсфери у центрі кожного полігону, з центру якого «випускаються» промені заданої відстані. У результаті отримується множина точок-кандидатів, яку потрібно дискретизувати на регулярну сітку площини. Далі проводиться пошук полігонів видимих з точок-кандидатів за допомогою просторового хешування. Після операцій сортування, розрахунку кількості видимих полігонів та тестування коефіцієнту покриття, отримується вихідна множина точок з максимальним оглядом [7].

Автори провели низку експериментів з метою вивчення впливу таких параметрів як роздільна здатність сітки та ін. на результати роботи свого алгоритму [7].

Як зазначають автори, запропонований метод дає можливість визначити мінімальну кількість точок розташування дронів для досягнення максимального огляду поверхні місцевості. Недоліком розробленого методу є неможливість аналітичного визначення роздільної здатності сітки [7].

Інше цікаве дослідження провела група авторів Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]. Вони у своїй роботі дослідили залежність кількості використаної енергії роєм дронів в залежності від їх формування у повітрі [8]. Автори зазначають, що формування у зграї є природною поведінкою птахів. Наприклад при міграції гуси летять у формі V для збереження енергії за рахунок підйомної сили, яка створюється сусідніми птахами. Це може бути використане при одночасній доставці вантажів групою дронів. Автори розглянули чотири формування: фронт (Front), ряд (Column), V або ешелон (Echelon) (рис. 3).

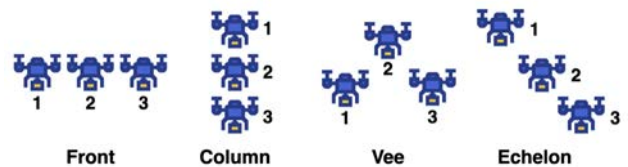


Рис. 3. Види формувань зграї дронів за Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]

У результаті вони зібрали набір даних про формування дронів. Результати були отримані за рахунок моделювання впливу вітру на політ дрона на закритому випробувальному стенді з використанням спеціально створеної системи глобального позиціонування на основі зображень. У якості зграї використовувалась група з трьох безпілотників, які літали напротязі однієї хвилини у кожному з формувань за трьох умов впливу вітру (без вітру, фронтальний та боковий вітер). Швидкість вітру 6,1 км/год. Збирались такі види даних як: кути нахилу, крену, повороту, швидкість осей (x, y та z), найнижча та найвища температури в градусах Цельсія, відсоток заряду батареї, вимірювання барометра, час роботи двигуна і прискорення по осях (x, y і z) [8].

На рис. 4 представлені показники середнього споживання енергії всіх дронів у різних формуваннях та умов вітру протягом однієї хвилини. Так, у випадку відсутності вітру найменш енергозатратним виявилось V формування. Однак дане формування споживає найбільшу кількість енергії при бічному вітрі. А ось формування у вигляді ряду споживає найменшу кількість енергії при бічному вітрі, який забезпечує підйомну силу для всіх дронів [8].

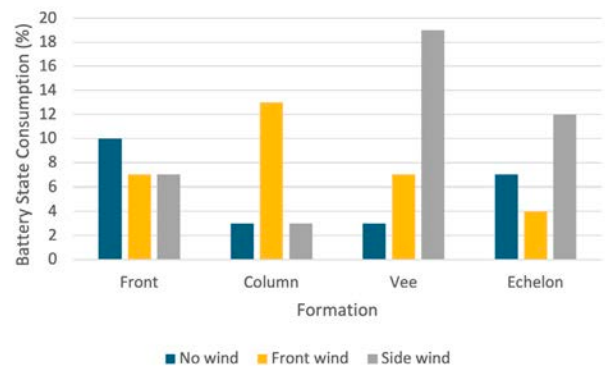


Рис. 4. Витрати заряду акумулятора різних формувань за Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]

У роботі [9] група авторів (Скоззаро Дж., Делайгай Д. та Вела А. Е.) розповідає про значне збільшення повітряного руху БПЛА в міських районах і, як наслідок, зростання рівня шуму останніми роками, не дивлячись на технічний прогрес щодо зменшення шумності двигунів. Автори

посилаються на результат дослідження, зробленого Національним управлінням з авіонавтики та дослідження космічного простору (NASA), яке говорить про набагато більшу роздратованість людей шумом, створюваним БПЛА, а ніж традиційним авіаційним шумом [10]. Тому автори сконцентрувались на застосуванні основ дослідження операцій для мінімізації шумового забруднення парку БПЛА [1].

Вирішувати проблему зменшення рівня шуму автори вирішили за рахунок розподілу трафіку. Для подолання проблем, пов'язаних зі стандартною транспортною задачею, дослідники використовують лінійні маршрути сегментів. Для подолання проблем, пов'язаних з доцільністю обчислень у великих просторах пошуку, вони обрали алгоритм Імітованого відпау (Simulated annealing), де генерація маршрутів виконується в сітці (рис. 5), розмірність якої пов'язана із розміром частин міста, наприклад 20x20 кв.м. За задумом авторів кожній клітинці відповідають свої максимальна висота будівлі та рівень чутливості до шуму з врахуванням зонування (житлова, комерційна, промислова). Вони також врахували ефект маскування шуму сусідніми будівлями [9].

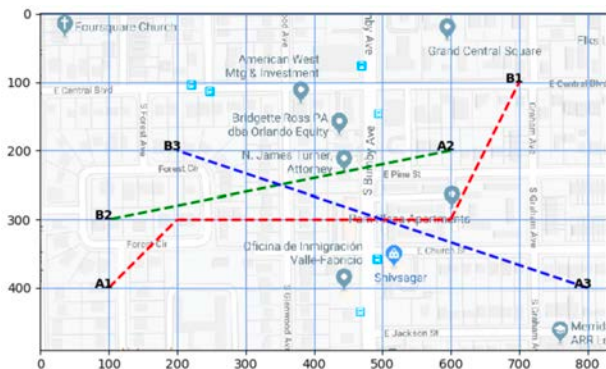


Рис. 5. Карта міста розділена на квадрати (за Скоззаро Дж., Делагай Д. та Вела А. Е.) [9]

Для генерації нового маршруту, що зменшуватиме рівень шуму відносно основного, автори використали алгоритм Єна [11], який дозволяє перерахувати k-найкоротші шляхи між двома точками і, таким чином, підрахувати всі шляхи між двома точками. Оптимізацію своєї моделі автори виконали шляхом обрання оптимального шляху із запропонованих алгоритмом Єна варіантів з врахуванням порогу допустимого рівня шуму (55dB), а також з використанням вагового коефіцієнту для балансування впливу шуму та енерговитрат. Автори зазначають, що задача оптимізації є NP складною, й пропонують використати мета-евристику для її вирішення, а саме метод Імітованого відпау. Науковці відзначають його перевагу – можливість ретельно дослідити простір станів, за рахунок прийняття переходів, що погіршу-

ють ціль. Це означає, що у результаті може бути побудований такий компромісний маршрут, на певних ділянках якого буде перевищений шумовий поріг, але в цілому загальна кількість шуму буде найменша з усіх варіантів. У реалізації свого алгоритму автори використовують метод активного видалення існуючих траєкторій та введення нових, з обов'язковим перерахунком шумового сліду після кожної такої операції та оновленням показників ефективності для всіх рішень. Цей принцип узагальнено на рис. 6 [9].

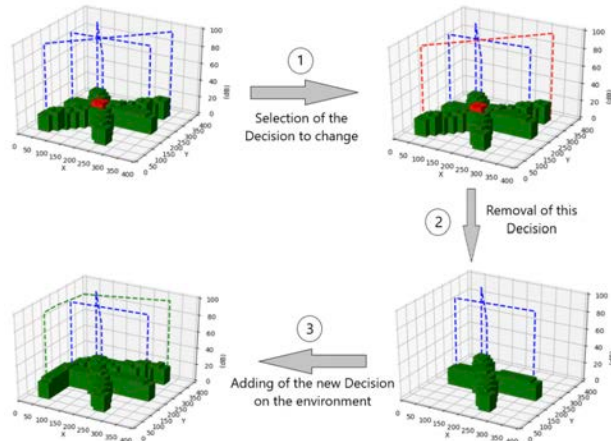


Рис. 6. Ілюстрація оптимізації (за Скоззаро Дж., Делагай Д. та Вела А. Е.) [9]

Хоча в роботі [9] не враховано багато параметрів, таких як: час, оцінка шумового роздратування, колізії БПЛА, проте виконана авторами симуляція показала можливість зменшення рівня шумового забруднення до значення нижче порогового (55dB) до 99,1% випадків [9].

**Висновки.** У статті зроблено огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів з врахуванням різних потреб і задач, які іноді можуть бути досить суперечливими, відповідно вимагають індивідуальних алгоритмів вирішення. У той же час результати деяких досліджень можуть бути поєднані для досягнення комплексного ефекту. В роботі було розглянуто алгоритми розширення зони доставки дронами за допомогою системи громадського транспорту, комбінованої доставки вантажівкою та дроном, побудови маршрутів наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, забезпечення максимального огляду місцевості камерою дрону, зміни формування групи дронів для зменшення використання енергії, мінімізації шумового забруднення безпілотними літальними апаратами. Для більшості озвучених задач існують рішення, що можуть бути використані практично. Проте, досі є зони для додаткових досліджень, оскільки ряд вхідних параметрів не було враховано взагалі або враховано за спрощеними методами.

Перспективами подальших досліджень є: оптимізація розміщення складів та депо у багатоагентних системах; розширення можливостей використання транзитних мереж при доставці дронами за допомогою залучення нових видів транспорту; винахід нових формувань дронів та оцінка їх впливу на споживання енергії та швидкість руху; вдосконалення існуючих алгоритмів планування маршрутів, що базуються на використанні сенсорів дрона; оцінка рівня шуму у реальних умовах міста та проведення експериментів на людях для визначення рівня шумового роздратування;

пошук нових конструкцій дронів з метою зменшення рівня створюваного шуму; покращення алгоритмів побудови маршрутів руху дрона у парі з вантажівкою, а саме врахування невизначеності, наприклад, швидкості вантажівок і дронів протягом усього часу доставки, часу обробки посилок в пунктах обслуговування клієнтів; розробка алгоритмів планування маршрутів таким чином, щоб якомога частіше дрони літали зграями, економлячи енергію; пошук нових областей застосування дронів, постановка задач та розробка специфічних алгоритмів, що будуть їх вирішувати.

#### Список літератури:

1. Efficient Large-Scale Multi-Drone Delivery using Transit Networks / S. Choudhury et al. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021. Vol. 70. P. 757–788.
2. Optimal Route Planning for Truck–Drone Delivery Using Variable Neighborhood Tabu Search Algorithm / B. Tong et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 529.
3. Conflict-Based Search For Optimal Multi-Agent Path Finding / G. Sharon et al. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 26, no. 1. P. 563–569.
4. Carlsson J. G., Song S. Coordinated logistics with a truck and a drone. *Management science*. 2018. Vol. 64, no. 9. P. 4052–4069.
5. Google Maps Directions API. *Google Maps Platform*. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/overview>.
6. Habibbayli T. H. Formation of the quadcopter flight path under overland monitoring using neuro-fuzzy modeling methods. *Mathematical machines and systems*. 2022. Vol. 3. P. 97–107.
7. Dashkevich A., Shoman O. Method of determining the set of drone positions to cover maximum visibility of the terrain. *Modern problems of modeling*. 2020. Vol. 18. P. 99–105.
8. Drone Formation for Efficient Swarm Energy Consumption / S. Guo et al. *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, Atlanta, GA, USA, 13–17 March 2023. 2023.
9. Scozzaro G., Delahaye D., Vela A. E. Noise abatement trajectories for a uav delivery fleet. *SID 2019, 9th SESAR innovation days*. 2019.
10. Christian A. W., Cabell R. Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise. *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Denver, Colorado. Reston, Virginia, 2017.
11. Martins E. V., Pascoal M. B. A new implementation of Yen's ranking loopless paths algorithm. *Quarterly journal of the belgian, french and italian operations research societies*. 2003. Vol. 1, no. 2.

#### Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A. OVERVIEW OF RESEARCH ON THE DRONE ROUTE CONSTRUCTION SYSTEM

*This article provides an overview of scientists' research on the drone route construction system depending on specific conditions and the set goal, for example, minimizing energy consumption, reducing noise, increasing the effective flight range of the drone without additional charging, minimizing flight time, etc. In the work, among other things, options for solving complex problems that do not have an exact solution are considered by scientists. Methods of optimizing the solution of problems for a large number of drones and addressees are also considered. A review of research on the drone route construction system was conducted, taking into account various needs and tasks, which can sometimes be quite contradictory, respectively, requiring individual solution algorithms. At the same time, the results of some studies can be combined to achieve a complex effect. It is important to note that the algorithms considered in the work can be conditionally divided into two groups: (1) those that must be calculated on the side of the information system for route construction and (2) by technical means directly of the unmanned aerial vehicle, for example in the case of dynamic route construction. The advantages of using neural network modeling in terms of reducing the time of operational formation of the quadcopter flight trajectory are considered. The work considered the algorithms for expanding the drone delivery area using the public transport system, combined delivery by truck and drone, building routes for ground monitoring of infrastructure and agriculture, ensuring the maximum overview of the area with a drone camera, changing the formation of a group of drones to reduce energy use, and minimizing noise pollution by drones aircraft. For most of the stated problems, there are solutions that can be used practically. However, there are still areas for additional research, as many input parameters were not taken into account at all or taken into account using simplified methods.*

**Key words:** UAV, drone, route, cargo delivery, optimal route, logistics.



**Лагута В.В.**

Український державний університет науки і технологій

**Тимошенко Л.С.**

Український державний університет науки і технологій

## ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПОТОЧНОГО СТАНУ

Розглянуто оптимізацію вибору параметрів ефективності елементів системи залізничної автоматики та телемеханіки (СЗАТ) з урахуванням їх поточного стану. Зокрема, досліджуються показники надійності та функціональної безпеки, які дозволяють визначити ефективність функціонування СЗАТ. В статті наведені основні принципи, що впливають на успішне виконання системи СЗАТ. Аналізуються параметри надійності елементів, такі як коефіцієнти готовності, час вимушеного простою, частота профілактичних заходів та їх вплив на експлуатаційні показники системи управління рухом поїздів. Особлива увага приділяється аналізу стандартів і нормативів, які регламентують значення функціональної безпеки. Автори зазначають, що жорсткі нормативи можуть ускладнювати розробку систем СЗАТ, тоді як менш жорсткі можуть призводити до ризику залізничних аварій. Для великої кількості відповідальних функцій системи, вимоги до функціональної безпеки можуть знижуватись пропорційно до їх числа. У статті пропонуються підходи до визначення параметрів ефективності елементів СЗАТ з використанням аналізу вартісних характеристик технічного обслуговування, експлуатаційних витрат та надійності систем. Основна мета роботи полягає в обґрунтуванні вибору показників надійності, що дозволяють оцінити поточний стан елементів СЗАТ та використання обраних показників для подальшого функціонування системи. Дослідження акцентує увагу на важливості моніторингу технічного стану об'єктів системи залізничної автоматики для передбачення та управління процесами діагностики та технічного обслуговування засобів автоматики. Висновки роботи дають можливість провести прогноз стосовно виконання відновлювальних заходів засобів СЗАТ з урахуванням їхньої надійності та поточного стану. Отже, розглянуто параметри ефективності елементів системи залізничної автоматики та телемеханіки з урахуванням їхнього поточного стану, що сприяє розумінню та вдосконаленню процесів експлуатації та обслуговування залізничних систем.

**Ключові слова:** імовірність відмов, аналіз системи залізничної автоматики, системи з обслуговуванням, параметри надійності систем, надійність технічних засобів.

**Постановка проблеми.** Особливістю ефективності системи залізничної автоматики та телемеханіки (СЗАТ) є надзвичайно відповідальна роль у виконанні перевізного процесу та забезпечення безпеки руху поїздів. Відмови елементів СЗАТ можуть привести не лише до економічних втрат, спричинених зменшенням пропускної спроможності залізничних доріг, а й збільшити небезпечний стан системи керування руху поїздів.

Розв'язок багатьох завдань, заснованих на кількісній оцінці ефективності СЗАТ [1, с. 25], пов'язано з необхідністю визначення кількісного показника, який представляє собою деяку імовірність виконання тим чи іншим засобом поставленого завдання. Змістом цього завдання повинно відображатися призначення та умови використання засобу, що досліджується, а також враховувати місце у системі.

Завданням дослідження є встановлення ряду основних положень, при спільному дотриманні яких система може успішно виконувати свої функції:

- система повинна завжди бути готова до використання за призначенням та бути працездатною;

- справна система повинна мати такі характеристики, сукупність яких забезпечує успішне виконання завдання.

Необхідною умовою успішного виконання завдання системою є постійне збереження її у справному в процесі експлуатації. Успішність виконання цієї умови залежить і від живучості надійності засобів, і від умов їх використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Параметри надійності елементів СЗАТ дозволя-

ють встановити рівень ефективного застосування СЗАТ. Для правильної оцінки надійності можуть застосовуватись технічні та організаційні коефіцієнти, які характеризують:

- співвідношення між часом роботи та часом простою елементів СЗАТ (коефіцієнти готовності, вимушеного простою, профілактики);
- частоту профілактичних заходів щодо попередження відмов;
- вплив надійності елементів СЗАТ на експлуатаційні показники системи управління руху поїздів в цілому;
- надійність [2, с. 17].

Показники надійності безпосередньо пов'язані з розрахунком нормативних показників функціональної безпеки (ФБ), значення яких мають бути науково обґрунтованими. Більш жорсткі нормативи щодо ФБ призводять до ускладнення розробки СЗАТ, а менш жорсткі – призводять до залізничних аварій та катастроф [3, с. 2]. У міжнародних та європейських стандартах регламентують допустимі ймовірності небезпечних відмов у годину або інтенсивності небезпечних відмов у розрахунку на одну функцію безпеки, які позначають SIL1–SIL4 [4, с. 2; 5, с. 12]. Необхідно відзначити, що для систем управління з малим числом функцій безпеки ці вимоги можуть бути прийнятними, але при великій кількості відповідальних функцій вимоги по ФБ до системи знижуються пропорційно до їх числа, тому що невиконання будь-якої функції безпеки призводить до небезпечного стану всієї системи в цілому [6, с. 182]. У [2, с. 110] запропоновано методи обґрунтування нормативів ФБ.

Як було зазначено, оцінювання ефективності надійності СЗАТ, як і інших технічних об'єктів, здійснюється кількома параметрами. У деяких випадках необхідно надати поточний стан об'єкта кількома параметрами і при цьому не втративши інформацію про його поточний стан. Необхідність розв'язку подібних завдань виникає і для інших технічних систем [7, с. 211; 8, с. 792]. У роботі [9, с. 122] пропонуються підходи, засновані на аналізі вартісних характеристик технічного обслуговування, експлуатаційних витрат та надійності відповідних систем.

Визначення параметрів ефективності елементів СЗАТ неможливе без знання актуальної інформації про їхній поточний стан. З цією метою використовують процес моніторингу технічного стану – спостереження за станом об'єкта для визначення та передбачення моменту переходу з одного стану в інший. Управління процесами діагностики та

моніторингу засобів залізничної автоматики – новий напрям у вирішенні науково-технічної проблеми з експлуатації та технічного обслуговування засобів автоматики [9, с. 125; 10, с. 99].

**Метою роботи** є обґрунтування вибору показників надійності, що дозволяють оцінити поточний стан елементів СЗАТ та подальше використання обраних показників.

**Виклад основного матеріалу.** Засіб (під засобом розуміється деяка сукупність елементів системи, функціонально несучих відповідальність за працездатність системи в цілому) має абсолютну надійність, якщо протягом усього періоду експлуатації воно готове до використання і безвідмовно виконує свої функції. Імовірність успішного виконання засобом, що має абсолютну надійність завдання, можна назвати показником потенційної ефективності  $P_{EI}$ . Реальні засоби не мають абсолютної надійності. Несправності можуть виникнути у процесі експлуатації, поява яких впливає успішність виконання завдання. Ступінь цього впливу залежить від рівня надійності засобу.

Якщо позначити через  $P_H$  показник, характеристики впливу реального рівня надійності засобу на успішність виконання завдання, тоді

$$P_{pi} = P_H \cdot P_{EI}.$$

Таким чином, показник  $P_{pi}$  являє собою імовірність успішного виконання засобом завдання з урахуванням його реальної надійності.

Значення показника  $P_{EI}$  може бути визначено шляхом теоретичних розрахунків, фізичного моделювання, а також за допомогою експериментальних даних, що характеризують результат застосування досліджуваних засобів у відповідних умовах.

Надійність роботи установок СЗАТ [4, с. 2] залежить як від надійності самих технічних засобів, яка визначається їх готовністю до використання, безвідмовністю при виконання своїх функцій, можливістю швидкого відновлення, так і від надійності осіб, які використовують і обслуговують ці засоби.

Внаслідок схемно-конструктивних та виробничих недоліків, а також недоліків у системі обслуговування у пристроях СЗАТ можуть виникати відмови різного характеру, які по різному впливають на успішність функціонування систем. В одних випадках відмова схеми, блоку або елемента призводить до небезпечної втрати працездатності системи, в інших – система через свою надмірність у структурі, а також у зв'язку з системою організації руху поїздів, може виконувати свої функції, але при цьому ефективність функціону-

вання буде нижче. Наприклад, при несправності рейкового кола якоїсь стрілочної секції, викликаній відмовою стикового з'єднувача, поїзд може бути прийнятий на станцію за іншим варіантним маршрутом або за запрошенням, хоча його швидкість у цьому випадку буде нижчою.

Пристрої СЗАТ належать до систем обслуговування. Проведення профілактичних оглядів, з одного боку, підвищує ступінь готовності пристроїв до їх використання за призначенням, а з іншого, призводить до погіршення деяких показників, що визначають ефективність системи. Це пов'язано з тим, що проведення профілактики потребує наявності кваліфікованого обслуговуючого персоналу та використання необхідної контрольно-вимірювальної апаратури, що призводить, у свою чергу, до збільшення вартості експлуатації пристроїв, а технічний ресурс засобів при цьому використовується не за призначенням.

Крім того, відомо, що при проведенні профілактичних заходів іноді збільшується інтенсивність відмов через втручання обслуговуючого персоналу в діючі пристрої.

Відновлення справного стану системи вимагає витрат часу, що складається з часу:

- витрачається на прибуття персоналу до місця ушкодження;
- ремонт та час на виявлення відмови.

Система може продовжити виконання своїх функцій лише через проміжок часу, що дорівнює часу відновлення. Зрозуміло, що це може вплинути на результат виконання завдання, тобто на показник  $P_{pi}$ .

Несправності, що виникли під час експлуатації системи, можуть по-різному проводити результати її функціонування. Ступінь цього впливу залежить від моменту виникнення відмови та її характеру. Якщо, наприклад, несправність в ЕЦ (електрична централізація) виникла до приготування маршруту та на підходах до станції поїзда були відсутні, своєчасне відновлення працездатності пристроїв не вплине на ефективність функціонування систем. Те саме характерно для відмов елементів, що не впливають на даний маршрут (наприклад, несправний рейковий ланцюг, який не входить до цього встановлюваного маршруту). Виникнення відмови в момент приготування маршруту, а також при пропуску поїздів може призвести до повного або часткового невиконання системою свого завдання.

Отже, ступінь впливу несправності [2, с. 14] на ефективність системи залежить не тільки від числа несправностей, їх характеру та часу віднов-

лення, але і від поїзної ситуації в момент виникнення несправності.

Таким чином, недостатня надійність пристроїв може впливати на їх ефективність за наступними основними напрямками:

- відмови, що виникають у процесі експлуатації, можуть призвести до повного невиконання завдання або зниження результатів використання коштів;

- недостатня надійність змушує проводити профілактичні огляди, ремонтні роботи та інші заходи, під час яких витрачається технічний ресурс коштів;

- недостатня надійність змушує здійснювати комплекс заходів, спрямованих на підтримання необхідної готовності засобів і забезпечення швидкого виявлення і усунення відмов, що вимагає наявності кваліфікованого персоналу, відповідної контрольної апаратури і запасних елементів.

Недостатня надійність призводить до зниження ефективності системи [5, с. 125]. Ступінь цього зниження залежить від організації використання, рівня надійності засобів поїзної ситуації та характеризується ставленням

$$P_H = \frac{P_{pi}}{P_{Ei}},$$

де  $P_{pi}$  – показник успішності виконання системою (елементом), що має певний рівень надійності своїх функцій;  $P_{Ei}$  – показник успішності виконання системою (елементом), що володіє абсолютною надійністю своїх функцій.

Вплив несправності на результати використання коштів може бути різним. У загальному випадку воно визначається: інтенсивністю виникнення відмов, їх характером, ремонтпридатністю апаратури та поїзної ситуації у момент виникнення відмови.

СЗАТ належать до групи засобів багаторазової дії, що мають такі особливості:

- засоби мають бути постійно готові до використання;

- з метою забезпечення високої надійності та безпеки руху поїздів пристрою періодично проходять профілактичні огляди;

- відмови, що виникають у період експлуатації, усуваються обслуговуючим персоналом;

- виконувани системні завдання мають такий характер, який дозволяє вирішувати їх і після усунення відмови.

Найбільш загальним наслідком появи відмов при експлуатації за призначенням є зниження успішності вирішення нею завдань шляхом збільшення часу, витраченого на використання

системи. Відомо [3, с. 3], що система ЕЦ виконає завдання щодо встановлення та розмикання маршруту при наступних ситуаціях:

– система справна до моменту приготування маршруту і не відмовить за час його встановлення та розмикання (оперативний час  $t_{оп}$ );

– несправна у початковий момент часу система буде відновлена за допустимий час  $t_B$  і не відмовить за певний час.

Виникнення відмов призводить до збільшення фактичного часу приведення засобів у готовність для використання за призначенням. В результаті цього використання засобів в операції може бути розпочато тільки після необхідного часу  $t_H$  і таким чином оперативний час  $t_{оп}$  буде збільшено на  $t_B$ . Вказана обставина не може не вплинути на успішність виконання завдань, що стоять перед системою.

Для визначення показника  $P_{pi}$  системи (елемента) з урахуванням їх реальної надійності необхідно визначити:

- 1) величину інтервалу (оперативний час);
- 2) ймовірність виникнення одного, двох та інших незалежних відмов за час  $t_{оп}$ , а також необхідний час на їхнє усунення  $t_B$ ;
- 3) фактичний час використання системи за одного, двох і т.д. незалежних відмов ( $t_{оп} + t_B$ );
- 4) успішність виконання завдання, тобто значення  $P_{PL}$  за умови виникнення одного, двох і т.д. незалежних відмов;

5) за формулою повної ймовірності значення

$$P_{pi} = \sum_{N_0=0}^{N_n} (P_{piN_0} + q_{N_0}),$$

де  $N_n$  – гранична кількість відмов, які можуть виникнути за час  $t_{оп}$ ;  $q_{N_0}$  – ймовірність виникнення  $N_0$  відмов за час  $t_{оп}$ ;  $N_0, N_n = 0, 1, 2 \dots N_n$  – кількість незалежних відмов;  $P_{piN_0}$  – значення показника  $P_{pi}$  за умови виникнення за час  $t_{оп}$  незалежних відмов.

**Висновки.** Недостатня надійність і необхідність проведення спеціальних заходів щодо забезпечення безвідмовного функціонування засобів залізничної автоматики призводять до зниження показника ймовірності успішного виконання засобом автоматики свого завдання з урахуванням його реальної надійності. В якості оцінок поточного стану засобу (у статті обрані) можуть бути прийняті такі показники:

- $P_H$  – показник характеристики впливу реального рівня надійності засобу на виконання функціонального призначення;
- $P_{pi}$  – показник успішного виконання засобом завдання з урахуванням його реальної надійності;
- $P_{Et}$  – показник успішності виконання системою, що володіє абсолютною надійністю своїх функцій.

Дана оцінка дозволить провести прогноз про проведення відновлювальних заходів засобів системи залізничної автоматики.

#### Список літератури:

1. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Нормування показників надійності технічних засобів. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 129 с.
2. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функціональної безпечності систем залізничної автоматики: Навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
3. IEC 61508-1:1998. Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related systems. – Part 1: General requirements.
4. CENELEC-EN 50129. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling, 2018.
5. Ensuring railroad's digital automation systems resistance to dangerous states / S. Panchenko [et al.] // ICTE in Transportation and Logistics. ICTE Tol 2019, LNITI. – 2020. P. 120–128.
6. Якушенко, О.С. Використання удосконаленого показника технічного обслуговування для обґрунтованого вибору оптимальних ремонтних підприємств [Текст] / О.С. Якушенко, П.О. Власенко // Авіаційно-космічна техніка та технологія, 2014. Вип. № 9 (116182). С. 182–186.
7. Ткаченко, В.А. Теоретичне обґрунтування раціональної періодичності технічного обслуговування спеціальних машин підготовки літальних апаратів [Текст] / В.А. Ткаченко // Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2012. Вип. 15. С. 210–214.
8. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. IEEE Systems Journal. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2980760>
9. Гаврілюк В.І., Тітов С.С., Єгольников О.О. Управління процесами діагностування і моніторингу засобів автоматики на припортових залізницях. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки». 2020. Т. 31 (70). С. 120–128. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-2/21
10. Лагута В.В., Єгоров О.Й., Доманська Г.А., Тимошенко Л.С. Комп'ютерна система діагностики електричної централізації з використанням обчислювальних засобів.

**Laguta V.V., Tymoshenko L.S. SELECTION OF THE EFFICIENCY PARAMETERS OF RAILWAY AUTOMATION SYSTEM COMPONENTS TAKING INTO ACCOUNT THEIR CURRENT CONDITION**

*The article is devoted to the optimization of the selection of efficiency parameters of the elements of the railway automation and telemechanics system (RATS), taking into account their current state. In particular, indicators of reliability and functional safety are studied, which allow determining the effectiveness of the operation of the RATS. The article discusses the main principles affecting the successful implementation of the RAT system. The reliability parameters of the elements, such as availability ratios, forced downtime, the frequency of preventive measures and their impact on the operational performance of the train traffic control system, are analyzed. Special attention is paid to the analysis of standards and regulations that regulate the meaning of functional safety. The authors point out that strict regulations can complicate the development of RAT systems, while less strict ones can lead to the risk of railway accidents. For a large number of responsible system functions, requirements for functional safety may decrease in proportion to their number. The article offers approaches to determining the parameters of the efficiency of the RAT elements using the analysis of the cost characteristics of maintenance, operating costs and system reliability. The main goal of the work is to substantiate the choice of reliability indicators, which allow to assess the current state of the elements of the RAT and use the selected indicators for the further functioning of the system. The study focuses on the importance of monitoring the technical condition of objects of the railway automation system for predicting and managing the processes of diagnostics and maintenance of automation equipment. The conclusions of the work make it possible to make a forecast regarding the implementation of restoration measures of RAT facilities, taking into account their reliability and current state. So, the article examines the parameters of the efficiency of the elements of the system of railway automation and telemechanics, taking into account their current state, which contributes to the understanding and improvement of the processes of operation and maintenance of railway systems.*

**Key words:** probability of failures, analysis of the railway automation system, systems with maintenance, system reliability parameters, reliability of technical means.

**Levkin D.A.**

State Biotechnological University

**Zavgorodniy O.I.**

State Biotechnological University

**Gulieva D.O.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Levkin A.V.**

State Biotechnological University

## APPLICATION OF BOUNDARY-BORDER PROBLEMS FOR THE ANALYSIS OF THE STATE OF COMPLEX SYSTEMS

*When calculating the values of the objective function and its parameters for complex systems, it remains the most time-consuming to obtain an analytical form of the objective function. This is explained by the fact that the analytical solution exists only for single-layer materials, homogeneous in terms of their geometric parameters and physical characteristics, on which load sources act. The correctness of the boundary-value problems describing the state of the above-mentioned systems is substantiated by well-known methods from the traditional theory of the existence and unity of the solution of boundary-value problems. In practice, however, it is quite often necessary to calculate the value of the objective function for a heterogeneous material under the influence of load sources of physical fields with different modes of action. It is possible to obtain the solution of boundary value problems either by determining additional conditions of existence and unity of the solution of boundary value problems, or by averaging the values of the parameters of the objective function and the corresponding system of constraints on its parameters in order to reduce the constructed boundary value problem to a more classical form. This means that in the second case, the boundary value problem for the simulated process is replaced by such a boundary value problem for which there will be no doubts about its correctness. At the same time, the accuracy of the calculated values of the objective function and its parameters will decrease.*

*The article proposes a method for parameterizing the temperature field of a multilayer material under the influence of sources of thermal load. The correctness of the calculated mathematical model built in the article is substantiated by methods from the theory of determining correctness conditions and their application for a multipoint boundary value problem over the space of generalized functions in a multilayer environment. This will guarantee the correctness of not only the boundary value problem given in the article for the system of heterogeneous differential equations of heat conduction, but also applied optimization mathematical models.*

**Key words:** *correctness, boundary value problems, complex systems, parameterization, multilayer environment.*

**Formulation of the problem.** To solve applied problems of optimization of technical systems, it is necessary to correctly formulate the initial boundary value problems that describe the state of the object under study under the influence of sources of physical fields. The features of the modeled system influence the type of boundary value problems and, as a result, the choice of methods for solving boundary value problems, as well as methods for optimizing the values of the goal function and its parameters. This task is most relevant in the case of a non-standard shape of the object under study and specific features of the technical means of influence.

The article proposes a method for constructing boundary value problems for thermal effects on multilayer materials and parameterizing the temperature field. Taking into account the nonlinearity of differential equations, restrictions on the values of the objective function and its parameters, the multiplicity of the solution function and, as a result, the nonlinearity of the objective function and the multiextremal nature of applied problems of optimizing the parameters of thermal effects, have a decisive influence on the choice of methods for solving the correctness of boundary value problems. The authors constructed a resolving function

of solutions for a system of pseudodifferential equations in a multilayer medium and showed that on a segment of generalized functions this function will satisfy the parabolicity condition. Fulfillment of this condition will ensure the correctness of the boundary value problem presented in this article in the spaces of infinitely differentiable generalized functions bounded on a segment, and also guarantee the correctness of applied optimization mathematical models for searching and enumerating local extrema of the temperature field and its parameters.

**Analysis of recent research and publications.** Mathematical models and methods of their implementation are proposed in the article [1] for analyzing the state of information and communication networks and increasing the efficiency of their functioning during threats to information security at enterprises in Ukraine. The authors of the publication [2] applied simulation modeling methods to increase the level of information security in the computer environment. The correct solvability of a nonlocal multipoint boundary value problem for a separate evolutionary pseudo-differential equation is proved [3]. In the article [4], a controllability function for two-dimensional, three-dimensional, and four-dimensional systems is proposed, which takes into account their specific features. The authors of the article [5] proposed mathematical models and computational methods for forecasting the appearance of threats in the supply of electric energy, solving problems with the supply of energy to critical infrastructure objects. A deterministic model was developed to optimize the energy supply of industrial enterprises in urban conditions and the optimal operation of the local energy system [6]. In publications [7, 8] applied problems of optimization of ecological systems are solved in order to increase the level of quality of the ecological situation in a separate region of the country, fight against threats to the ecological situation, overcome possible consequences of threats to the ecological system in a separate region of Ukraine. The problem of geometric design has been solved, which consists in eliminating empty space when packing objects in order to reduce the cost of packaging material [9, 10]. In articles [11, 12], methods of economic and mathematical modeling are applied to stabilize the work of the banking system of Ukraine in the current conditions.

**Task statement.** To propose a method for constructing boundary value problems for multilayer objects under the influence of thermal loading sources depending on the characteristics of the simulated systems.

**Outline of the main material of the study.** Let us construct a system of differential equations from the boundary value problem of the process of thermal impact on a multilayer material:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 + q_1; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t} = \lambda_2 \Delta T_2 + q_2; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \rho_N c_N \frac{\partial T_N(z, t)}{\partial t} = \lambda_N \Delta T_N + q_N, \end{cases} \quad (1)$$

where  $T_e(z, t)$  – temperature field in  $e$ -th layer of the multilayer material;  
 $z$  – spatial coordinate;  
 $z_e$  – distance from the center of the impact source to a point in  $e$ -th layer of multilayer material, in which the value of the temperature field is calculated;  
 $t$  – exposure time;  
 $t_e$  – time parameter.  
 $\rho_e$  – density coefficient of distribution points of temperature fields in the  $e$ -th layer of material;  
 $c_e$  – heat capacity coefficient of temperature field distribution points;  
 $\lambda_e$  – thermal conductivity coefficient in  $e$ -th layer of the multilayer material.

When mathematical modeling, it is worth taking into account the boundary conditions of the beginning and end of the thermal effect on the multilayer ( $N$  – layer) material:

$$\begin{cases} T(z, t)|_{t=t_0}^{z=z_0} = T_0; \\ T(z, t)|_{t=t_N}^{z=z_N} = T_N, \end{cases} \quad (2)$$

where  $T_0$  – temperature of the material at the beginning of thermal exposure;  
 $T_N$  – material temperature at the end of thermal exposure.

To take into account the multilayer structure of the material, we introduce the equalities between the media:

$$\begin{cases} T_1(z_1, t_1) = T_2(z_2, t_2), \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}; \\ T_2(z_2, t_2) = T_3(z_3, t_3), \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ T_{N-1}(z_{N-1}, t_{N-1}) = T_N(z_N, t_N), \quad -\lambda_{N-1} \frac{\partial T_{N-1}}{\partial z} = -\lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial z}, \end{cases} \quad (3)$$

where  $T_e$  – temperature of points in the  $e$ -th layer of a multilayer material;  
 $z_e$  – spatial parameter;  
 $t_e$  – duration of heat exposure.

Boundary conditions of the 3rd kind:

$$\left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} - A(T_1 - T_{ext}) \right) \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

where  $\lambda_1$  – thermal conductivity coefficient of the outer layer of the material;

$A$  – heat transfer parameter of the outer layer of material;

$T_1$  – outer layer temperature;

$T_{ext}$  – ambient temperature where the material is placed.

Let us prove the correctness of the boundary value problem (1)–(4). To do this, consider a homogeneous:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_1 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t), & t \in [0; t_1]; \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_2 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t), & t \in [t_1; t_2]; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_n \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t), & t \in [t_{n-1}; T] \end{cases}, \quad (5)$$

with the condition

$$B_0 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,0) + B_1 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t_1) + \dots + B_n \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,T) = \varphi(x) \quad (6)$$

and inhomogeneous boundary value problems:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_1 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) + f(x,t); \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_2 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) + f(x,t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_n \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) + f(x,t) \end{cases} \quad (7)$$

with the condition

$$B_0 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,0) + B_1 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t_1) + \dots + B_n \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,T) = 0, \quad (8)$$

where  $A_k \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right)$ ,  $B_k \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right)$  – pseudodifferential operators with symbols from the space of infinitely differentiable functions of power growth.

We will consider in Sobolev-Slobodetsky spaces  $H_{i,l}^s$ , as well as in their projective limit  $S = \bigcap_{s,l} H_{i,l}^s$  – L. Schwartz space [13, 14].

Let us apply the Fourier transform (in spatial variables) to the equations from the homogeneous boundary value problem (5)–(6). We obtain a dual boundary value problem:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_1(s) \tilde{u}(s,t); \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_2(s) \tilde{u}(s,t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_n(s) \tilde{u}(s,t). \end{cases}, \quad (9)$$

with the condition:

$$B_0(s) \tilde{u}(s,0) + B_1(s) \tilde{u}(s,t_1) + \dots + B_n(s) \tilde{u}(s,T) = \varphi(s). \quad (10)$$

Similarly, applying the Fourier transform to equations (7)–(8), we obtain the following dual boundary value problem:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_1(s) \tilde{u}(s,t) + f(s,t); \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_2(s) \tilde{u}(s,t) + f(s,t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_n(s) \tilde{u}(s,t) + f(s,t). \end{cases}, \quad (11)$$

with the condition:

$$B_0(s) \tilde{u}(s,0) + B_1(s) \tilde{u}(s,t_1) + \dots + B_n(s) \tilde{u}(s,T) = 0. \quad (12)$$

Resolving function of the boundary value problem (9)–(10):

$$Q(s,t) = \begin{cases} \exp tA_1(s) / \Delta(s); \\ \exp tA_2(s) / \Delta(s); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \exp((t - t_{n-1})A_n(s) + \dots + t_1A_1(s)) / \Delta(s), \end{cases} \quad (13)$$

where

$$\Delta(s) = B_0(s) + \dots + B_n(s) \exp \left( t_1A_1(s) + (t_2 - t_1)A_2(s) + \dots + (T - t_{n-1})A_n(s) \right) \neq 0. \quad (14)$$

We found that the homogeneous boundary value problem (5)–(6) is correctly solvable in the space of generalized functions bounded on a segment when the resolving function is bounded by a power polynomial together with its derivatives to a fixed order, i.e.  $|D^k Q(s,t)| \leq C_k (1 + |s|)^{p_k}$ .

Note that if instead of the multipoint condition (6) we consider the two-point condition, then this boundary value problem may be incorrect.

Let us proceed to the consideration of the boundary value problem for the inhomogeneous equation (7)–(8). As shown in article [14], if for the dual boundary value problem (9)–(10) there is a resolving function  $Q(s;t)$ , then in problem (11)–(12) there is a Green's function. This means that a parabolic boundary value problem can be perturbed by a subordinate pseudodifferential operator and the following statement holds.

The parabolicity condition for the homogeneous boundary value problem (5)–(6) is necessary for correct solvability in space of infinitely differentiable generalized functions of the perturbed equation with homogeneous boundary conditions bounded on the segment under sufficiently small perturbations.

The results obtained by the authors make it possible to guarantee the correctness of not only the boundary value problem (1)–(4) constructed in this article, but also the correctness of boundary value problems for other thermophysical systems. In addition, due to the specifics of optimizing the parameters of thermal effects on multilayer materials [15, 16], the correctness of boundary value problems implies



the correctness of applied optimization problems of searching for local extrema of the goal function.

Note that by applying the results obtained, we can guarantee the correctness for the applied optimization problem of improving the quality of preparation of biomaterial for laser segmentation. The presented mathematical model is an auxiliary model and is not associated with optimization of the vector of parameters of the thermal effect on the material. However, it is important from the point of view of high-quality implementation of the entire biotechnological process of laser division of microbiological material.

The essence of the problem under consideration is as follows. Microbiological material is usually stored frozen in liquid nitrogen. Before dividing it, it is necessary to defrost the material without tearing the tissue. This means that during the defrosting process it is necessary to control the appropriate parameters to guarantee acceptable thermal stress values. The uniformity of the final distribution of the temperature field in the volume of microbiomaterial  $\Omega$  can be characterized by the following mathematical model:

$$\left( \max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t) - \min_{\substack{(x,y,z) \in \Omega \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t) \right) \rightarrow \min_{z^* \in Z}, \quad (15)$$

where  $z^*$  – vector of parameters of thermal impact on the material.

In this case, it is necessary to fulfill the restriction on the minimum and maximum values of the temperature field in the microbiomaterial  $\Omega$ :

$$\begin{cases} T_1^* \leq \max T \leq T_2^*; \\ T_3^* \leq \min T \leq T_4^*, \end{cases} \quad (16)$$

where  $T_1^*$  – specified minimum permissible value of the maximum temperature field;

$T_2^*$  – specified maximum permissible value of the maximum temperature field;

$T_3^*$  – specified minimum permissible value of the minimum temperature field;

$T_4^*$  – specified maximum permissible value of the minimum temperature field.

Let us note that fulfilling the requirements of the mathematical model (15)–(16) will allow, on the one hand, to have high-quality source material, and on the other hand, it will make it possible to correctly formulate the corresponding boundary value problem underlying the construction of mathematical models of thermal effects on biomaterials.

**Conclusions.** The article proposes a computational mathematical model that describes the state of a multilayer material under the influence of thermal loading sources. In connection with the specific features of the system under study (multilayer material under thermal influence) and the peculiarities of thermal treatment modes to improve the accuracy of calculating the temperature of exposure and technical parameters of hardware, the authors paid special attention to determining and studying their applicability for the correctness conditions of this boundary value problem. To prove the correctness of the boundary value problem, specialized approaches are used, which consist of methods over the functional space of generalized distributions smoothly depending on time. The condition for the parabolicity of the resolving function of solutions in the space of generalized functions bounded on a segment, together with its derivatives up to a fixed order, is proved. This will allow us to transfer the obtained result to determine the conditions for the correct solvability of a number of boundary value problems that describe the state of thermophysical systems, whose correctness cannot be guaranteed by the traditional theory of the existence and uniqueness of boundary value problems due to the specific features of the differential symbol of the operator. In addition, the results obtained can be used to prove the correctness of applied optimization mathematical models for the process of thermal attraction on a heterogeneous material.

### Bibliography:

1. Рубан І.В., Кучук Г.А., Давікоза О.П. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 7. С. 106–112.
2. Korniyenko B. Y., Galata L.P. Design and research of mathematical model for information security system in computer network *Наукоємні технології*. 2017. № 2. С. 114–118.
3. Horodets'kyi V., Petryshyn R., Martynuk O. Evolutionary Pseudodifferential Equations With Smooth Symbols in the S-Type Spaces. *Ukrains'kyi Matematychnyi Zhurnal*. 2023. Vol. 75. No. 6. Pp. 753–776. doi:10.37863/umzh.v75i6.7443.
4. Korobov V.I., Andriienko T.V. Construction of controllability function as time of motion. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser.: «Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics»*. 2023. Vol. 97. S. 13–24. <https://doi.org/10.26565/2221-5646-2023-97-02>
5. Terentiev O., Prosyankina-Zharova T., Diakon V., Manuilenco R. Development of mathematical models to support decision-making regarding the functioning of critical infrastructure in the industry of energy supply.

*Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 6. No. 2(74). Pp. 44–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.293205>

6. Лежнюк П.Д., Гунько І.О., Лисий В.М. Макромодельовання прогнозування балансу локальних систем електропостачання із використанням фрактальних властивостей графіків навантаження та генерування. *Наукові праці*. 2023. № 3. С. 1–8.

7. Dyvak M., Spivak I., Melnyk A., Manzhula V., Dyvak T., Rot, A., Hernes M. Modeling Based on the Analysis of Interval Data of Atmospheric Air Pollution Processes with Nitrogen Dioxide due to the Spread of Vehicle Exhaust Gases. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue. 3. 2163. <https://doi.org/10.3390/su15032163>

8. Mandych O., Zaika S., Zaika O., Zhyliakova O., Blyzniuk O. Risk management of innovation activities in the digital ecosystem. *Innovations in the scientific, technical and social ecosystems*. 2023. Vol. 1. No. 6. Pp. 24–45. <https://doi.org/10.56378/MOZS20231805>

9. Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem. *Computational Geometry*. 2010. Vol. 43, Issue. 5. Pp. 535–553. <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2009.12.0032>.

10. Romanova T., Litvinchev T., Pankratov A. Packing ellipsoids in an optimized cylinder. *European Journal of Operational Research*. 2020. Vol. 85. Issue. 2. Pp. 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.051>

11. Mandych O., Zhyliakova O., Lachkov A., Panfilova Y., Prykhodko V. Stabilisation of the financial architecture in the banking system. *Економічний аналіз*. Т. 33. № 2. С. 103–109. <https://doi.org/10.35774/econa2023.02.103>

12. Yanenkova I., Nehoda Y., Drobyazko S., Zavhorodnii A., Berezovska L. Modeling of Bank Credit Risk Management Using the Cost Risk Model. *J. Risk Financial Manag.* 2021. No. 14. 211. <https://doi.org/10.3390/jrfm14050211>

13. Levkin D. Application of calculation methods for solving applied problems of heat and mass exchange in complex systems. *Measuring and computing devices in technological processes*. Хмельницький, 2023. № 2. С. 179–182. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-24>

14. Левкін Д.А. Умови коректності крайових задач. *Енергетика і автоматика*. Київ: НУБіП України, 2020. № 3 (49). С. 128–137. DOI 10.31548/energiya2020.03.128

15. Левкін Д.А. Чисельні методи і математичні моделі оптимізації параметрів біотехнологічних процесів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2022. Т.33(72). №1. С. 128–132. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/21>

16. Kavun S., Levkin D., Levkin A., Kotko Y., Levkina R. Methods of Mathematical Programming for Designing a Safe Environment for Bioobject. *CEUR Workshop Proceedings*. Kyiv, 2023. No. 3550. Pp. 255–260.

## Левкін Д.А., Завгородній О.І., Гулієва Д.О., Левкін А.В. ЗАСТОСУВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Під час розрахунку значень функції мети і її параметрів для складних систем найбільш трудомістким залишається отримати аналітичний вид функції мети. Це пояснюється тим, що аналітичний розв'язок існує лише для одношарових, однорідних за своїми геометричними параметрами та фізичними характеристиками матеріалів, на які діють джерела навантаження. Коректність крайових задач, які описують стан вищезгаданих систем обґрунтована відомими методами з традиційної теорії існування та єдиності розв'язку крайових задач. На практиці ж, доволі часто потрібно розрахувати значення функції мети для неоднорідного матеріалу під дією джерел навантаження фізичних полів з різними режимами дії. Отримати розв'язок крайових задач можливо або за рахунок визначення додаткових умов існування та єдиності розв'язку крайових задач, або через усереднення значень параметрів функції мети і відповідної системи обмежень на її параметри з метою зведення побудованої крайової задачі до більш класичного виду. Це означає, що в другому випадку крайову задачу для модельованого процесу замінюють на таку крайову задачу, для якої не буде виникати сумнівів її коректність. При цьому зменшиться точність розрахованих значень функції мети і її параметрів.

В статті запропонований метод для параметризації температурного поля багатошарового матеріалу під дією джерел термічного навантаження. Коректність побудованої в статті розрахункової математичної моделі обґрунтована методами з теорії визначення умов коректності та їх застосування для багатоточкової крайової задачі над простором узагальнених функцій в багатошаровому середовищі. Це дозволить гарантувати коректність не лише наведеної в статті крайової задачі для системи неоднорідних диференціальних рівнянь теплопровідності, а також і прикладних оптимізаційних математичних моделей.

**Ключові слова:** коректність, крайові задачі, складні системи, параметризація, багатошарове середовище.

**Легеза В.П.**

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

**Нещадим О.М.**

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

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДЕМПФІРУВАННЯ ПОЗДОВЖНІХ ВПЛИВІВ В СИСТЕМІ З АМОРТИЗАТОРАМИ СУХОГО ТЕРТЯ

Запропоновано нову систему демпфірування поздовжніх транспортних впливів на великогабаритні вантажі на основі використання спеціальних амортизаційних турнікетів сухого тертя. В роботі змодельовано екстремальний варіант динамічного навантаження чотирьохмасової транспортної системи із запропонованою системою амортизації вантажів. Побудову рівнянь руху елементів транспортної системи виконано методом Даламбера. Динаміка системи досліджувалась з використанням методів математичного моделювання та теорії коливань зв'язаних механічних систем зі скінченним числом ступенів свободи. Отриману систему чотирьох суттєво нелінійних диференціальних рівнянь руху було проінтегровано числовими методами із використанням розробленої програми. У ході числових експериментів встановлено основні регулюючі характеристики запропонованих амортизаторів, які впливають на якість їх функціонування. Показано, що радіус циліндричних поверхонь амортизуючих вантажоопорних вузлів є потужним регулятором рівня динамічних навантажень на транспортвані конструкції і опорні платформи. Дано кількісну оцінку ефективності використання амортизаторів сухого тертя щодо зниження рівня динамічного впливу на вантажі. Показано, що при використанні запропонованих амортизаторів рівень поздовжніх динамічних впливів на вантажі можна знизити більш ніж у 6 разів порівняно з існуючим традиційним способом залізничного транспортування. У результаті числового аналізу динамічної поведінки транспортної системи встановлено, що для суттєвого зниження рівня поздовжнього транспортного впливу на вантажі їх фіксація відносно вагонів має здійснюватися у «рухомо-регульований спосіб» (на відміну від традиційної «жорсткої» фіксації вантажу на опорних платформах). Використання амортизуючих вузлів призводить також до зменшення динамічних впливів на опорні платформи в порівнянні з «жорстким» способом кріплення вантажів.

**Ключові слова:** математична модель, процес демпфірування, транспортна система, турнікет, амортизатор сухого тертя, поздовжні динамічні впливи.

**Постановка проблеми.** У даній роботі розглядається динаміка механічної системи з амортизаційними турнікетами із сухим тертям. Вони використовуються для бездефектного транспортування великогабаритних конструкцій залізницею. Турнікети є простими у виготовленні і експлуатації, ефективні і надійні при амортизації поздовжніх ударів, не вимагають облаштування додатковими елементами демпфірування. Ефект амортизації поздовжніх ударів з використанням таких турнікетів досягається за рахунок підйому вантажу на вантажоопорних вузлах і розсіювання значної частини енергії, що припадає на роботу сил тертя. Ці пристрої мають ряд технічних переваг перед відомими турнікетами з катковими і маятниковими амортизаторами. Основна їхня

перевага полягає в тому, що в транспортній системі, обладнаній турнікетами криволінійного профілю з сухим тертям, всі перехідні післяударні процеси відбуваються швидко, без виникнення тривалих коливальних рухів з можливими поздовжніми і вертикальними резонансами.

При побудові математичної моделі процесу зіткнення транспортної системи враховувався взаємний динамічний вплив рухів великогабаритного вантажу і несучих його опорних платформ. Цей вплив здійснюється за рахунок голономних в'язей, реалізованих в амортизаторах вантажоопорних вузлів, і пружно-фрикційних в'язей автозчепок опорних платформ. В моделі також враховано сили тертя ковзання на вантажоопорних вузлах і сили опору руху несучих платформ,

а також вагона-упору після зіткнення. Окрім того, в моделі враховано поворот довгомірного вантажу на опорах. Відсутність адекватної математичної моделі процесу амортизації в системі стримує впровадження нового способу транспортування великогабаритних вантажів залізницею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При перевезеннях великогабаритних вантажів залізницею особливо небезпечними є поздовжні динамічні навантаження, які зумовлені відносними поздовжніми коливаннями і ударами несучих платформ. Значної інтенсивності вони досягають під час екстремальних режимів руху поїздів (наприклад, в процесі сортувальних робіт по формуванню поїздів або під час екстреного гальмування) та передаються від платформ вантажу через закріплюючі пристрої. Разом з тим для певних категорій вантажів (особливо тонкостінних та малоармованих) поздовжні навантаження не є проектно-розрахунковими, тому головна задача полягає в зменшенні рівня поздовжніх інерційних сил, які діють як на залізничні платформи, так і на вантажі [1–3, 5–14, 19].

Для великогабаритних залізобетонних конструкцій проблема збереження їх якості на стадії залізничних перевезень стоїть ще більш гостро. Наприклад, під час перевезень залізницями України руйнується або піддається значним пошкодженням біля 5% великогабаритних залізобетонних конструкцій, які потребують капітального ремонту ще до того, як вони мають бути встановлені на майбутній споруді [1–3, 7–12, 14].

Причина виникнення такої ситуації полягає в тому, що на зчехах платформ великогабаритні конструкції закріплюються і перевозяться переважно за «жорсткою» схемою [1–3, 5, 6, 9–12, 14, 19, 20, 24, 25].

У відповідності до такої схеми один кінець довгомірної конструкції жорстко закріплюють відносно однієї опорної платформи, а обпирання іншого кінця здійснюють рухомим, з невеликим вільним ходом (на максимальну величину  $\Delta = 0,15$  м) відносно іншої платформи зчепу. Зазвичай цього вільного ходу недостатньо і коли він вибирається, відбувається жорсткий удар хребтових балок несучих платформ, який і призводить до пошкодження закріплюючих елементів та руйнування транспортованого вантажу та вагонів.

Масові перевезення великогабаритних конструкцій в Україні здійснюються за допомогою універсальних залізничних платформ та відкритих вагонів, які не обладнані спеціальними рухо-

мими хребтовими балками. Ось чому з метою збереження якості особливо чутливих вантажів на стадії транспортування універсальні платформи додатково обладнують спеціальними вантажоопорними амортизуючими вузлами [1–2, 6–12, 14].

Запропонована робота є продовженням досліджень авторів в області динаміки транспортних систем, які обладnano вантажоопорними вузлами з амортизаторами і гасниками різних конструкцій [7, 8, 22, 23]. Близькі технічні рішення і розробки амортизаторів поздовжніх ударів знайшли реальне практичне застосування в процесі перевезень великогабаритних конструкцій на зчехах залізничних платформ [1–2, 5–7, 9–11, 13–15, 24, 25].

Динамічні задачі зазначеного спрямування описуються і розв'язуються в рамках теорії коливань та теорії удару твердих тіл із залученням теоретичних основ динаміки вагонів [4–6, 9, 10, 13, 16, 19–21].

В роботах авторів з країн далекого зарубіжжя до останнього часу не було відмічено достатньо узагальнюючих і глибоких досліджень стосовно нових способів розміщення і закріплення довгомірних вантажів. Це пояснюється тим, що за кордоном для залізничних перевезень використовуються платформи із рухомими («плаваючими») хребтовими балками [5, 6, 10, 19–21, 24, 25], що створює достатньо комфортні умови для перевезення вантажів і експлуатації рухомого складу. Тому додаткова або індивідуальна амортизація вантажів до певного часу не була потрібна. Слід зазначити, що віброзахисне обладнання типу рухомої хребтової балки або «плаваючого» вантажного настилу має значну вартість.

В наукових роботах останніх років фахівці в області залізничних перевезень активно вдосконалюють методи динамічних розрахунків великовагових поїздів. У статтях [16–21, 25] з різних сторін досліджується еволюція моделювання поздовжньої динаміки великовагових поїздів (LTD).

У зазначених роботах особливу увагу було направлено на розробку нових способів закріплення великогабаритних вантажів на рухомому складі, на моделювання міжвагонних в'язей зі збільшеним ходом, а також на вивчення нових динамічних ефектів при коченні колісних пар по рейковому шляху в умовах високих швидкостей руху. Так, наприклад Шведське агентство інноваційних систем спільно з національним управлінням залізниць Швеції ініціювали і профінансували великий проект під назвою «Устаткування для раціонального кріплення вантажів на залізничних вагонах» [15].

Головний нормативний документ Єврокомісії [24] (в останній редакції від 2019 року) позиціонується як єдиний нормативний документ для всіх країн Євросоюзу, відповідно до якого слід виконувати розрахунки динамічних навантажень, розробляти і погоджувати нові схеми навантаження і кріплення різноманітних вантажів (в тому числі великогабових і довгомірних) на залізничному рухомому складі.

Стрімкий розвиток програмного забезпечення і комп'ютерних технологій надають широкі можливості для створення адекватних розрахункових математичних моделей складних транспортних систем. Це дозволяє досліджувати їх динамічну поведінку з урахуванням реальних умов руху вантажних поїздів, аналізувати проблемні питання динамічних процесів та розробляти нові способи закріплення вантажів на рухомому складі.

Разом з тим слід вказати на недостатні точність, адекватність і глибину досліджень динаміки складних систем «зчеп з двох або трьох несучих платформ–великогабаритний вантаж» з рухомими турнікетно-закріплюючими пристроями. Це пояснюється тим, що в процесі постановки і розв'язання подібних задач дослідники використовували спрощені розрахункові моделі [1, 2, 11, 14].

В основній масі робіт в цій галузі пріоритети і цілі досліджень, в першу чергу, спрямовувалися на вивчення динаміки вагонів, а не на визначення і зниження рівня динамічних навантажень на транспортвані конструкції. Тому математичні моделі і розрахункові схеми, які розроблялися в рамках зазначених динамічних досліджень, не дають можливості об'єктивно оцінити рівень динамічних навантажень на транспортвані великогабаритні вантажі і конструкції несучих платформ [1, 2, 9, 11, 12, 14, 19–20]. Ось чому в цій частині моделювання процесу зіткнення механічної системи «зчеп з двох несучих екіпажів–великогабаритний вантаж» вимагає перенесення акцентів в напрямку дослідження оцінки рівня динамічних навантажень на транспортвані конструкції, а не тільки на несучі їх платформи.

**Метою даної роботи** є кількісна оцінка ефективності функціонування амортизаторів криволінійного профілю з сухим тертям при перевезенні важких і великогабаритних вантажів залізничним транспортом.

**Виклад основного матеріалу. Вихідні технічні дані для побудови математичної моделі.** Кожен вантажоопорний вузол складається з двох частин: його верхня частина (верхня опорна рама) має амортизуючу циліндричну поверхню і шар-

нірно закріплена відносно вантажу, що перевозиться. Нижня частина (нижня опорна рама) нерухомо закріплена відносно підлоги опорної платформи і обладнана ковзуном із жорсткою фіксацією (рис. 1).

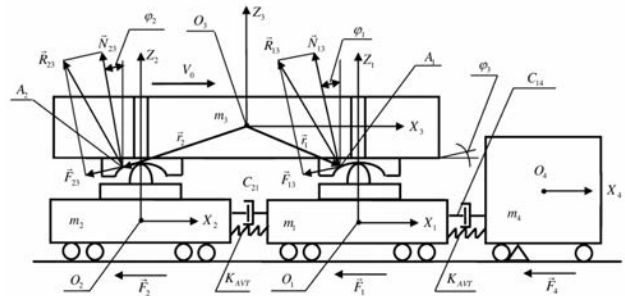


Рис. 1. Розрахункова схема транспортної системи з амортизуючими вузлами

Криволінійну поверхню кожної верхньої опори виконано у вигляді частини горизонтального круглого циліндра, напрямна якого є частиною кола з постійним радіусом  $R$ , а твірні перпендикулярні площині малюнка. В процесі післяударного руху робоча циліндрична поверхня верхньої опори фрікційно взаємодіє із ковзуном нижньої опорної рами. Кожна верхня рама обладнана спеціальним упором, який обмежує взаємні переміщення обох рам фіксованою величиною  $1\text{ м}$  в разі вичерпання амортизуючого ходу верхньої рами відносно нижньої. Технічні рішення лінійки запропонованих турнікетів захищені патентами України на винаходи [7, 8, 22, 23].

На зчепі з двох опорних платформ з масами  $m_1$  і  $m_2$  закріплено великогабаритний вантаж з масою  $m_3$  і довжиною  $2L$  за допомогою описаних вище амортизуючих турнікетів симетрично відносно вузла зчеплення платформ. Далі завантажений зчеп з початковою швидкістю  $V_0$  накочується на загальмований вагон-упор з масою  $m_4$  (рис. 1), який має можливість рухатися (ковзати) вздовж рейкового полотна.

Після зіткнення зчеп з двох опорних платформ з вантажем і вагон-упор з'єднуються незвільнюючою в'яззю в єдину чотиримасову механічну систему за рахунок зчеплення двох автозчепок передньої опорної платформи зчепу і вагона-упору. Потім під дією сил інерції система зв'язаних твердих тіл переміщується вздовж рейкового полотна, одночасно здійснюючи відносні коливальні рухи (рис. 1). Описана схема зіткнення відображає реальну картину, що виникає при сортуванні і маневрах рухомого складу, і є найбільш не вигідною (екстремальною) з точки зору рівня динамічних навантажень і цілісності великогабаритних вантажів на стадії залізничних перевезень.

Проміжне післяударне положення, якого в динаміці набуває вантаж за рахунок переміщення на вантажоопорних вузлах і повороту на кут  $\varphi_3$ , на рис. 1 не показано. Однак це положення можна легко уявити, зобразивши на рис. 1 радіуси-вектори  $\vec{r}_1$  і  $\vec{r}_2$ , що з'єднують центр мас  $O_3$  вантажу та поточні точки  $A_1$  і  $A_2$ . Точки  $A_1$  і  $A_2$  представляють собою проєкції на площину малюнка ліній контакту (в динаміці) ковзунів нижніх опорних рам і відповідних циліндричних поверхонь верхніх опорних рам вантажоопорних вузлів, розміщених на передній і задній несучих платформах відповідно (рис. 1).

Побудова математичної моделі процесу амортизації інерційних навантажень при зіткненні зчепу здійснювалася при наступних **припущеннях**:

- система представляє собою механічну систему зв'язаних твердих тіл;
- тертя ковзання описується у відповідності до закону Кулона – Амонтона;
- верхні опорні рами амортизуючих вузлів переміщуються поступально і їх маси віднесені до маси вантажу; нижні опорні рами жорстко з'єднані з опорними платформами, а їх маси додані до мас опорних платформ;
- залізнична колія є абсолютно жорсткою, прямою і розташованою на горизонтальній поверхні; вертикальна динаміка платформ не враховується;
- радіус кривини ковзунів  $\rho$  і радіус  $R$  напрямної амортизуючих циліндричних поверхонь задовольняють співвідношення  $\rho / R \rightarrow 0$ , тому можна знехтувати зміщенням ліній контакту по робочих поверхнях ковзунів в процесі відносного руху вантажу на опорах;
- розглядаються малі кути  $\varphi_3$  повороту великогабаритного вантажу на опорах навколо його центру мас (що має місце на практиці) (рис. 1).

Параметри для моделювання вагона-упору обиралися на підставі теоретичних і експериментальних досліджень [1, 2, 5, 9, 10, 11, 22, 23]. Його маса прийнята рівною  $m_4 = 145,7$  т, а коефіцієнт сухого тертя в процесі його післяударного ковзання – рівним  $\mu_4 = 0,15$ .

Розглянемо **силові фактори**, що діють на елементи системи. Моделювання деформаційно-силових характеристик автозчепок (міжвагонних в'язей) із врахуванням демпфування їх поглинаючих апаратів виконувалося за формулою [6, 9, 10]:

$$P_{ij} = 0,5K_{AVT}(x_i - x_j) + C_{ij}(\dot{x}_i - \dot{x}_j), \quad (1)$$

де  $K_{AVT}$  – жорсткість одного поглинаючого апарату ( $K_{AVT} = 17$  Мн/м);  $C_{ij}$  – коефіцієнт демпфування (в'язького опору) двох поглинаючих апаратів ( $C_{ij} = 0,26$  Мн/м).

Модулі сил тертя на амортизаторах вантажоопорних вузлів визначалися таким чином:

$$F_{i3} = N_{i3}\mu_{i3}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_i) \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

де  $N_{i3}$  – модуль нормальної складової реакції  $\vec{R}_{i3}$  вантажоопорного вузла (рис. 1), який розміщено на  $i$ -й опорній платформі;  $\mu_{i3}$  – коефіцієнт сухого тертя при переміщенні верхньої опорної рами по ковзуну вантажоопорного вузла, закріпленого на  $i$ -й опорній платформі,  $i = 1, 2$ .

Формула для визначення величини сил опору при переміщенні  $i$ -ї опорної платформи вздовж рейкового полотна, яка враховує тертя кочення колісних пар, тертя в буксах та інші дисипативні фактори, має вигляд

$$F_i = (m_i g + R_{i3}^z) \omega_{i3} \text{sign}(\dot{x}_i) \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

де  $\omega_{i3} = 0,005$  – питомий опір коченню  $i$ -ї опорної платформи [5, 9, 10, 11, 13];  $R_{i3}^z$  – модуль вертикальної складової реакції  $\vec{R}_{i3}$  вантажоопорного вузла, розміщеного на  $i$ -й платформі.

Запишемо формули визначення реакцій в'язей  $\vec{R}_{i3}$  амортизуючих вузлів

$$\vec{R}_{i3} = (-N_{i3} \sin \varphi_i - F_{i3} \cos \varphi_i, 0, N_{i3} \cos \varphi_i - F_{i3} \sin \varphi_i) \quad (i = 1, 2), \quad (4)$$

де  $\varphi_i$  – кут відхилення вектора нормалі  $\vec{N}_{i3}$ , проведеного в точці  $A_i$  дотику ковзуна і циліндричної поверхні верхньої рами, відносно вертикалі  $OZ$  на  $i$ -й опорній платформі (рис. 1).

**Побудова рівнянь руху транспортної системи.** На основі загальних теорем динаміки систем зв'язаних твердих тіл запишемо рівняння руху центрів мас досліджуваної механічної системи в проєкціях на горизонтальну вісь  $OX$  (рис. 1)

$$m_1 \ddot{x}_1 = -P_{14} + P_{21} + N_{13} \sin \varphi_1 + F_{13} \cos \varphi_1 - F_1; \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -P_{21} + N_{23} \sin \varphi_2 + F_{23} \cos \varphi_2 - F_2; \quad (6)$$

$$m_3 \vec{V}_3 = \vec{R}_{13} + \vec{R}_{23} - m_3 g \vec{k}; \quad (7)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 = P_{14} - F_4, \quad (8)$$

де  $F_4 = m_4 g \mu_4 \text{sign}(\dot{x}_4)$  – сила тертя ковзання, яка перешкоджає післяударному рухові вагона-упору  $m_4$ ;  $\vec{V}_3$  – прискорення центру мас вантажу  $m_3$ .

На підставі результатів теореми про збереження кінетичного моменту запишемо векторне рівняння, яке описує поворот вантажу на опорах

$$J_3 \ddot{\varphi}_3 \vec{j} = \vec{r}_1 \times \vec{R}_{13} + \vec{r}_2 \times \vec{R}_{23}, \quad (9)$$

де  $J_3$  – момент інерції великогабаритного вантажу відносно осі  $O_3 Y_3'$  (тут  $O_3 X_3' Y_3' Z_3'$  – рухома система осей, яка зв'язана з центром мас  $O_3$  вантажу);  $\varphi_3$  – кут повороту вантажу на опорах,  $\sin(\varphi_3) \approx \varphi_3$ ;  $\vec{r}_i$  – радіуси-вектори (рис. 1), які з'єднують центр мас  $O_3$  вантажу та точки  $A_1$  і  $A_2$  прикладання реакцій  $\vec{R}_{i3}$  в'язей і визначаються так:

$\vec{r}_1 = (l - \varphi_3 h, 0, -l\varphi_3 - h)$ ;  $\vec{r}_2 = -(l + \varphi_3 h, 0, h - l\varphi_3)$ ,  
де  $2l$  – відстань між центрами верхніх опорних  
рам;  $2h$  – висота вантажу.

Далі визначимо кути  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  як функції від-  
носних переміщень вантажу на опорах. Верти-  
кальні переміщення  $z_{i3}$  вантажу  $m_3$  на кожній  
з опор отримаємо із формул

$$z_{i3} = R - \sqrt{R^2 - (x_3 - x_i)^2} \quad (i = 1, 2). \quad (10)$$

Визначимо прискорення  $\vec{V}_3$  центру мас вантажу

$$\vec{V}_3 = (\ddot{x}_3, 0, (\ddot{z}_{13} + \ddot{z}_{23})/2). \quad (11)$$

З (10) знайдемо вираз для кута повороту  $\varphi_3$   
вантажу  $m_3$  на опорах:

$$\varphi_3 = (\sqrt{R^2 - (x_3 - x_1)^2} - \sqrt{R^2 - (x_3 - x_2)^2})/2l. \quad (12)$$

З виразу (12) встановимо вираз для кутового  
прискорення  $\ddot{\varphi}_3$ :

$$\ddot{\varphi}_3 = [Q_{23}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_2) - Q_{13}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_1) + T_{23} - T_{13}]/2l, \quad (13)$$

де  $Q_{i3} = \frac{x_3 - x_i}{\sqrt{R^2 - (x_3 - x_i)^2}}$ ;  $T_{i3} = \frac{R^2(x_3 - x_i)^2}{[R^2 - (x_3 - x_i)^2]^{3/2}}$ ,  
 $i = 1, 2$ .

Кути  $\varphi_i, i = 1, 2$  визначимо у такий спосіб:

$$\sin(\varphi_i) = \frac{x_3 - x_i}{R}, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

Запишемо векторний добуток (9) із врахуван-  
ням виразів (4), (12)–(14):

$$\frac{J_3}{2l} [Q_{23}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_2) - Q_{13}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_1) + T_{23} - T_{13}] = \alpha_2 N_{23} - \alpha_1 N_{13}, \quad (15)$$

де  $\alpha_1 = (l - h\varphi_3)\beta_1 - (h + l\varphi_3)\gamma_1$ ;

$$\alpha_2 = (l + h\varphi_3)\beta_2 + (h - l\varphi_3)\gamma_2; \quad v = \beta_1 + \alpha_1\beta_2/\alpha_2;$$

$$\beta_i = \cos \varphi_i - \mu_{i3} \sin \varphi_i \operatorname{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_i);$$

$$\gamma_i = \sin \varphi_i + \mu_{i3} \cos \varphi_i \operatorname{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_i), \quad (i = 1, 2);$$

$$N_{13} = H_{13}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_1) + E_{13}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + D_{13};$$

$$N_{23} = H_{23}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_1) + E_{23}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + D_{23}.$$

Після виключення реакцій  $\vec{R}_3$  в'яези зведемо  
систему рівнянь (5)–(9), (11), (15) до виду, який  
є зручним для числового інтегрування. В резуль-  
таті отримаємо замкнену систему нелінійних  
диференціальних рівнянь відносно невідомих  
прискорень  $\ddot{x}_i, i = 1, 4$  у вигляді

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ P_{14} - F_4 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

де  $a_{21} = m_1 + \gamma_1 H_{13}$ ;  $a_{22} = \gamma_1 E_{13}$ ;  $a_{23} = -\gamma_1 (H_{13} + E_{13})$ ;  
 $b_2 = -P_{14} + P_{21} + \gamma_1 D_{13} - F_1$ ;

$$a_{31} = \gamma_2 E_{23}; \quad a_{32} = m_2 + \gamma_2 E_{23}; \quad a_{33} = -\gamma_2 (H_{23} + E_{23});$$

$$b_3 = -P_{21} + \gamma_2 D_{23} - F_2;$$

$$H_{23} = \left( \alpha_1 H_{13} - \frac{J_3}{2l} Q_{13} \right) / \alpha_2; \quad H_{13} = \frac{Q_{13}}{2v} \left( m_3 + \frac{\beta_2 J_3}{\alpha_2 l} \right);$$

$$E_{13} = \frac{Q_{23}}{2v} \left( m_3 - \frac{\beta_2 J_3}{\alpha_2 l} \right);$$

$$D_{13} = \left( \frac{m_3}{2} (T_{13} + T_{23}) + m_3 g + \frac{\beta_2 J_3}{\alpha_2 l} (T_{13} - T_{23}) \right) / v;$$

$$E_{23} = \left( \alpha_1 E_{13} + \frac{J_3}{2l} Q_{23} \right) / \alpha_2;$$

$$D_{23} = (\alpha_1 D_{13} + J_3 (T_{23} - T_{13}) / 2l) / \alpha_2.$$

**Результати числового аналізу динаміки  
механічної системи.** Для дослідження динаміч-  
них процесів, які відбуваються після зіткнення

транспортної системи у часі  $t$ , була обрана реальна  
транспортна система з такими параметрами:  
 $l = 6$  м;  $L = 12$  м;  $h = 1,5$  м;  $m_1 g = m_2 g = 0,287$  Мн;  
 $m_3 g = 0,775$  Мн;  $m_4 g = 1,46$  Мн;  $R = 1,625$  м;  
 $\mu_{13} = 0,2$ ;  $\mu_4 = 0,15$ . Початкові умови руху зчепу  
перед зіткненням були задані такими:  $x_i = 0, i = 1, 4$ ;  
 $\dot{x}_j = 2,78$  м/с (10 км/год),  $j = 1, 3$ ;  $\dot{x}_4 = 0$  м/с.

Для аналізу обрано ті динамічні характерис-  
тики системи, рівень яких визначає міру збе-  
реження якості вантажу при залізничних пере-  
везеннях. Такими характеристиками в цьому  
дослідженні є: абсолютні переміщення, швидко-  
сті і прискорення центрів мас (ЦМ) елементів сис-  
теми; динамічне поздовжнє прискорення ЦМ ван-  
тажу  $\ddot{x}_3$ ; реакції опор  $\vec{R}_3$ ; поздовжня інерційна  
сила  $F_{in}$ , яка діє на вантаж; зусилля у автозчепках  
 $P_{14}, P_{21}$  між відповідними платформами; відносні  
поздовжні  $x_{31}, x_{32}$  і вертикальні переміщення  $z_{31},$   
 $z_{32}$  вантажу на опорах. Перейдемо до результатів  
числового аналізу.

Криві, показані на рис. 2, описують зміну  
швидкостей ЦМ елементів системи в залежності  
від часу  $T$ . Символами  $v_1, v_2, v_3, v_4$  позначено  
абсолютні швидкості  $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$  кожної з чоти-  
рьох мас системи відповідно.

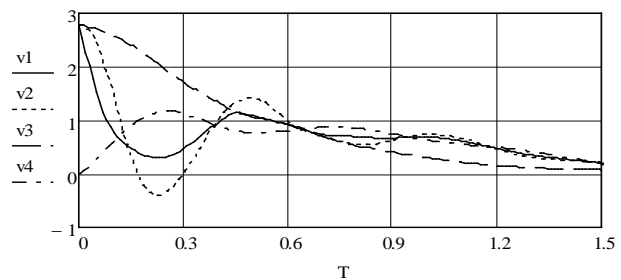


Рис. 2. Графіки зміни швидкостей центрів мас  
елементів системи

Як видно з наведених графіків, всі основні  
перехідні процеси в системі швидко згасають  
вже впродовж 1,5 с після зіткнення. Аперіодичний  
характер кривої швидкості вантажу  $v_3$   
якісно відрізняється від виду кривих швидкостей

$v_1, v_2, v_4$  опорних платформ та вагона-упору, які мають коливальний згасаючий характер. На деяких часових відрізках вантаж «залипає» на опорах, оскільки швидкості вантажу і несучих його платформ збігаються. Далі на рис. 3 показано дві криві, що описують відносні поздовжні переміщення вантажу  $x_{31}$  і  $x_{32}$  на опорах в часі  $T$ . Максимальне відносне переміщення вантажу досягається на задній опорі і складає приблизно  $x_{32} = 0,561$  м, що дещо більше, ніж відносне переміщення на передній опорі ( $x_{31} = 0,544$  м). Цей факт можна пояснити тим, що при зіткненні передня опора «довантажується» за рахунок випереджаючої дії амортизаторів на передній опорній платформі, а задня – «розвантажується» через податливість пружного зв'язку  $P_{21}$  між платформами зчепу, що і призводить до збільшення сил тертя на передній опорі, і їх зменшення на задній.

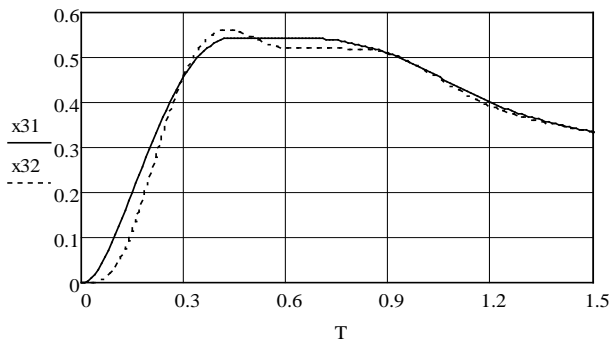


Рис. 3. Графіки зміни відносних переміщень ЦМ вантажу на опорах

На рис. 4 показано криві, що описують зміну поздовжніх прискорень ЦМ елементів системи в часі  $T$ . Символами  $DDx_i$ , ( $i = 1, 4$ ) позначені поздовжні прискорення  $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4$  центрів мас транспортної системи відповідно.

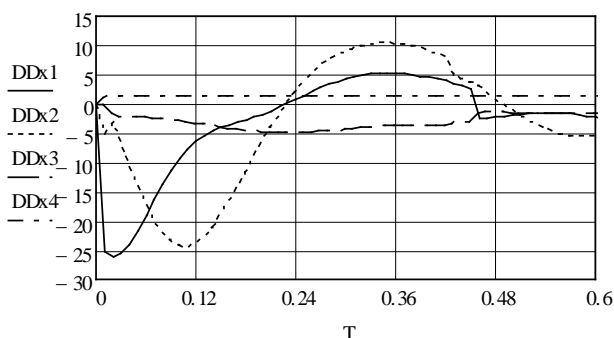


Рис. 4. Графіки зміни поздовжніх прискорень ЦМ елементів системи

Наведені криві дають можливість кількісно оцінити ефективність застосування запропонованих

амортизуючих вантажоопорних вузлів: для несучих платформ модуль поздовжнього прискорення складає  $|\ddot{x}_1|_{\max} = 25,23$  м/с<sup>2</sup>, а для вантажу ця величина не перевищує  $|\ddot{x}_3|_{\max} = 4,94$  м/с<sup>2</sup>. Якби вантаж був закріплений на зчепі опорних платформ відповідно до традиційного «жорсткого» способу з нерухомою фіксацією на передній опорній платформі, то модуль його поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_3|_{\max}$  можна було ототожнити з модулем поздовжнього прискорення передньої опорної платформи  $|\ddot{x}_1|_{\max}$ . А ця величина в п'ять-шість разів більше, ніж при запропонованому «податливому» способі закріплення вантажу на вагонах.

За результатами числового аналізу на основі розробленої математичної моделі динамічної системи були встановлені наступні **закономірності**:

- чим більше радіус  $R$  циліндричних поверхонь амортизаторів, тим менше модуль поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_3|$  вантажу в межах амортизуючого ходу верхніх рухомих рам;
- зі зменшенням радіуса  $R$  циліндричних поверхонь амортизаторів зменшуються відносні переміщення вантажу на опорах, а також модуль поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_2|$  задньої опорної платформи, проте збільшується модуль поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_1|$  передньої платформи;
- величина радіуса  $R$  циліндричних поверхонь є потужним регулятором рівня динамічних опорних реакцій: з його збільшенням зменшуються як поздовжні, так і вертикальні складові реакцій амортизуючих опор;
- збільшення коефіцієнта тертя ковзання  $\mu$  на амортизуючих опорах призводить до різнонаправленого динамічного ефекту: до зменшення вертикальних складових реакцій, що діють на вантаж, з одночасним збільшенням поздовжніх складових цих же реакцій;
- збільшення маси вантажу  $m_3$  призводить до зменшення максимальної амплітуди модуля  $|\ddot{x}_3|$  поздовжнього прискорення вантажу, модуля поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_2|$  задньої опорної платформи і відносного переміщення вантажу на опорах;
- найбільший вплив на модуль поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_3|$  вантажу здійснює величина початкової швидкості  $V_0$  зіткнення: тут спостерігається пряма залежність модуля поздовжнього прискорення  $|\ddot{x}_3|$  від  $V_0$  з великим кутом нахилу відносно осі  $V_0$ ;
- використання амортизуючих вузлів призводить до зменшення динамічних впливів на опорні платформи в порівнянні з жорстким способом кріплення: для передньої платформи модуль



поздовжнього прискорення знижується в два рази, а зусилля в передній парі автотягачів – в чотири рази.

**Висновки.** Встановлено, що для значного зниження рівня поздовжніх інерційних навантажень на транспортовані залізницею вантажі потрібно змінити традиційний «жорсткий» спосіб їх закріплення відносно опорних платформ на «рухомо-регульований» спосіб із використанням амортизуючих вузлів із сухим тертям. Числовий аналіз

за розробленою математичною моделлю показав, що при використанні запропонованих амортизаторів рівень динамічних впливів на транспортовані вантажі можна зменшити більш ніж в 6 разів у порівнянні з існуючим традиційним способом їх закріплення. Показано, що радіус циліндричних поверхонь амортизуючих опор є потужним регулятором рівня динамічних впливів на вантажі і несучі платформи.

#### Список літератури:

1. Васильєв С.М. Порівняльний аналіз динамічних характеристик турнікетно-закріплюючих пристроїв роликів, полозкового та клинового типу // Вісник Дніпр. нац. ун-у заліз. трансп., 2008, № 23. С. 16–19.
2. Васильєв С.М., Железняков А.Д., Целковікова Л.П. Моделювання зіткнень вагонів при сухому терті в опорах вантажу // Вісник Дніпр. нац. ун-у заліз. трансп., 2016, № 4 (64). С. 116–124. doi 10.15802/stp2016/77990
3. Державні будівельні норми України. Навантаження і впливи. ДБН В1.2.-2:2006. – К., 2006, 59 с.
4. Кільчевський Н.А. Теорія зіткнення твердих тіл. К.: Наук. думка, 1969, 246 с.
5. Лазарян В. А. Моделювання зіткнення зчепів з вагонів з рухомими хребтовими балками / В. А. Лазарян, Є. П. Блохін, Л. А. Манашкін // Праці ДПТ, Дніп-ськ, 1968. Вип. 76. С. 26–33.
6. Лазарян В.А. Динаміка транспортних засобів: вибрані праці. К.: Наук. думка, 1985. 527 с.
7. Леgezа В.П. Динаміка механічних систем з вантажоопорними вузлами, що реалізують голономні та неголономні в'язі. Автореф. канд. фіз.-матем. наук. Донецьк: ПІММ АН УРСР, 1988. 22 с.
8. Леgezа В.П. Застосування теорії роликів амортизаторів для віброзахисту транспортних конструкцій // Пробл. міцності, 2006. № 2. С. 147–155.
9. Манашкін Л.А. Динаміка вагонів, зчепів та поїздів при поздовжніх ударах. Автореф. докт. техн. наук. Дніп-ськ, 1979. 42 с.
10. Манашкін Л.А., Мямлін С. В., Приходько В. І. Гасителі коливальних і амортизатори ударів рейкових екіпажів (математичні моделі). Монографія. Вид-во Дніпр. нац. ун-у заліз. трансп. 2007, 196 с.
11. Пастушенко В.І. Динамічні впливи на залізобетонні конструкції під час перевезення залізничним транспортом. Автореф. канд. техн. наук. К.: НДІБК, 1984. 21 с.
12. Технічні умови розміщення та кріплення вантажів. Додаток 3 до УМВС. Редакція від 01.07.2022 г. – К.: Девольта, 2022. 468 с.
13. Ушкалов В.Ф. та ін. Математичне моделювання коливальних рейкових транспортних засобів / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Іккол та ін.; під ред. В. Ф. Ушкалова. К.: Наук. думка, 1989. – 240 с.
14. Шатунов А.В. Навантаженість зчепів з двох платформ при ресурсозберігаючому способі транспортування довгомірних вантажів. Автореф. канд. техн. наук. Дніпр. ін-т інж. ж.-д. трансп. – Дніп-к, 1992, 17 с.
15. Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjer-Petersen S., Zether B. Equipment for rational securing of cargo on railway wagons (jvgRASLA3). – Sweden: MariTerm AB, 2004. 228 p.
16. Ansari M, Esmailzadeh E, Younesian D. Longitudinal dynamics of freight trains // Int. J. Heavy Veh. Syst. – 2009. – 16(1/2). – P. 102–131.
17. Belforte P., Cheli F., Diana G., Melzi S. Numerical and experimental approach for the evaluation of severe longitudinal dynamics of heavy freight trains // Veh. Syst. Dyn. 2008. 46 (Suppl.). P. 937–955.
18. Cole C. Improvements to Wagon connection modelling for longitudinal train simulation // Proc. of Conf. on Railway Eng. Rockhampton, 1998. –. 187–194.
19. Cole C. Longitudinal train dynamics. In: Iwnicki S. (ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. –London: Taylor & Francis, 2006. P. 239–278.
20. Cole C., Spiryagin M., Wu Q., Sun Y.Q. Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics // Vehicle System Dynamics. 2017. 55, N 10. P. 1498–1571.
21. Diana G., Cheli F., Belforte P., Melzi S. Numerical and experimental investigation of heavy freight train dynamics // Proceedings of IMECE. Wash-n; 2007, P. 1–10.
22. Legezа V.P., Neshchadym O. M. A mathematical model of the dynamic behavior of a transportation system with pendulum shock absorbers // Strength of Materials, 2022, Vol. 54, No. 3, 396-406. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00415-1>
23. Legezа V., Dychka I., Hadyaniak R., Oleshchenko L. Mathematical Model of the Dynamics in a One Nonholonomic Vibration Protection System // Int. J. of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2018. 10, No. 10 P. 20–26.
24. Loading Guidelines Code of practice for the loading and securing of goods on railway wagons. Volume 2. Goods Version 01/04/2019, 3- rd edition. – Int. Union Railways 2019.
25. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. Longitudinal train dynamics: an overview // Vehicle System Dynamics. – 2016. 54. N 12. P. 1688–1714.

**Legeza V.P., Neshchadym O.M. MATHEMATICAL MODEL OF THE DAMPING PROCESS OF LONGITUDINAL IMPACTS IN A SYSTEM WITH DRY FRICTION SHOCK ABSORBERS**

*A new damping system for longitudinal transport impacts on large loads based on the use of special damping dry friction turnstiles is proposed. The work simulates an extreme variant of the dynamic load of a four-mass transport system with the proposed load depreciation system. The construction of the equations of motion of the elements of the transport system was carried out using the D'Alembert method. The dynamics of the system was studied using mathematical modeling methods and the theory of oscillations of coupled mechanical systems with a finite number of degrees of freedom. The resulting system of four significantly nonlinear differential equations of motion was integrated by numerical methods using the developed program. In the course of numerical experiments, the main regulatory characteristics of the proposed shock absorbers, which affect the quality of their functioning, were established. It is shown that the radius of cylindrical surfaces of shock-absorbing load-bearing nodes is a powerful regulator of the level of dynamic loads on transported structures and support platforms. A quantitative assessment of the effectiveness of the use of dry friction shock absorbers in reducing the level of dynamic impact on cargo is given. It is shown that when using the proposed shock absorbers, the level of longitudinal dynamic effects on cargo can be reduced by more than 6 times compared to the existing traditional method of railway transportation. As a result of the numerical analysis of the dynamic behavior of the transport system, it was established that in order to significantly reduce the level of longitudinal transport impact on the cargo, their fixation relative to the wagons should be carried out in a "movement-regulated manner" (in contrast to the traditional "rigid" fixation of the cargo on support platforms). The use of shock-absorbing nodes also leads to a reduction of dynamic effects on the support platforms in comparison with the "hard" method of attaching loads.*

**Key words:** *mathematical model, damping process, transport system, turnstile, dry friction shock absorber, longitudinal dynamic effects.*

*Лісовець С.М.*

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ДОСТУП ДО OPC-СЕРВЕРІВ З СЕРЕДОВИЩА .NET ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ADVOSOL

Сучасне промислове виробництво передбачає використання сучасних автоматизованих систем керування (систем автоматизації), які повинні не тільки забезпечувати оптимальне керування таким виробництвом, але й простий і ефективний контроль за ним зі сторони обслуговуючого персоналу. Такий контроль звичайно здійснюється за допомогою SCADA-систем – пакетів програм, які призначені для збору, обробки, відображення і архівування даних про об'єкт керування, а також виконання над такими даними певних додаткових дій в залежності від функціонального наповнення таких пакетів. Одним з «недоліків» представлених на ринку SCADA-систем є їхня надлишковість. Більша частина функціональних можливостей таких систем може ніколи не бути використана, при цьому обслуговування таких систем вимагає персоналу з високою кваліфікацією. Одним з існуючих підходів до контролю за виробництвом є власна розробка SCADA-систем з одночасним використанням одного або кількох готових OPC-серверів. Основною перешкодою такій розробці є значна складність безпосереднього програмування обміну даними з OPC-серверами. В такому випадку на допомогу «приходять» такі продукти, як, наприклад, програмні бібліотеки Advosol Inc., які дозволяють легко організувати обмін даними з OPC-серверами з середовища .NET. В проведеному дослідженні, результати якого наведено в матеріалах статті, на прикладі панелі оператора ИП320 з використанням мови програмування С# в середовищі програмування Visual Studio показана можливість обміну даними між такою панеллю і програмним забезпеченням на С# через OPC Server 320 з використанням бібліотек Advosol Inc. В даному випадку обмін здійснювався через інтерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU, причому сама панель по черзі працювала в режимах Master і Slave, а для її налаштування використовувалася програма-конфігуратор.

**Ключові слова:** OPC-сервер, SCADA-система, людино-машинний інтерфейс, програмна бібліотека, середовище програмування.

**Постановка проблеми.** Промислове виробництво у всьому світі, що особливо проявляється в розвинених країнах, знаходиться в постійному розвитку і вдосконаленні. Певна частина такого розвитку припадає на різні системи керування, і, зокрема, на автоматизовані системи. Такі системи вирішують дві основні задачі: керування виробництвом (виробничим процесом, виробничою операцією) і реалізація людино-машинного інтерфейсу. Людино-машинний інтерфейс, по суті, надає можливість людині в будь-який заданий момент часу розуміти, що відбувається на певному виробництві і за необхідності вносити в роботу такого виробництва потрібні коригування. Сучасні людино-машинні інтерфейси реалізуються за допомогою SCADA-систем – пакетів програм, які за допомогою різних текстових і графічних елементів в реальному часі відображають елементи виробництва так, щоб ця інформація могла бути швидко сприйнята і опрацьована. Зважаючи на те, що на сучасному виробництві одночасно можуть використовуватися кілька сотень

і навіть тисяч одиниць обладнання від різних виробників, які об'єднані в ті або інші промислові комп'ютерні мережі і які реалізують різні підходи до налаштування своєї роботи, реалізація для такого виробництва SCADA-систем представляє собою достатньо складну задачу [1].

Одним з напрямів реалізації SCADA-систем є використання OPC-серверів як проміжної ланки між обладнанням і людино-машинним інтерфейсом. Одна SCADA-система одночасно може використовувати кілька OPC-серверів, кожен з яких може бути оптимізованим для роботи з заданим обладнанням по певним комунікаційним інтерфейсам з використанням певних протоколів обміну даними. Наприклад, обладнання ТОВ «РАУТ-АВТОМАТИК» може використовувати власний протокол UNIVERS [2], а обладнання ТОВ «АКУТЕК» – власний протокол ОБЕН [3]. Крім того, представлені на ринку SCADA-системи часто мають дуже широкий функціонал, більша частина якого ніколи не буде використовуватися, і при цьому вони є достатньо складними

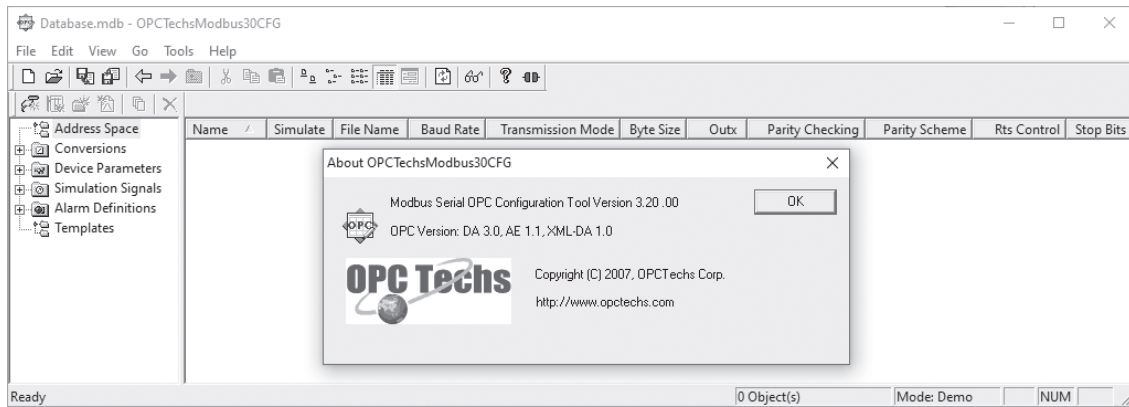


Рис. 1. Зовнішній вигляд конфігуратора OPC Server 320

і дорогими, а також вимогливими до апаратно-програмного забезпечення. Таким чином, якщо необхідно керувати нескладним виробничим процесом або операцією, доцільним може бути використання кількох OPC-серверів потрібних виробників обладнання (які звичайно розповсюджуються вільно і безкоштовно), а проектування і реалізацію SCADA-системи виконати самостійно.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш затребуваним на ринку OPC-стандартом, незважаючи на деякі недоліки і певну «застарілість», є OPC Data Access. Типовим OPC-сервером, який підтримує цей стандарт, є OPC Server 320 (див. рис. 1) [4]. Зокрема, він підтримує версії 1.0, 2.04, 2.05 і 3.0 цього стандарту.

Отримати доступ до даних таких серверів можна програмним шляхом. Основним недоліком такого доступу є те, що деякі з OPC-серверів (в тому числі і OPC Data Access) базуються на таких технологіях Microsoft Corp., як OLE, ActiveX і/або COM/DCOM та не є платформонезалежними.

Такі технології є достатньо складними і «заплутаними» у використанні, вимагають докладання великої кількості зусиль і можуть приводити до появи помилок, які складно виявити (внаслідок чого може суттєво зменшитися надійність обміну даними з OPC-серверами, що для промисловості може бути критичним). Крім того, вони фактично не розвиваються і замінюються іншими сучасними технологіями – зокрема, .NET. Відповідно, на теперішній момент часу на ринку існують різні розробники як платного, так і безкоштовного програмного забезпечення для підтримки роботи OPC-серверів з середовища .NET. Така підтримка полягає у використанні створених такими розробниками вже готових і багатократно перевірених

програмних бібліотек, які звичайно можна підключати до власного програмного забезпечення. Одним з таких розробників є компанія Advosol Inc., яка розпочала свою діяльність в 1996 р. як постачальник програмних компонентів і інструментів для роботи з OPC-технологіями (в тому числі і з OPC Server 320) [5]. Одним з засобів роботи з OPC-технологіями, які рекомендує ця компанія, є мова програмування C# в середовищі програмування Visual Studio.

**Постановка завдання.** Завданням виконаного дослідження була розробка на C# в Visual Studio програмного забезпечення (SCADA-системи з мінімальними можливостями) з використанням програмних бібліотек Advosol Inc. з метою отримання повного доступу до OPC-сервера OPC Server 320, а також експериментальна перевірка роботи такого програмного забезпечення з використанням панелі оператора ИП320 (див. рис. 2) [6, 7, 8].



Рис. 2. Зовнішній вигляд панелі оператора ИП320

Така панель представляє собою графічний рідинно-кристалічний дисплей з вісьмома керувальними та дванадцятьма цифровими і функціональними кнопками, яка може працювати через інтерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU в режимах Master або Slave.

**Виклад основного матеріалу.** Для приймання даних в напрямі від ИП320 до OPC Server 320 використовувався елемент «Функціональная кнопка» (див. рис. 3).



Рис. 3. Елемент «Функціональная кнопка»

Для приймання даних в напрямі від OPC Server 320 до ИП320 використовувався елемент «Регистр» (див. рис. 4).



Рис. 4. Елемент «Регистр»

Для програмування ИП320 використовувався додаток «Конфігуратор ИП320», який дозволяв на одному дисплеї ИП320 формувати кілька логічних екранів і здійснювати до кожного з них незалежний доступ.

Для роботи з програмними бібліотеками Advosol Inc. в проєкт на C# в Visual Studio необхідно було додати посилання на відповідні dll-файли (наприклад, базові класи знаходилися в файлах OpсNetBase.Net4.dll і OpсNetBase.Net6.dll). Згідно з технологією .NET, вся логіка роботи з OPC-серверами реалізується за допомогою кількох класів. Основними такими класами є класи OpсServerBrowser (доступ до зареєстрованих OPC-серверів), BrowseTree (перегляд «адресного простору» OPC-сервера), ShowBrowseTree (перегляд «адресного простору» в елементі керування Windows TreeView), ShowBrowseTreeList (перегляд «адресного простору» в TreeView і ListView), OpсDataBind (автоматичне відображення і оновлення даних в елементах керування Windows), SyncIOGroup (синхронні читання і запис даних), RefreshGroup (асинхронні читання і запис даних), ItemListLoader (читання

конфігураційних файлів XML) і XmlIO (серіалізація і десеріалізація масивів).

Для безпосереднього обміну даними з ИП320 використовувати всі класи одночасно потреби не було – відповідно, було використано тільки кілька з них. Зокрема, конструктор класу OpсServerBrowser дозволяв створювати відповідний об'єкт для локального комп'ютера, для мережі (потрібне мережеве ім'я) або як Host із заданими параметрами доступу (потрібні ім'я домену, мережеве ім'я, пароль і логін). Для отримання списку OPC-серверів використовувався метод GetServerList(...) класу OpсServerBrowser, причому окремо можна було отримати OPC-сервери версій 2.04 і 2.05 та 3.0.

Обмін даними з ИП320 відбувався в синхронному режимі, тому основним класом, який використовувався, був SyncIOGroup. Метод Item(...) такого класу дозволяв по унікальному найменуванню елемента даних (повному «шляху» до такого елемента даних) отримати відповідну унікальну «структуру» ItemDef, яка утримувала властивості такого елемента у вигляді, в свою чергу, трьох окремих «структур» OpсIDef, OpсIInfo і OpсIRslt. Для доступу до елементів даних використовувалися чотири методи класу SyncIOGroup.

Зокрема, метод Add(...) додавав елемент даних в групу (він звичайно викликався автоматично при виклику методів Read(...) і Write(...)). Відповідно, для видалення елемента даних з групи використовувався метод Remove(...). Найбільш «корисними» для обміну даними були методи Read(...) і Write(...). Перший з них читав елемент даних, використовуючи унікальне найменування елемента даних або відповідну «структуру» ItemDef, а другий здійснював запис такого елемента.

Обмін даними з ИП320 здійснювався приблизно кожні 0,5 с, що при швидкості обміну даними 115200 кбіт/с забезпечувало практично «миттєву» реакцію такої панелі.

**Висновки.** В статті показано, що доступ до OPC-серверів (зокрема, згідно з OPC-стандартом OPC Data Access) можна здійснити, використовуючи не достатньо складні технології Microsoft Corp., такі як COM/DCOM і деякі інші, а середовище .NET і достатньо прості програмні компоненти і інструменти для роботи з OPC-технологіями сторонніх розробників (зокрема, Advosol Inc.).

#### Список літератури:

1. Пупена О.М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI: Навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 594 с. ISBN 978-617-7910-07-6.

2. OPC-сервер ЮНІВЕРС: офіц. веб-сайт. URL: [www.raut-automatic.kiev.ua](http://www.raut-automatic.kiev.ua). Дата останнього перегляду: 04.03.2024.
3. Опис протоколу обміну між ПЕОМ і приладами ОБЕН: офіц. веб-сайт. URL: [www.aqteck.com.ua](http://www.aqteck.com.ua). Дата останнього перегляду: 04.03.2024.
4. OPC Server 320: офіц. веб-сайт. URL: [www.opctechs.com](http://www.opctechs.com). Дата останнього перегляду: 04.03.2024.
5. OPC Classic for .NET. OPC DA .NET Client Development Toolkit for C# and VB.NET: офіц. веб-сайт. URL: [www.advosol.com](http://www.advosol.com). Дата останнього перегляду: 04.03.2024.
6. Лісовець С.М. Особливості програмування панелі оператора ИП320 для використання як людинно-машинного інтерфейсу / С.М. Лісовець, Н.В. Омецинська, О.Г. Гуйда, К.І. Скрипка, І.Л. Ківа. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2021. Випуск 6. С. 43–49. DOI: 10.32851/tnv-tech.2021.6.6.
7. Лісовець С.М. Використання панелі оператора ИП320 в системах автоматизованого керування / С.М. Лісовець, Р.А. Кучма. *IV міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг»*. К.: КНУТД. 22 жовтня 2020. С. 178–179.
8. ОБЕН ИП320. Панель оператора. Настанова щодо експлуатування АРАВ.421449.002 РЭ.

### **Lisovets S.M. ACCESS TO OPC SERVERS FROM THE .NET ENVIRONMENT USING ADVOSOL SOFTWARE**

*Modern industrial production involves the use of modern automated control systems (automation systems), which should not only provide optimal control of such production, but also simple and effective control over it by service personnel. Such control is usually carried out with the help of SCADA systems – software packages that are designed to collect, process, display and archive data about the control object, as well as perform certain additional actions on such data, depending on the functional content of such packages. One of the «disadvantages» of SCADA systems on the market is their redundancy. Much of the functionality of such systems may never be used, and maintenance of such systems requires highly skilled personnel. One of the existing approaches to production control is the in-house development of SCADA systems with the simultaneous use of one or more ready-made OPC servers. The main obstacle to such development is the significant complexity of direct programming of data exchange with OPC servers. In this case, such products as, for example, software libraries of Advosol Inc. «come to the rescue», which allow you to easily organize data exchange with OPC servers from the .NET environment. In the research conducted, the results of which are presented in the materials of the article, using the example of the ИП320 operator panel using the C# programming language in the Visual Studio programming environment, the possibility of data exchange between such a panel and C# software via OPC Server 320 using Advosol Inc. libraries is shown. In this case, the exchange was carried out via the RS-485 interface using the Modbus RTU protocol, and the panel itself worked alternately in Master and Slave modes, and the configurator program was used to configure it.*

**Key words:** OPC server; SCADA system; human-machine interface; software library; programming environment.

УДК 004.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/32>

**Ляшенко О.М.**

Херсонський національний технічний університет

**Бодягін В.Ю.**

Херсонський національний технічний університет

**Кирийчук Д.Л.**

Херсонський національний технічний університет

**Фролова М.Е.**

Херсонський національний технічний університет

## ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ УНІВЕРСИТЕТУ: ПІДСИСТЕМА «СТУДЕНТ»

*У роботі проведено проєктування програмної системи для підтримки процесів керування навчальною діяльністю університету: підсистема «Студент».*

*Запропонована програмна система забезпечує обробку карток студентів, обробку інформації про успішність студентів, формування екзаменаційних відомостей студентів, формування наказів на призначення стипендії та матеріальну допомогу.*

*Програмна система дозволяє вводити, зберігати та аналізувати інформацію про студентів протягом усього періоду їх навчання.*

*Архітектура програмної системи базується на архітектурному патерні Модель-Подання-Контролер (Model-View-Controller) MVC. Патерн MVC відокремлює подання системи та взаємодію із системою від даних системи. Система поділяється на три логічних компонента, які взаємодіють один з одним. Компонент Модель керує системними даними та операціями над даними. Компонент Подання відображає дані для користувача. Компонент Контролер взаємодіє з користувачем, ініціює операції в моделі і керує роботою подання. Патерн MVC дозволяє змінювати дані незалежно від їхнього подання. Зміна даних, зроблена в одному поданні, відображається у всіх інших поданнях програмної системи.*

*Для розроблення програмної системи було обрано ASP.NET Web Forms, що базуються на технології Microsoft ASP.NET, у якій код, що виконується на сервері, динамічно генерує вихідні дані веб-сторінки в браузер або клієнтський пристрій. Сторінка Web Forms ASP.NET автоматично відображає правильний HTML-код, сумісний із браузером, для таких функцій, як стилі, макет тощо. Web Forms сумісні з будь-якою мовою, яку підтримує загальномовне середовище виконання .NET. Для створення Web Forms ASP.NET в роботі було використано інтегроване середовище розробки Visual Studio та мову програмування C#.*

*Для проєктування, моделювання та розроблення бази даних програмної системи для підтримки процесів керування навчальною діяльністю університету було використано MySQL Workbench.*

**Ключові слова:** програмна система, навчальна діяльність університету, ASP.NET Web Forms, мова C#.

**Постановка проблеми.** Нині практично відсутній огляд сучасних теоретико-методологічних підходів до проєктування та розроблення програмних систем для підтримки процесів керування навчальною діяльністю університету, а також шляхів подальшого розвитку таких систем.

Таким чином, проєктування, моделювання та розроблення програмної системи є актуальною науково-прикладною задачею, а її побудова потребує виявлення та аналізу сучасних тенденцій розвитку та застосування таких сис-

тем, насамперед, на основі провідних наукових публікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] розглянуто питання впровадження хмарних сервісів в освітній процес дисципліни «Бази даних» майбутніх учителів інформатики і проєктування на їх основі хмаро орієнтованого навчального середовища.

У роботі [2] розглянуто питання IT-забезпечення діяльності університету. Розглянуто структуру інтегрованої інформаційної системи університету,

методологію організації бізнес-процесів у ЗВО та їх інформаційно-аналітичну підтримку. Описано досвід розбудови ІТ-інфраструктури Сумського державного університету, методичні та технологічні розробки і надано відповідні рекомендації.

У роботі [3] розглянуто шляхи використання відкритого інформаційно-освітнього середовища в умовах змішаного та дистанційного навчання, його вплив на якість освітнього процесу та підготовку майбутніх фахівців в умовах цифрової трансформації вищої освіти.

У роботі [4] розроблено платформу прикладної системи для управління викладанням в коледжах та університетах, яка може допомогти персоналу ефективно обробляти різні види інформації та надавати інформаційні послуги для викладачів та студентів. Основою прикладної системи є алгоритм багаторівневої нейронної моделі.

У роботі [5] представлено концептуальну карту програмних моделей, методів і технік, а також елементів, які було використано у розробці навчальної програми. Ця концептуальна карта дозволяє створити базу знань для міждисциплінарної роботи між спеціалістами з навчальних програм, керівниками програм, викладачами та розробниками програмного забезпечення.

**Метою статті** є проектування програмної системи для підтримки процесів керування навчальною діяльністю університету: підсистема «Студент».

**Виклад основного матеріалу.** Програмна система (ПС) забезпечує обробку карток студентів, обробку інформації про успішність студентів, формування екзаменаційних відомостей студентів, формування наказів на призначення стипендії та матеріальну допомогу.

Архітектура ПС базується на архітектурному патерні Модель-Подання-Контролер (Model-View-Controller, MVC). Патерн MVC дозволяє змінювати дані незалежно від їхнього подання. Зміна даних, зроблена в одному поданні, відображається у всіх інших поданнях ПС.

На рис. 1 патерн MVC реалізує механізм керування взаємодією з користувачем.

Після проектування архітектури було виконано декомпозицію ПС на модулі. Фактично цю роботу можна вважати введенням у детальне проектування, яке конкретизує архітектурні рішення. Завдання декомпозиції це завдання визначення внутрішнього змісту кожної підсистеми (модуля). Результатом її вирішення є формування структури підсистеми – набору модулів та відносин їх взаємодії.

Відомі два підходи та два типи моделей для декомпозиції підсистем на модулі: модель потоку даних та об'єктно-орієнтована модель. В роботі для декомпозиції підсистем на модулі було застосовано об'єктно-орієнтовану модель.

На рис. 2. подано приклад декомпозиції підсистеми «Студент» на модулі, що призначені для збирання та зберігання інформації про студентів.

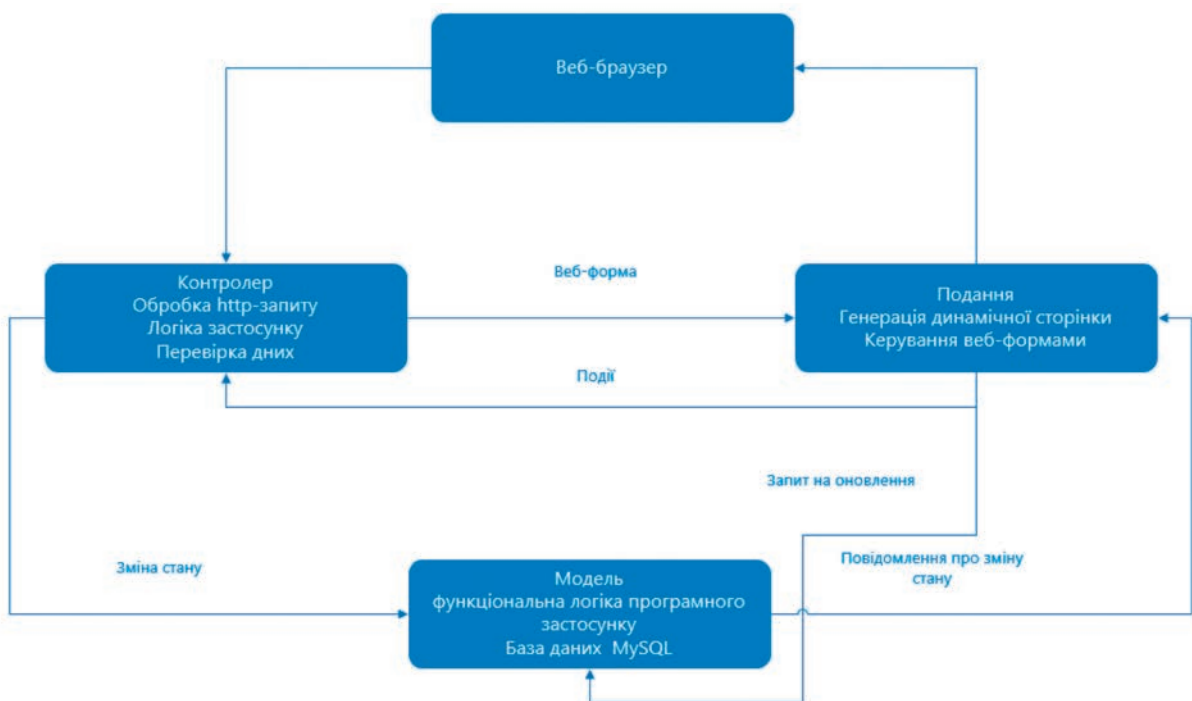


Рис. 1. Архітектура програмної системи на основі патерну MVC



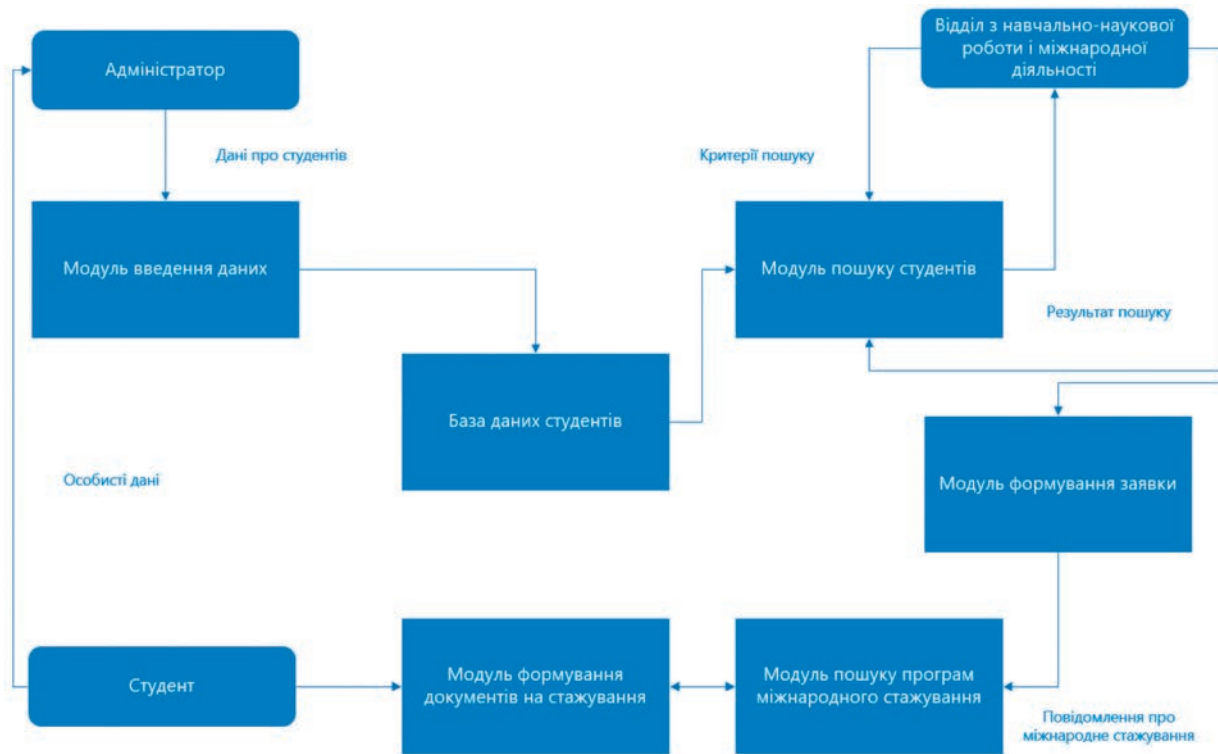


Рис. 2. Приклад декомпозиції підсистеми «Студент» на модулі

Також рис. 2 демонструє приклад процесу надання через Інтернет фахівцям Відділу з навчально-наукової роботи і міжнародної діяльності інформації про студентів. Зовнішньою сутністю є Відділ з навчально-наукової роботи і міжнародної діяльності, адміністратор та студент. Фахівець Відділу з навчально-наукової роботи і міжнародної діяльності реєструється в системі, вводить дані для пошуку кандидатів на проходження міжнародного стажування та отримує від системи результати пошуку. Адміністратор вводить інформацію про студентів, які зберігаються у базі даних. Студент може змінити свою контактну інформацію, зміни також зберігаються у базі даних. Вибраним студентам фахівець Відділу з навчально-наукової роботи і міжнародної діяльності надсилає повідомлення із пропозицією про проходження міжнародного стажування в межах програм академічної мобільності.

Для проектування, моделювання та розроблення бази даних ПС було використано MySQL Workbench. База даних ПС містить 23 таблиці (рис. 3).

У БД виділені наступні сутності: Вчене\_Звання, Місце\_Народження, Громадянство, Дисципліна\_Плану, Назва\_Дисципліни, Рівень\_Освіти, Навчальна\_Картка, Екзаменаційна\_Відомість, Факультет, Назва\_Групи, Сімейний\_Стан, Оцінка,

Наказ, Місце\_Проживання, Пільга, Спеціалізація, Спеціальність, Студент, Викладач, Напрямок\_Підготовки, Університет.

Сутності із зв'язком 1 до N:

1. Студент – Місце\_Народження.
2. Студент – Громадянство.
3. Студент – Сімейний\_Стан.
4. Студент – Місце\_Проживання.
5. Навчальна\_Картка – Університет.
6. Навчальна\_Картка – Факультет.
7. Навчальна\_Картка – Рівень\_Освіти.
8. Навчальна\_Картка – Напрямок\_Підготовки.
9. Навчальна\_Картка – Спеціалізація.
10. Навчальна\_Картка – Спеціальність.
11. Навчальна\_Картка – Студент.
12. Навчальна\_Картка – Пільга.
13. Навчальна\_Картка – Наказ.

Сутності із зв'язком N до M:

1. Студент – Дисципліна\_Плану.
2. Студент – Екзаменаційна\_Відомість.
3. Викладач – Вчене\_Звання.

Для розроблення ПС було обрано ASP.NET Web Forms, інтегроване середовище розробки Visual Studio та мову програмування C#.

Структуру ПС у середовищі Visual Studio подано на рис. 4.

У програмі є три основні сторінки: Default.aspx (Home), About.aspx і Contact.aspx. До кожної

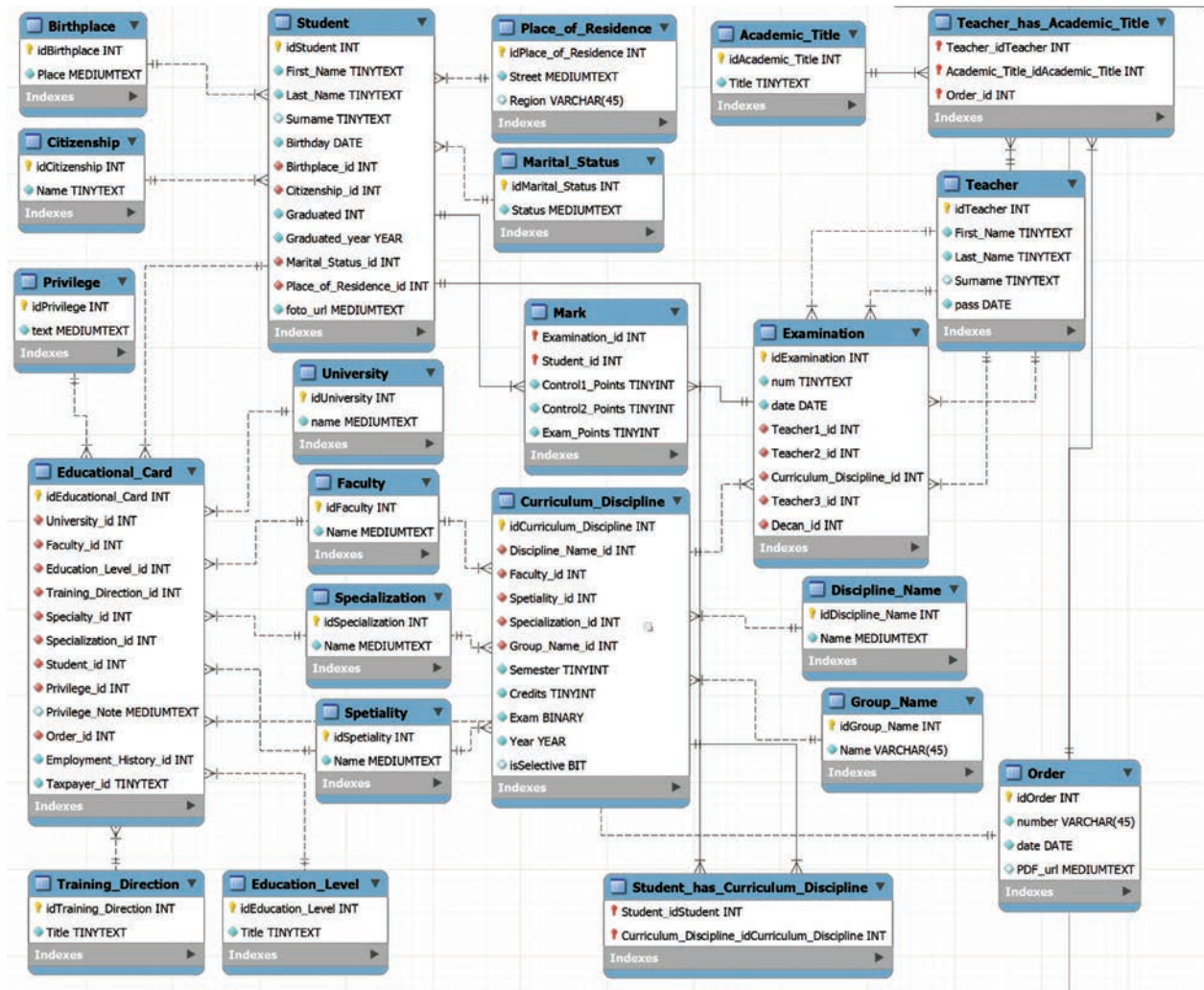


Рис. 3. Структурна схема бази даних ПС

з цих сторінок можна перейти з верхньої панелі навігації. Також є дві додаткові сторінки, які містяться в папці Account, Register.aspx і Login.aspx. Ці дві сторінки дозволяють використовувати можливості ASP.NET для створення, зберігання та перевірки облікових даних користувача [6].

Під час запуску сторінки ASP.NET Web Forms вона проходить життєвий цикл, під час якого виконується ряд кроків обробки. Ці кроки включають ініціалізацію, створення екземплярів елементів керування, відновлення та підтримку стану, запуск коду обробника подій і візуалізацію.

Коли веб-сервер отримує запит на сторінку, він знаходить сторінку, обробляє її, надсилає в браузер, а потім відкидає всю інформацію про сторінку. Якщо користувач запитує ту саму сторінку знову, сервер повторює всю послідовність, повторно обробляючи сторінку з нуля. Іншими словами, сервер не має пам'яті сторінок, які він

обробив – сторінки не мають стану. Платформа сторінок ASP.NET автоматично виконує завдання підтримки стану сторінки та її елементів керування, а також надає чіткі способи підтримувати стан інформації про програму [6].

Програма включає функцію, яка реєструє користувачів і зберігає їхні облікові дані, щоб вони могли входити на веб-сайт.

ASP.NET Identity зберігає облікові дані користувачів у базі даних. Коли користувачі входять в систему, програма перевіряє їхні облікові дані, зчитуючи базу даних. Папка облікового запису проєкту містить файли, які реалізують такі функціональні можливості: реєстрація, вхід, зміна пароля та авторизація доступу. Крім того, ASP.NET Web Forms підтримує OAuth і OpenID. Ці покращення автентифікації дозволяють користувачам входити на сайт, використовуючи наявні облікові дані з таких облікових записів, як Facebook, Windows Live і Google [6].

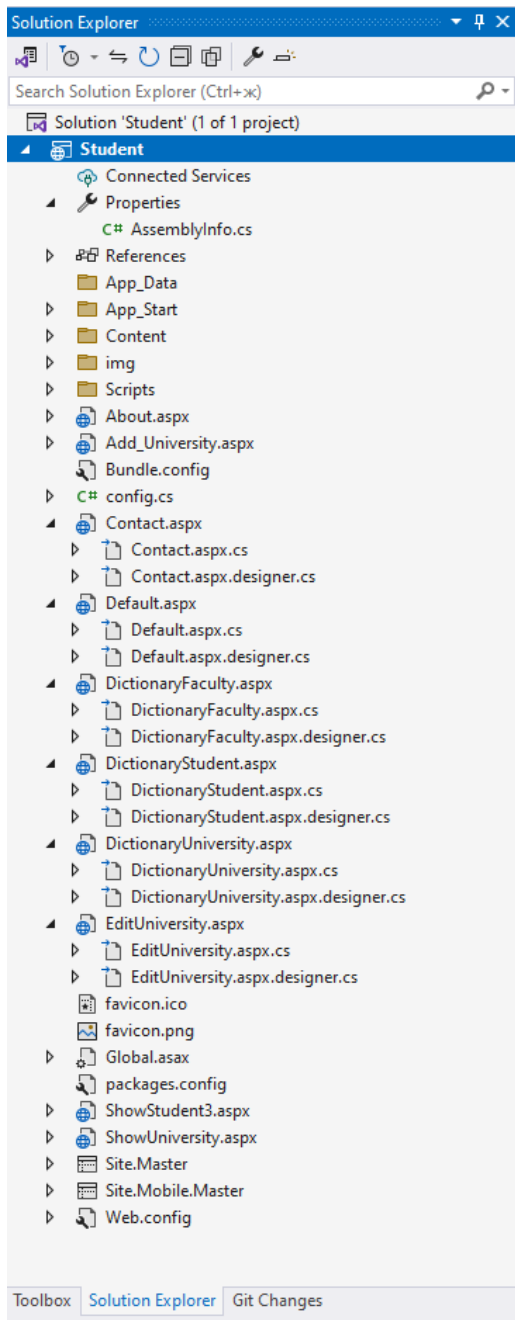


Рис. 4. Структура ПС у середовищі Visual Studio

Головна сторінка Default.aspx визначає узгоджений вигляд і поведінку для всіх сторінок у програмі.

Сторінка Site.Master дозволяє створювати узгоджений макет і використовувати стандартну поведінку для сторінок у програмі.

Global.asax – додатковий файл, який містить код для відповіді на події на рівні програми та сеансу.

Web.config – конфігураційні дані для програми.

Приклади роботи ПС подано на рис. 5–6.

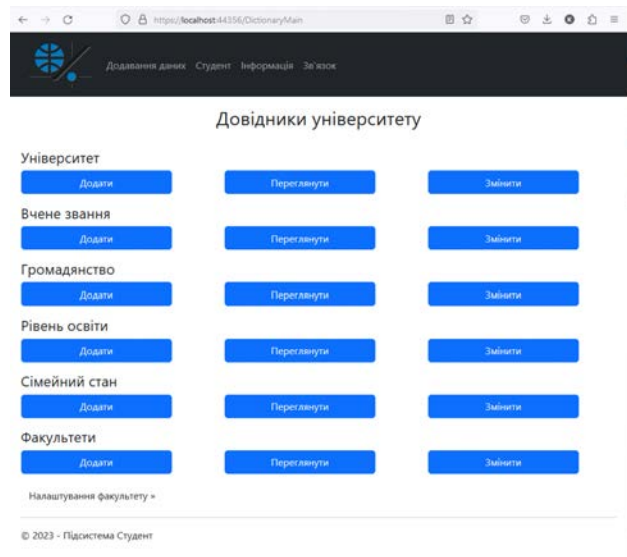


Рис. 5. Довідники університету

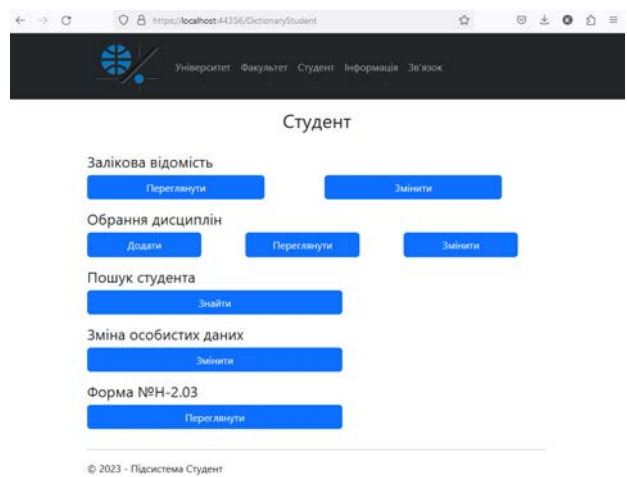


Рис. 6. Підсистема «Студент»

**Висновки.** У роботі описано процес архітектурного проектування ПС. Визначено, що архітектурне проектування дає розуміння правильної організації системи та створює структуру для цієї правильної організації, з'єднує весь етап проектування з детальними вимогами, оскільки архітектура виділяє основні структурні компоненти системи та формує відносини між ними. Розроблено архітектуру ПС на основі патерну MVC. Описано процес розроблення структури модулів ПС. Описано елементи керування на стороні сервера, що були використані при побудові ПС. Розроблено архітектуру проекту у середовищі Visual Studio. Наведено приклади роботи ПС.

**Список літератури:**

1. Кривонос О.М., Коротун О.В. Етапи проектування хмаро орієнтованого середовища навчання баз даних майбутніх учителів інформатики. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2018. № 1(63). С. 130–145.

2. IT-забезпечення діяльності інноваційного університету: досвід українського вишу: монографія/ Васильєв А.В. та ін.; за ред. проф. А.В. Васильєва. Суми: Сумський державний університет, 2016. 173 с.
3. Буйницька О. П. Система педагогічного проєктування інформаційно-освітнього середовища для здійснення підготовки майбутніх соціальних педагогів : монографія. Київ: Київський університет імені Бориса Грінченка, 2021. 568 с.
4. Ye Zi. Construction of Educational Management Software Design Pattern Based on Deep Neural Network. *Procedia Computer Science*. 2022. № 208. С. 176–183.
5. Melillan A., Cravero A., Sepulveda S. Software Development and Tool Support for Curriculum Design: A Systematic Mapping Study. *Appl. Sci*. 2023. № 13(7711). С. 2371–2390.
6. Joel Murach, Mary Delamater. Murach's ASP.NET Core MVC. Mike Murach & Associates, 2020. 780 с.

**Liashenko O.M., Bodiain V.Yu., Kyrychuk D.L., Frolova M.E. DESIGNING A SOFTWARE SYSTEM TO SUPPORT THE PROCESSES OF MANAGEMENT OF EDUCATIONAL ACTIVITIES OF THE UNIVERSITY: SUBSYSTEM “STUDENT”**

*The work carried out the design of a software system to support the processes of management of educational activities of the university: subsystem "Student." The proposed software system provides processing student cards, processing information about student performance, the formation of examination information of students, the formation of orders for the appointment of scholarships and material assistance. The software system allows you to enter, store and analyze information about students throughout the period of their training.*

*The architecture of the software system is based on the architectural pattern Model-View-Controller (MVC). The MVC pattern separates system representation and system interaction from system data. The system is divided into three logical components that interact with each other. The Model component manages system data and data operations. The View component displays data for the user. The Controller component interacts with the user, initiates operations in the model, and controls the operation of the view. MVC pattern allows you to change data regardless of its representation. A data change made in one view is reflected in all other views of the software system.*

*To develop a software system, ASP.NET Web Forms were chosen, based on Microsoft ASP.NET technology, in which code running on a server dynamically generates the output of a web page into a browser or client device. The Web Forms ASP.NET page automatically displays the correct browser-compatible HTML for features such as styles, layout, etc. Web Forms are compatible with any language supported by the .NET common language runtime. To create Web Forms ASP.NET, Visual Studio integrated development environment and C # programming language were used. MySQL Workbench was used to design, model and develop a software system database to support the university's learning management processes.*

**Key words:** *software system, educational activities of the university, ASP.NET Web Forms, C # language.*

**Малюга А.І.**

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС АВТОШКІЛ

Головним викликом для освіти є перманентне підвищення результату навчального процесу та пошук ефективних освітніх технологій. У статті з'ясовано, що віртуальна реальність в цьому контексті є ідеальним рішенням, що сприяє зростанню продуктивності та концептуальному розумінню конкретного діапазону педагогічних завдань. Технології штучного інтелекту в освіті перманентно прогресують, забезпечуючи безпечне і контрольоване середовище для цікавих експериментів, які неможливо проводити в реальному житті. Освітній процес в контексті можливостей віртуальної реальності має безперечні переваги яскравості та автономності. Встановлено, що всебічне вдосконалення досвіду вчителів та студентів, досягнення набагато більших ефектів навчання з меншими зусиллями, технічні переваги штучного інтелекту при моделюванні віртуального простору навчання водінню розкривають прихований потенціал навчального процесу та підвищує його ефективність в соціальному, технологічному та економічному ракурсах.

У статті визначено, що впровадження VR-технологій в навчальний процес автошкіл забезпечують бездоганну фізику для симуляції водіння, коли керування автомобіля, імпульс, тертя шин філігранно відтворюють реальні процеси. Технології віртуальної реальності в навчальному процесі автошкіл пропонують філігранно відтворене контрольоване середовище з високою гнучкістю для освоєння навиків справлятися зі складними та небезпечними сценаріями на дорозі. З'ясовано, що завдяки технологіям віртуальної реальності забезпечується досконале відтворення фізики при стимуляції водіння, коли всі фізичні процеси ідеально його відображають, сприяючи максимальному засвоєнню корисних водійських навичок. У статті досліджено концептуальну базу існуючих сучасних розробок щодо шляхів впровадження технологій віртуальної реальності та програмної інженерії на навчальний процес в автошколах, в тому числі зважаючи на рівні автоматизації транспортних засобів. Виявлено, що за допомогою технологій віртуальної реальності створюються імерсійні симуляції дорожнього руху з вищою безпекою та нижчими витратами, а програмна інженерія дозволяє створювати індивідуальні навчальні плани та імплементувати системи моніторингу біометричних даних водіїв для підвищення ефективності навчання.

**Ключові слова:** VR-технології, штучний інтелект в освіті, програми автошкіл, симуляція водіння, рівні автоматизації, VR-гарнітура, 3D-моделювання, досвід навчання.

**Постановка проблеми.** Автомобілі є одним з найбільш поширених і легкодоступних видів транспорту, що підвищує рівень комфорту та статусності водіїв, однак водіння все ще лишається небезпечним заняттям [33, р. 1232]. Навчання водінню на рівні освоєння майстерності безпечного і комфортного керування транспортним засобом являє собою важливий педагогічний і технологічний процес надання освітніх послуг щодо освоєння учнями знань і технічних навичок водіння, розуміння важливості безпечної поведінки на дорозі.

Цей процес важливий для зменшення ризиків дорожньо-транспортних пригод та аварій, особливо з огляду на сучасну статистику ДТП. Окрім масштабного позитивного соціального ефекту,

технології віртуальної реальності в навчальному процесі автошкіл безцінні з огляду на пом'якшення стресу майбутніх водіїв. Природно, що людина, вперше сідаючи за кермо та стикаючись з щільним міським трафіком, нервує та відчуває невпевненість в собі. Технології віртуальної реальності під час навчання допомагають зробити процес адаптації простішим і менш ризикованим, зменшити фобії ще до потрапляння майбутнього водія в реальний трафік, коли одне невірне прийняте рішення може стати шкідливим для здоров'я водія та оточуючих.

Дослідження дорожньо-транспортних пригод довели, що людська помилка є провокуючим фактором дорожньо-транспортних пригод та нещасних випадків по всьому світу. Віртуальна

реальність (VR) використовувалася для вивчення поведінки за кермом, оскільки вона пропонує альтернативи для оцінки поведінки за кермом з високим ступенем занурення в безпечне і відтворюване середовище [24].

Так, з початку 2021 р. в Україні сталося 29545 аварій, що на 19,5% вище за показник попереднього року, при цьому травмовано 3696 осіб, загинули 415 осіб [4]. За 2022 р. сталося менше аварій – 18628 – проте число загиблих вище і становить 2791 особа, травмованих більше 23 тис. осіб [3]. Основною причиною аварій було порушення правил дорожнього руху, зокрема, перевищення швидкості руху, порушення правил маневрування, проїзду перехресть, пішохідних переходів, недотримання дистанцій тощо (там само).

У той же час сучасні процеси глобалізації та інформаційного прогресу, загострення ринкової конкурентного суперництва компаній актуалізують питання підвищення цифрових компетенцій та кваліфікації людських ресурсів, досягнення високого рівня освіти в контексті цифровізації бізнес-процесів та всіх сфер суспільного життя. Сучасні компанії вимагають від працівників високих освітніх навичок рівня STEM: Science, Technology, Engineering, Mathematics, зокрема, в сфері водійської майстерності, цифрових навичок водіння.

VR-технології у навчанні водінню можуть застосовуватись в форматі гейміфікації, яка має на меті надати студентам знання про водіння та цінні практичні навички до того, як вони почнуть керувати авто в реальному житті. При цьому знання правил цієї гри підвищує обізнаність і відповідальність водія для зменшення ймовірності аварій на дорогах і кількості дорожньо-транспортних пригод. До того ж, системи VR-реальності є перспективною технологією навчання для необхідного оволодіння водіями автоматизованим транспортним засобом та отримання навичок взаємодії з новим обладнанням.

Підкреслюючи значущість VR-технологій під час навчання водійській майстерності, слід зазначити про супутні процеси, які супроводжують процес традиційного навчання водінню: надто довгий час очікування водійських прав, некваліфіковані інструктори (або інструктори, рівень кваліфікації яких відстає від рівня сучасного технологічного прогресу), брак вільного часу, висока вартість тестів та низький відсоток їх проходження. Це посилює актуальність дослідження питань впровадження технологій віртуальної реальності в навчання водінню.

Всі описані вище передумови зумовлюють зростання попиту на розробку інноваційних систем навчання водінню, які будуть сприяти навчанню, зниженню ризиків ДТП, та одночасно підвищувати ефективність бізнес-процесів в транспортно-логістичних та інших компаніях, які потребують висококваліфікованих водіїв.

Отже, одним з високоефективних інноваційних підходів до навчання водійської майстерності наразі є запровадження в освітній процес технологій віртуальної, в тому числі змішаної, реальності. Останні являють собою проривну технологічну новачку, що трансформує способи, методи навчання водійській майстерності, пропонує широкий спектр можливостей, які оптимізують процес отримання знань і навичок та підвищують його результативність. Така новачка дає можливість користувачам взаємодіяти, відчуваючи себе у віртуальному середовищі. Вона поступово витісняє з сучасного життя практику відвідування автошколи або наймання людини-інструктора, що є трудомістким і затратним процесом.

VR-технології дозволяють конструювати імерсійні симуляції дорожнього руху, що точно відображують реальні умови на дорозі. Спеціальні VR-симулятори дозволяють інструкторам та учням навчатись в безпечному віртуальному просторі, де вони можуть освоювати управлінські навички за різних дорожніх ситуацій. Це надає можливість учням навчатись, експериментувати і вдосконалювати свої навички, не ризикуючи потрапити у реальну небезпеку на дорозі [30, р. 225].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Навчання водійській майстерності є надзвичайно важливим етапом якісної підготовки майбутніх фахівців. На думку А. Адхан (A. Adnan), М. Саїд (M. Said), вміння безпечно та впевнено керувати автомобілем є ключовим фактором скорочення числа аварій на дорогах та збереження життя [7, р. 1113]. Західні науковці Б. Джон (B. John), Дж. Куріан (J. Kurian), Р. Фітцджеральд (R. Fitzgerald), Д. Гох (D. Goh) вивчають потенціал технологій змішаної реальності для надання студентам ефективного досвіду навчання, максимально долаючи розрив між цифровим і фізичним світом. Змішана реальність дозволяє студентам бачити своє реальне оточення з накладеними віртуальними функціями для покращення цифрового досвіду [20, р. 510–511].

Аналіз освітнього досвіду та задоволеності навчанням водінню проводить, зокрема, К. Сурвин'я (K. Sukwinya). Науковець ставить за

мету створення навчальних матеріалів на основі технологій віртуальної реальності та вивчення задоволеності вибірки студентів віком від 18 років такими навчальними матеріалами [32, р. 1].

Перевагами впровадження технологій віртуальної реальності в навчальний процес автошкіл є не тільки більш швидка адаптація до реального водіння і зменшення його фобій, а й підвищення рівня безпеки, скорочення витрат, індивідуальний підхід до учнів, можливість спостерігати та оцінювати реакції учнів на різні ситуації. В той же час недоліками впровадження таких технологій в навчання є високі витрати на модернізоване обладнання, потреба в перепідготовці інструкторів, викладачів, технічні проблеми та обмеження системи. Віртуальні технології в комплексі з засобами програмної інженерії посилюють персоналізацію та адаптацію навчального процесу під запити учнів: генеруються індивідуальні навчальні модулі для кожного учня, враховуються вихідний рівень обізнаності. Перспективою ж віртуальних технологій в навчанні має стати подальша інтелектуалізація та адаптація штучного інтелекту під запити і особливості людини [31, р. 96].

Ще одним перспективним напрямом розвитку віртуальних технологій в навчанні водінню має стати більша доступність та зручність, можливість навчатись з будь-якого цифрового пристрою або локації. Сфера застосування віртуальних технологій буде виходити за межі автошкіл на корпоративні автопарки, урядові програми безпеки дорожнього руху, військову підготовку [30, р. 226]. Це підвищить якість водійської підготовки та забезпечить високий рівень безпеки на дорогах, тобто дасть широкий соціальний ефект.

Віртуальна реальність в сучасних роботах розглядається як технологія, що дає можливість навчити людей справлятися зі складними ситуаціями, занурюючи їх у віртуальне середовище. Застосовуючись у багатьох сферах освіти, віртуальна реальність підвищує якість навчання, адже щоб навчання було ефективним, воно має бути адаптоване до можливостей, продуктивності та потреб користувача [35, р. 725].

Додатки віртуальної реальності є інтерактивними та захоплюючими, адже дають ефект телеприсутності, при цьому освіта має скористатись їх можливостями, щоб зробити заняття приємнішими та більш креативними, з елементами нової реальності. Замість пасивного отримання інформації та її передачі учням та студентам, освітні центри, що працюють на основі віртуальної реальності, зможуть вирішувати багато завдань:

навчання через переживання та взаємодію з навколишнім середовищем. Це підвищує мотивацію до навчання, розширює масштаб залучення як студентів, так і викладачів у навчальний процес, а також прискорює його [28, р. 155].

Віртуальна реальність інтегрує тривимірні об'єкти в поєднанні зі слухом і зором для створення ефектів для користувачів, наче вони перебувають у штучно змодельованому середовищі. Користувач під час навчання може спостерігати за об'єктами в кіберпросторі з усіх ракурсів, отже, тривимірна система координат, що використовується в віртуальній реальності, заснована на декартовій системі координат [25, р. 68]. Феномен віртуальної реальності з'явився в області міждисциплінарних досліджень і за останні роки сфера її діяльності зростає завдяки дослідженням та інвестиціям галузі у виробництво різних VR-продуктів. Віртуальна реальність розроблена синтезом технологій, що використовуються для візуалізації та взаємодії з віртуальною атмосферою [9, р. 2].

Професійні симулятори є платформними симуляторами, громіздкими та дорогими для широкого загалу, проте дають ефект занурення в процес водіння, на відміну від традиційних програм тренувань на плоскому екрані. Більш того, віртуальні технології, імітуючи водіння в кіберпросторі, можуть скоротити час навчання через зменшення психологічної напруги і тривожності протягом навчання водінню. VR-технології заповнюють прогалини між платформними та плоскими симуляторами, за рахунок того, що учні мають змогу навчатись в імерсивних, змодельованих небезпечних дорожніх сценаріях [34].

Зокрема, Б. Ланг (B. Lang) досліджуючи питання впливу технологій віртуальної реальності на водійську майстерність, розробляє систему автоматичного синтезу навчальних програм, що покращує шкідливі звички водіння. Завдяки такому підходу спочатку виявляються неправильні звички водія, коли він їде у віртуальному місті, потім синтезується індивідуальна навчальна програма, яка допомагає покращити навички водіння на основі виявлених неправильних звичок користувача [33].

Технології віртуальної реальності в навчальному процесі автошкіл класифікуються за критерієм рівня занурення користувачів. Так, неімерсивні візуалізації – налаштування настільних моніторів, легко та економічно вигідно реалізувати. Напівімерсивна віртуальна реальність досягається за допомогою проєкційних дисплеїв, які забезпечують доповнення реального світу за

допомогою цифрового накладання. На противагу цьому, дисплеї, встановлені на голові, і печерні автоматичні віртуальні середовища, які складаються з проєкції, що відображається на стіни, забезпечують високий рівень занурення [27].

Незважаючи на широкий спектр досліджень процесу застосування VR-технологій для навчання водійської майстерності, досі не сформовано єдиного концептуального підходу до аналізу його переваг та ризиків.

**Метою статті** є розробка концептуального підходу до аналізу напрямів впровадження технологій віртуальної реальності в навчальному процесі автошколи з огляду на зростання його ефективності та рівня безпеки на дорогах. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні дослідницькі завдання: дослідити теоретичні підходи щодо застосування штучного інтелекту, VR-технологій в освітньому процесі, зокрема, в автошколах; проаналізувати сучасний стан навчального процесу в автошколах, нові освітні технології; розкрити сутність існуючих технологій віртуальної реальності, адаптивних до програм автошкіл.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджуючи теоретичні підходи щодо впровадження технологій штучного інтелекту в освітньому процесі, слід сфокусувати увагу навколо найсучасніших і найбільш містких концепцій, в рамках яких доцільно вивчати напрями застосування VR-технологій у навчальному процесі автошкіл. Окремим блоком до концептуальної бази доцільно віднести останню версію системи визначення автоматизації транспортних засобів, яку також потрібно враховувати під час розробки інноваційних навчальних програм [28].

*Аналіз теоретичних підходів до застосування технологій штучного інтелекту в освітньому процесі.*

На думку Л. Чен (L. Chen), П. Чен (P. Chen), З. Лін (Z. Lin), штучний інтелект в освітньому процесі слід розглядати як «кульмінацію комп'ютерів», пов'язану з прогресом машин та інноваційних розробок інформаційно-комунікаційних технологій. Останні дають змогу комп'ютерам виконувати функції, наближені до людських. В освітньому контексті це функції викладання і розробки якісних навчальних програм та функції сприйняття нових знань, споживання освітніх послуг [17].

Концепція штучного інтелекту в освіті С. Акгун (S. Akgun), Х. Грінхау (C. Greenhow) містить чотири елементи: визначення штучного інтелекту через теорії машинного навчання і алго-

ритмів; розкриття процесу застосування штучного інтелекту в освітніх закладах та його переваг для вдосконалення навчальних програм; опис етичних викликів та дилем використання штучного інтелекту в освіті; безпосереднє викладання штучного інтелекту [10, p. 431].

Полісистемну концепцію штучного інтелекту в освіті пропонують і А. Алам (A. Alam), А. Моханті (A. Mohanty). Зокрема, науковці вважають, що концептуально штучний інтелект в освіті складається з таких елементів як інтелектуальні системи навчання, системи персоналізації та адаптації, оцінки, прогнозування та профілювання, що можуть бути застосовані до академічних послуг [12, p. 17]. Технології штучного інтелекту вдосконалюють та модифікують педагогіку і рутинну працю викладачів, посилюючи освітню спрямованість в процесі своєї імплементації в навчальні програми, а також професійній реорганізації, коли штучний інтелект витіснить одні професії, трансформує інші, та створить принципово нові [11, p. 1].

В теоретичних поглядах М. Рохас-Санчеса (M. Rojas-Sánchez), П. Паулоса-Санчеса (P. Palos-Sánchez), Дж. Фолгадо-Фернандеса (J. Folgado-Fernández) сутність застосування штучного інтелекту в освіті полягає у впровадженні інтелектуальних систем навчання, моделювання реальності, автоматизованій оцінці всіх режимів оцифрованих артефактів, які підтримують і покращують освіту. Насправді, штучний інтелект має величезний потенціал для покращення навчання, викладання, оцінювання та управління освітою, пропонуючи студентам більш персоналізоване та адаптивне навчання, сприяючи розумінню вчителями процесу навчання і надаючи запити з машинною підтримкою в будь-якому місці та в будь-який час. Штучний інтелект стимулює еволюцію практик викладання та навчання, а також розробку програм, що є базисом освітніх досліджень [28, p. 155-192].

Інтелектуальні системи моделювання реальності мають продукувати оптимальні стратегії навчання для кожного майбутнього водія, базуючись на динаміці його прогресу в освоєнні водійської майстерності та індивідуальних потреб [31, p. 97]. Такі технології за рахунок мінімізації розриву між віртуальним та реальним просторами, істотно покращують якість викладання та навчальний досвід [20, p. 510].

В автомобільній сфері бурхливий прогрес технологій віртуальної реальності та автоматизованого процесу водіння змушує науку, бізнес та



освіту впроваджувати нові концепції інтерфейсу користувачів транспортних засобів, вдосконалювати навчальний процес в автошколах. Розвиток технологій програмного забезпечення суттєво вдосконалив системи автоматизованого водіння та людино-машинні його інтерфейси, що якісно трансформували модель взаємодії людського й штучного інтелекту та просунули вперед наукові досягнення в транспортних дослідженнях і розробках. У 2021 р. Комітет стандартизації автоматизованих транспортних дорожніх засобів Співки автомобільних інженерів (SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee) опублікувала останню версію визначення автоматизації транспортних засобів (ТЗ) для майбутньої стандартизації та уніфікації технічної термінології [29].

Отже, дослідження шляхів впровадження VR-технологій в навчання водінню має ґрунтуватись на вивченні розвитку автоматизації транспортних засобів від ручного та допоміжного водіння до високо та повністю автоматизованих транспортних засобів, а також вимагає класифікації рівнів автоматизації. Тому Комітет зі стандартів автоматизованих транспортних засобів SAE (2021) запровадив спільну мову для визначення цих рівнів автоматизації (рис. 1).

На нижчих рівнях автоматизації існують проблеми з поінформованістю про ситуацію і безпеку, тоді як на вищих рівнях ці проблеми дола-

ються та виникає нова взаємодія та досвід водіїв. Технології VR-реальності вдосконалюють цей досвід за рахунок безпечного та контрольованого середовища.

*Аналіз сучасного стану навчального процесу в автошколах, нових освітніх технологій.*

Моделі машинного навчання використовують комп'ютери для моделювання процесу навчання людини з метою підвищення продуктивності конкретних завдань на основі знань, виявлених і отриманих з реального світу [6]. Незважаючи на те, що роль штучного інтелекту в суспільстві і, зокрема, освіті, постійно розвивається, система штучного інтелекту, яка приймає критично важливі рішення, повинна поважати етичні норми та відповідати соціальним нормам, щоб отримати визнання [19].

Навчальний процес в сучасних автошколах характеризується активним залученням нових освітніх технологій, зокрема, технологій візуалізації та віртуалізації, що дозволяють моделювати особливий вид простору – сенсорні навчальні простори, з ігровими елементами, популярними серед молоді. Ці технології надають нові можливості для відображення та пояснення змісту навчальних програм [16, р. 93].

Сучасний стан навчального процесу в автошколах визначається цілями її загально-управлінської стратегії зростання якості навчальних

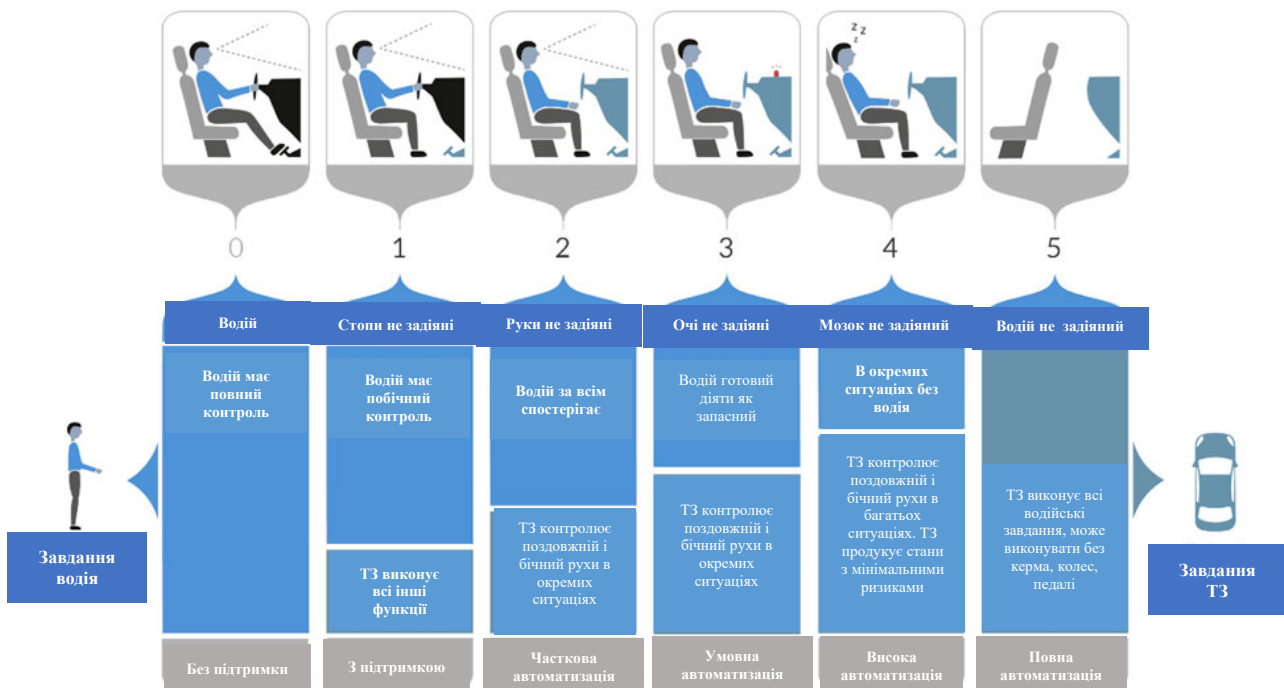


Рис. 1. Рівні автоматизації транспортних засобів

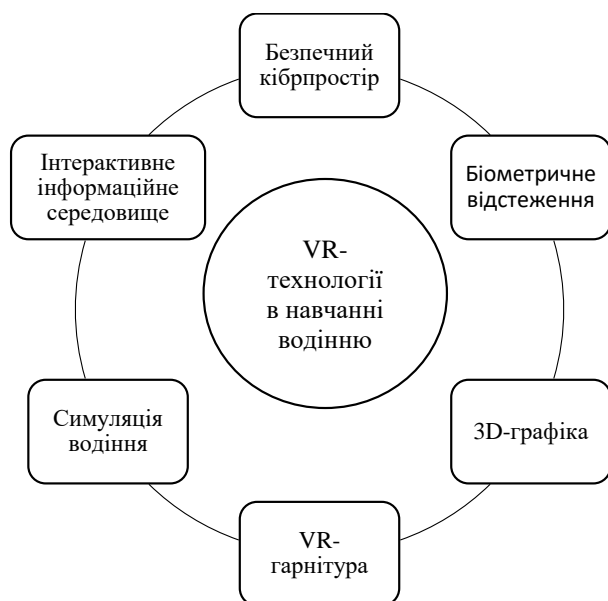
Дж.: [29].

послуг. Якість освітніх послуг є системною та інтегрованою діяльністю академічних підрозділів або навчальних програм підвищення рівня водійської майстерності через освіту [21].

В Україні поступово запроваджується реформа в підготовці водіїв, її наближення до європейських стандартів. Реформа здійснюється через запуск нової системи підготовки майбутніх водіїв та, відповідно, змінюються навчальні програми автошкіл. За новою системою, час та ефективність підготовки майбутніх фахівців оптимізується за рахунок скорочення теоретичних годин, додаванням тем про електромобілі, медичне забезпечення при ДТП, введенням нових умов допуску до практичної частини навчання (лише після складання іспиту з теорії) [1].

Мірою розвитку цифрових технологій у навчальний процес і процес складання іспитів у вітчизняних автошколах вводяться зміни. Це верифікація та доступ до класів при складанні іспитів за допомогою відеокамер, які будуть ідентифікувати обличчя майбутнього водія. Крім того, такими технологіями є face-id-ідентифікація особи, фіксація обличчя та екрану при негативних відповідях на іспиті, унеможливлення віддаленого доступу до робочих місць, контроль за поведінкою особи і відео-фіксація процесу іспиту. Автомобілі будуть оснащені відеореєстратором з чотирма камерами [2].

*Аналіз існуючих технологій віртуальної реальності, адаптивних до програм автошкіл.*



**Рис. 2. Елементи системи VR-технологій в навчанні водінню**

*Дж.: розроблено автором на основі [5; 22].*

Якщо віртуальні технології у навчанні водійській майстерності розуміти як систему взаємопов'язаних елементів, можна стверджувати, що вона складається з наступних елементів (рис. 2): безпечний кіберпростір; інтерактивне інформаційне середовище, що впливає на рівень засвоєння знань майбутнього водія через відповідне програмне забезпечення; 3D-графіка, техніки відображення та зображення, що включають побудову геометричної проекції тривимірної моделі; симуляція водіння через створення кількох віртуальних панорам, які створюють ілюзію присутності в просторі; гарнітура віртуальної реальності [5, с. 42].

Крім того, в такій системі функціонує і елемент біометричного моніторингу, адже технології віртуальної реальності здатні впоратись з біометричною автентифікацією користувачів, відстежуючи їх поведінку під час виконання цілеспрямованих завдань [22, р. 55].

Інноваційні системи на основі гарнітур віртуальної реальності з відстеженням руху очей для розпізнавання розповсюджених водійських помилок нівелюють проблеми відсутності перевірки сліпих зон або неухважності до пішоходів на вулиці (рис. 3). Агреговані дані про рух очей синтезують персоніфікований маршрут тренування, через який учень буде стикатись з подіями та відпрацьовувати свої водійські навички [23].



**Рис. 3. Інноваційна система з VR-гарнітурою для персоніфікованих навчальних програм**

*Дж.: [23].*

Така персоніфікована система водіння через технології віртуальної реальності суттєво покращує ризикові звички водіїв та мінімізує частоту їх повторення, а тренувальний ефект переважає за тривалістю та іншими результатами ефекти традиційних навчальних методик.

Розглядаючи VR-гарнітуру для симуляції процесу водіння, слід зазначити, що вона складається із встановлених інструментів, що використовуються під час навчання водінню або реальних автомобільних розробок. Більшість симуляторів використовують монітори або проектори як основну систему відображення [16, р. 93]. Спектр сучасних VR-гарнітур включає Oculus Rift S, HTC Vive Pro, HTC Vive Cosmos, Valve Index і Samsung HMD Odyssey+ [13, р. 2].

Технології симуляції водіння, що включені в систему VR-технологій, включають технології моделювання руху транспортного засобу відповідно до різних факторів дорожнього середовища, що мають бути враховані під час подорожі (дороги, час, погода, пейзажі, транспортний потік тощо). Для покращення реальності процесу симуляції водіння транспортного засобу під час дослідження змінюється та оновлюється програмне та апаратне забезпечення, зокрема, для підвищення реальності симуляційного середовища та майбутніх розширень системи симуляції водіння. Відповідно, учні можуть створювати власні необхідні ситуації для водіння, щоб покращити свої навички.

Пристроями віртуальних технологій під час навчання можуть бути віртуальні дисплеї, встановлені на голові, кермо-контролер з силовим зворотним зв'язком тощо – головне, що такі технології забезпечують ефект бездоганної фізики для симуляції водіння, коли керування автомобіля, імпульс, тертя шин філігранно відтворюють реальні процеси. Більш того, впровадження VR для симуляції забезпечує більш реалістичну перспективу водіння, аніж застосування екрану монітору. В той же час існують і деякі технічні недоліки, що по мірі технологічного прогресу з часом мають всі перспективи подолатись. Це доволі проста симуляція ландшафту і навколишнього світу, що не враховує присутність людини та перешкоди. Також рульове управління автомобілем для симуляції відрізняється від реального управління, а графічний інтерфейс може бути занадто низьким.

Окрім переваг, що забезпечує сучасна VR-гарнітура, існують і певні загрози з її боку. Вони спричинені порушенням ергономічного балансу системи «людина-техніка» і негативному впливі на фізичне й психічне здоров'я людини, що значно обмежує їх застосування в різних сферах, в тому числі і в освіті [18, р. 99].

Для візуалізації зображення під час навчального процесу можна використовувати цілий спектр технік відображення. Наприклад, це може

бути використання шолома, встановленого на голові, для представлення візуальних підказок водієві, використовуючи оптичний прозорий шолом, шолом з прозорим відео або непрозорий шолом для чистих віртуальних світів. Також це може бути використання лобового скла як проекційної зони, або як оптичного суматора для досягнення оптичної прозорості, розміщення відеокамер вперед і відтворення доповненого зображення на екранах, встановлених перед лобовим склом [14, р. 229].

Під час навчання водінню за допомогою VR-технологій студенти можуть ознайомитись з такими темами, як геометричне моделювання, рендеринг, виявлення зіткнень, анімація моделей та графічний дизайн. Конструювання прикладної системи надає студентам доступ до реальної сторони програмної інженерії, що неможливо забезпечити під час традиційного навчання.

Проектування та конструювання процесу водіння на основі віртуальної реальності корисне для освоєння студентами не тільки водійських навичок як таких, а й при плануванні сценаріїв водіння, просторовому моделюванні дорожніх ситуацій. Тобто віртуальна реальність дає можливість виходу за межі суто академічних знань і механічних навиків. Вона сприяє навчанню майстерності водіння, розвиває водійську інтуїцію та віртуозність.

Аналізуючи сучасний стан навчального процесу в автошколах в контексті запровадження нових освітніх технологій, слід зазначити, що автошколи постійно вдосконалюють навчальний досвід і покращують безпеку дорожнього руху, просуваючи навички водіння на новий технологічний рівень. Це відбувається завдяки отриманню автошколами можливості впроваджувати в навчальний процес новітніх підходів: персоналізоване навчання, реалістичні симуляції, імерсивні сценарії, надання безризикового простору набуття й відпрацювання навичок, більш гнучкий навчальний графік. Крім того, інтеграція VR в навчальні програми автошкіл суттєво збільшить часову і економічну ефективність навчального процесу в довгостроковій перспективі, зменшуючи потребу в багаторазових заняттях і мінімізуючи знос транспортного засобу.

Закуповуючи програмне забезпечення віртуальної реальності у технологічно розвинутих компаній, автошколи пропонують учням реалістичні сценарії водіння й динаміку транспортного засобу, ситуаційну обізнаність, тренінги з ідентифікації небезпек, навички захисного водіння,

приймання швидких рішень в небезпечних ситуаціях. Все це значно поглибить водійські навички учнів, підносячи їх на рівень майстерності, і покращить статистику ДТП.

**Висновки.** Впровадження інноваційних технологій віртуальної реальності має безліч переваг, дозволяючи майбутнім водіям поглибити сприйняття фізичних та технічних процесів, розширити їх когнітивне мислення щодо феномену водійського хисту. VR-технології надають можливості конструювати програми віртуальної реальності, мотивують майбутніх водіїв, допомагаючи зменшити складність предмету та краще і швидше освоїти його. Це в кінцевому підсумку зменшить ризики дорожніх пригод та зробить процес водіння безпечним для всіх його учасників.

Сучасні технології програмної інженерії активно включаються в навчальні програми для розширення освітніх можливостей та покращення навчання водійській майстерності, а також розширення меж сприйняття майбутніми водіями VR-технологій та можливостей автоматизації транспортних засобів, намірів водіїв використовувати їх під час реального водіння.

У статті досліджено сучасні інноваційні практики в навчанні водійській майстерності за допомогою VR-технологій та сформовано концептуальний підхід до аналізу шляхів їх застосування в освітньому процесі. Виявлено, що сучасні технології віртуальної реальності суттєво вдосконалюють процес навчання за рахунок підвищення безпеки, зменшення витрат, персонального підходу, більшої креативності процесу, занурення у віртуальний простір. В той же час імплементація віртуальних технологій в навчання в автошколах неминуче пов'язане з відносно високими затратами на придбання нового обладнання та програмного забезпечення, недостатньою відповідністю кваліфікації викладачів викликам цифровізації, технічні труднощі, порушення ергономічного балансу.

Навчальні програми, засновані на VR-технологіях, вийдуть за межі лише автошкіл та будуть застосовуватись в корпоративних автопарках, програмах безпеки дорожнього руху, військовій підготовці тощо. Перспективами дослідження є дослідження методів і моделей інтеграції VR-технологій в навчання водінню, аналіз впливу технологій віртуальної реальності на соціальну та економічну ефективність діяльності автошкіл.

#### Список літератури:

1. Про внесення змін до Типової навчальної програми підготовки та перепідготовки водіїв транспортних засобів: Постанова Кабінету Міністрів України від 06 жовтня 2021р. №1045. URL: [www.kmu.gov.ua/npas/pro-vnesennya-zmin-do-tipovoyi-navchalnoyi-programi-pidgotovki-ta-perepidgotovki-vodiyiv-transportnih-zasobiv-i061021-1045](http://www.kmu.gov.ua/npas/pro-vnesennya-zmin-do-tipovoyi-navchalnoyi-programi-pidgotovki-ta-perepidgotovki-vodiyiv-transportnih-zasobiv-i061021-1045) (дата звернення 18.01.2024).
2. Головний Сервісний центр МВС презентував автошколам нові плани видачі посвідчення водія. 2022. URL: [www.hsc.gov.ua/2022/12/23/golovnij-servisnij-tsentr-mvs-prezentuvav-avtoshkolam-novi-plani-vidachi-posvidchennya-vodiya/](http://www.hsc.gov.ua/2022/12/23/golovnij-servisnij-tsentr-mvs-prezentuvav-avtoshkolam-novi-plani-vidachi-posvidchennya-vodiya/) (дата звернення 18.01.2024).
3. Дюдюк Ю. Смертельні ДТП в Україні. Статистика за 2021. 2021. URL: [www.autocentre.ua/ua/avtopravo/dtp/smertelnye-dtp-v-ukraine-statistika-za-2021-god-1338429.html](http://www.autocentre.ua/ua/avtopravo/dtp/smertelnye-dtp-v-ukraine-statistika-za-2021-god-1338429.html) (дата звернення 08.01.2024).
4. Гаращенко Р. Статистика позитивна. У поліції прозвітували про кількість ДТП у 2022 році. 2023. URL: [www.rbc.ua/rus/news/statistika-e-rozitivnoyu-politsiyi-prozvituvati-1676036106.html](http://www.rbc.ua/rus/news/statistika-e-rozitivnoyu-politsiyi-prozvituvati-1676036106.html) (дата звернення: 08.01.2024).
5. Тимчина В. Нові перспективи освітнього процесу: віртуальна та доповнена реальність. *Нова педагогічна думка*. 2020. № 1 (101). С. 42–46.
6. Abou Elasad, Zouhair Elamrani, et al. The application of machine learning techniques for driving behavior analysis: A conceptual framework and a systematic literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 87: 103312.
7. Adnan, A., & Said, M.N.H. The Future of Driver Training and Education: An Overview of Virtual Reality Applications and Prospects. *Procedia Computer Science*. 2021. 180, 1113–1121.
8. Agbo, F.J., Sanusi, I.T., Oyelere, S.S., & Suhonen, J. Application of Virtual Reality in Computer Science Education: A Systemic Review Based on Bibliometric and Content Analysis Methods. 2021. № 21, 120–142.
9. Ahir, K., Govani, K., Gajera, R., & Shah, M. Application on virtual reality for enhanced education learning, military training and sports. *Augmented Human Research*. 2020. 5, 1–9.
10. Akgun, Selin; Greenhow, Christine. Artificial intelligence in education: Addressing ethical challenges in K-12 settings. *AI and Ethics*, 2022, 2.3: 431–440.
11. Alam, Ashraf. Possibilities and apprehensions in the landscape of artificial intelligence in education. In: *2021 International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA)*. IEEE, 2021. p. 1–8.

12. Alam, Ashraf; Mohanty, Atasi. Foundation for the future of higher education or ‘misplaced optimism’? Being human in the age of artificial intelligence. In: *International Conference on Innovations in Intelligent Computing and Communications*. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 17–29.
13. Angelov, Vladislav, et al. Modern virtual reality headsets. In: *2020 International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*. IEEE, 2020. p. 1–5.
14. Blissing, B., Bruzelius, F., & Eriksson, O. Driver behavior in mixed and virtual reality—a comparative study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. 2019. 61, 229–237.
15. Blissing, Björn; Bruzelius, Fredrik; Eriksson, Olle. The effects on driving behavior when using a head-mounted display in a dynamic driving simulator. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*. 2022, 19.1: 1–18.
16. Burbules, Nicholas C.; FAN, Guorui; REPP, Philip. Five trends of education and technology in a sustainable future. *Geography and Sustainability*, 2020, 1.2: 93–97.
17. Chen, Lijia; Chen, Pingping; Lin, Zhijian. Artificial intelligence in education: A review. *Ieee Access*, 2020, 8: 75264-75278.
18. Chen, Yumiao; WANG, Xin; XU, Huijia. Human factors/ergonomics evaluation for virtual reality headsets: a review. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 2021, 3.2: 99–111
19. Gupta, Abhishek, et al. Deep learning for object detection and scene perception in self-driving cars: Survey, challenges, and open issues. *Array*, 2021, 10: 100057.
20. John, B., Kurian, J. C., Fitzgerald, R., & Goh, D. H. L. Students’ Learning Experience in a Mixed Reality Environment: Drivers and Barriers. *Communications of the Association for Information Systems*. 2022. 50(1), 510–535.
21. Kaso, Nurdin. Principal's leadership: how to improve the quality of teaching and learning process in state junior high school of luwu, *Jurnal administrare*, 2021.
22. Kupin, A., Moeller, B., Jiang, Y., Banerjee, N. K., & Banerjee, S. Task-driven biometric authentication of users in virtual reality (VR) environments. In *MultiMedia Modeling: 25th International Conference, MMM 2019, Thessaloniki, Greece, January 8–11, 2019, Proceedings, Part I 25* (pp. 55–67). Springer International Publishing.
23. Lang, B. Facebook Ceo: Quest 2 ‘on Track to Be First Mainstream Vr Headset’, Next Headset Confirmed. Road to VR. 2021. Available at: <https://www.roadtovr.com/zuckerberg-quest-2-mainstream-vr-headset-facebook-q4-2020-earnings/>
24. Maghelal, P. K., Lara, J. C. F., Goonetilleke, R. S., & Luximon, A. Determinants of self-efficacy of driving behavior among young adults in the UAE: Impact of gender, culture, and varying environmental conditions in a simulated environment. *Heliyon*. 2023. 9(3).
26. Melinda, V., & Widjaja, A. E. Virtual Reality Applications in Education. *International Transactions on Education Technology*. 2022. 1(1), 68-72.
27. Riegler, A., Riener, A., & Holzmann, C. A systematic review of virtual reality applications for automated driving: 2009–2020. *Frontiers in human dynamics*. 2021. № 3, 689856.
28. Rojas-Sánchez, M. A., Palos-Sánchez, P. R., & Folgado-Fernández, J. A. Systematic literature review and bibliometric analysis on virtual reality and education. *Education and Information Technologies*. 2023. 28(1), 155–192.
29. SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee. Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Dataset. 2021.
30. Smith, A.B., & Reif, K. Virtual Reality in Driver Education: A Review of Research and Current Developments. *Journal of Safety Research*. 2019. № 71, 225–237.
31. Sujatha, R., & Uma, G. Use of Virtual Reality in Driver Training: A Review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2020. 10(2), 96-101.
32. Sukwinya, K. A Production of Virtual Reality Technology Learning Materials: Driving for Preparator of Practical Driving License Test. *Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)*. 2021. № 30(1), 1–17.
33. Tivesten, E. T. Victor, Gustavsson, P. J. Johansson Out-of-the-loop crash prediction: the automation expectation mismatch (AEM) algorithm. *IET Intell Transp Syst*. 2019. №13, pp. 1231–1240
34. Xie, B., Liu, H., Alghofaili, R., Zhang, Y., Jiang, Y., Lobo, F. D., ... & Yu, L. F. A review on virtual reality skill training applications. *Frontiers in Virtual Reality*. 2021. № 2, 645–153.
35. Zahabi, M., & Abdul Razak, A. M. Adaptive virtual reality-based training: a systematic literature review and framework. *Virtual Reality*. 2020. № 24, 725–752.

**Maliuha A.I. RESEARCH CONCEPTUAL PRINCIPLES VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF DRIVING SCHOOLS**

*The main challenge for education is the permanent improvement of the result of the educational process and the search for effective educational technologies. The article found that virtual reality in this context is an ideal solution that contributes to the growth of productivity and conceptual understanding of a specific range of pedagogical tasks. The educational process in the context of the possibilities of virtual reality has indisputable advantages of brightness and autonomy. It's established that comprehensive improvement of the experience of teachers and students, achieving much greater learning effects with less effort, technical advantages of artificial intelligence in modeling the virtual space of driving training - all this reveals the hidden potential of the educational process and increases its effectiveness in social, technological and economic perspectives.*

*The introduction of VR technologies into the educational process of driving schools provides flawless physics for driving simulation, when car controllability, momentum, tire friction filigree reproduces real processes*

*Virtual reality technologies in the educational process of driving schools offer a meticulously reproduced controlled environment with high flexibility for mastering the skills to cope with complex and dangerous scenarios on the road. Thanks to virtual reality technologies, a perfect reproduction of physics is provided when stimulating driving, when all physical processes perfectly reflect it, promoting the maximum acquisition of useful driving skills. The article examines the conceptual basis of existing modern developments regarding the ways of introducing virtual reality technologies and software engineering into the educational process in driving schools, including taking into account the level of automation of vehicles. Virtual reality technologies have been found to create immersive traffic simulations with higher safety and lower costs, and software engineering allows for the creation of individual training plans and the implementation of driver biometric data monitoring systems to improve training effectiveness.*

**Key words:** *VR-technologies, artificial intelligence in education, driving school programs, driving simulation, levels of automation, VR-headset, 3D modeling, learning experience.*

**Маріяни Ю.І.**

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

**Степанець О.В.**

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

## КОМБІНОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

*Стаття направлена на розробку комбінованої системи автоматичного керування параметрами дуттьового режиму киснево-конвертерного процесу. В умовах інтенсифікації, максимізації рентабельності та забезпечення технологічної безпеки виробництва виникає проблема налаштування, оптимізації, удосконалення структури систем автоматичного регулювання. Поряд з тим, що з'являються та набувають популярності передові методи управління, як-то модельно-прогнозуюче керування, нечітка логіка, штучний інтелект, найпопулярнішими на сьогодні, з долею до 90 %, є регулятори, що використовують ПІД закон регулювання. Найпоширенішим принципом побудови систем автоматичного регулювання на сьогоднішній день є керування по відхиленню на основі ПІД закону регулювання. Метою дослідження є синтез комбінованої системи керування параметрами дуттьового режиму, що дозволить мінімізувати вплив збурення (інтенсивності дуття кисню) на підтримання заданого вмісту  $CO_2$  у конвертерних газах. Було розроблено комбіновану систему автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу і виконано її аналіз. Виконано розрахунок налаштування ПІД-регуляторів системи автоматичного регулювання інтенсивності дуття та ступеня окиснення вуглецю до  $CO_2$ . Встановлено, що система керування зміни інтенсивності дуття є збуренням для системи керування вмісту  $CO_2$  у конвертерних газах. Проаналізовано вплив залежності зміни інтенсивності дуття кисню на зміну ступеня окиснення вуглецю до  $CO_2$ , що описується диференціальним рівнянням. У результаті аналізу здійснено синтез комбінованої системи регулювання з реально-диференціальним компенсатором. Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з використанням комбінованої системи автоматичного регулювання забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 9075 та вмісту  $CO_2$  у конвертерних газах – 1397; максимальне динамічне відхилення вмісту  $CO_2$  у конвертерних газах склало 17,5%. Реалізована комбінована система керування параметрами дуттьового режиму мінімізує вплив збурення (інтенсивності дуття кисню) на підтримання заданого вмісту  $CO_2$  у конвертерних газах.*

**Ключові слова:** комбіноване керування, зворотний зв'язок, компенсатор, ПІД-регулятор, алгоритм керування.

**Постановка проблеми.** В умовах інтенсифікації, максимізації рентабельності та забезпечення технологічної безпеки виробництва виникає проблема налаштування, оптимізації, удосконалення структури систем автоматичного регулювання. Поряд з тим, що з'являються та набувають популярності передові методи управління, як-то модельно-прогнозуюче керування (МПК), нечітка логіка (НЛ), на діючих виробництвах превалюють, з долею до 90 % [1] є регулятори, що використовують ПІД закон регулювання. Незважаючи на довгу історію розвитку та наявність великої кількості патентів, розробок, публікацій [2], залишається багато проблем пов'язаних із практичною реалізацією ПІД-регулятора. Основні проблеми –

уніфікація структури ПІД-регулятора, реалізація диференційної складової [3], протидія інтегральному насиченню, безударна передача параметрів та режимів регулювання [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ПІД-регулятори як найпоширеніший вид автоматичних регуляторів мають значну кількість варіацій [5] та досліджень властивостей [4, 6]. Як правило, вони стосуються окремих питань і розглядаються в синтетичному ідеалізованому оточенні. Це справедливо за виконання ряду умов, як-от лінійність об'єкта керування, незначне відхилення технологічної змінної від робочої точки, ідеальний виконавчий механізм тощо. Існує велика кількість різновидів структур ПІД-регулятора [7].

Таке різноманіття пов'язано із складністю практичної реалізації та бажання розробників приховати структуру і принципи роботи регуляторів [7]. Навіть найпоширеніших форм запису ПД-закону регулювання існує три [8].

Послідовний [1], або класичний, алгоритм (1) – найстаріша загальноприйнята реалізація, що використовується з часів перших пневматичних та електричних апаратних регуляторів як наслідок технічних можливостей апаратного формування складових закону регулювання.

$$W_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s), \quad (1)$$

де  $W_c(s)$  – передаточна функція закону регулювання у просторі Лапласа,  $s$  – комплексна змінна перетворення Лапласа,  $K_p$  – коефіцієнт підсилення,  $T_i$  – стала часу інтегрування,  $T_d$  – стала часу диференціювання. Паралельна форма запису (2) ПД-закону регулювання, незважаючи на видиму очевидність структури, не рекомендується до застосування деякими дослідниками [9] через наявність коефіцієнта підсилення регулятора, який розбито на 3 складові частини:

$$W_c(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s. \quad (2)$$

Міжнародна організація International Society of Automation (ISA), що є світовим лідером в розробці стандартів в галузі автоматизації, рекомендує [3] як стандарт структури ПД-регулятора використовувати форму (3), у якій чітко виражений коефіцієнт підсилення:

$$W_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (3)$$

Різні форми закони регулювання можуть бути приведені одна до іншої за допомогою математичних формул та ряду припущень, які дозволяють перераховувати значення коефіцієнтів. У часткових випадках пропорційна, інтегральна та диференційна складові можуть бути відсутні, утворюючи окремі випадки ПД-закону регулювання: пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ), пропорційно-диференційний (ПД), інтегральний (І) регулятор.

Дуже часто, згадуючи про практичне застосування регуляторів, обмежуються констатацією фактів наявності кількох варіантів або способів реалізації практичних функцій. Акцентується увага на конкретне рішення, без порівняння з існуючими методами. Під час практичної реалізації ПД-регуляторів не завжди використовують фільтри сигналів або вони налаштовані некоректно. Диференційна складова регулятора

підсилює високочастотні завади, короткотривалі збурення і шум. Ці проблеми посилюються тим, що динаміка процесів невідома априорі, існує взаємний вплив різних систем автоматичного керування через об'єкт. Фільтрація шумів та впливу диференційної складової регулятора є предметом інтересу багатьох дослідників [10], що пропонують власні підходи та критерії вирішення цієї проблеми, але однозначної рекомендації досі немає. Фільтрування інформаційних сигналів дозволяє підвищити достовірність інформації, однак, через перераховані вище фактори, не завжди є можливим та вносить у систему додаткову інерційність.

Під час процесу регулювання практично завжди потрібно врахувати нелінійності типу «обмеження». Ця нелінійність пов'язана з природними обмеженнями на потужність, швидкість, частоту обертання, відкриття клапана та ін. Найбільш типовим проявом режиму обмеження є так зване «інтегральне насичення». Методи усунення інтегрального насичення є предметом дискусій, публікацій, винаходів та комерційної таємниці багатьох фірм розробників програмного забезпечення контролерів [4]. На сьогоднішній день не існує єдиної методики, яка б дозволяла повністю усунути проблему інтегрального насичення [1, 4]. У роботі [11] розглядаються способи врахування обмежень типу «насичення» в системах керування, але не дано остаточної рекомендації по використанню. Інколи, залежно від вимог до поведінки об'єкта, подібний підхід може навіть розвинутися у складні структури з власними регуляторами обмежень. Це вже унікальні випадки, малоприматні до масового застосування.

Під час автоматичного керування технологічними процесами виникають ситуації зміни режиму роботи обладнання, структури системи і потреб виробництва. Це призводить до потреби відслідковування режимів роботи та безударного перемикавання [1, 4]. Різні рекомендації авторів ускладнюють процес вибору потрібної конфігурації для практичного застосування.

Для цифрової реалізації ПД-регулятора, яка в еру комп'ютерних технологій є пануючою, має значення також коректний вибір періоду дискретизації розрахунку алгоритму. У роботі [12] представлено результати досліджень впливу цього фактору на поведінку системи керування та відмінності в значеннях параметрів налаштувань. Разом з тим, через високу швидкість виконання сучасного програмного забезпечення, цей фактор має більше значення на вибір числових методів реалізації інтегрування та диференціювання, ніж



на динаміку об'єкта керування. Коректне налаштування автоматичних регуляторів для забезпечення вимог технологічних процесів є однією з ключових процедур пуско-налагоджувальних робіт [13]. Її результат прямо впливає на якість продукції, що випускається, чи на протікання процесів. Основний парк автоматичних регуляторів – близько 90% [1] – реалізують пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання у різних варіаціях. При цьому 30% з них налаштовані неправильно [14]. Так, у багатьох ПІД-контролерах диференціальна складова відключена тільки тому, що їй важко правильно налаштувати. Це пов'язано з недостатньо глибокими знаннями динаміки процесу регулювання та теорії автоматичного керування персоналом, що здійснює пусконалагоджувальні роботи. Результат – некоректні параметри налаштування, що призводить до зниження ефективності управління технологічними процесами та коефіцієнту корисності дії (ККД) установки в цілому. Тому значні зусилля дослідників в даний час концентруються на пошуку способів мінімізації впливу людського фактору в процесі налаштування регуляторів – алгоритмів автоматичного пошуку оптимальних параметрів регулятора [14].

Переважає більшість способів автоматичного налаштування проходять три принципово важливі етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора, введення значень отриманих параметрів у регулятор. У роботах [4] наведено методи автоналаштування, в основі алгоритму яких лежить аналітична модель, отримана з перехідної характеристики об'єкта управління. Використання аналітичних моделей потребує прийняття ряду припущень, наприклад, об'єкт описується моделлю першого або другого порядку, не враховується нелінійність об'єкта, зокрема, завжди присутня нелінійність типу «обмеження», затримка в системі є транспортною, відсутність похибок диференціювання. Внаслідок прийнятих припущень з'являється похибка ідентифікації, а тому налаштування регулятора не можна вважати оптимальними. Автоналаштування параметрів регулятора реалізовано у ПІД-контролерах фірми Honeywell UDC6000 [5]. Іншим способом виконання ідентифікації є отримання частотної характеристики об'єкта з використанням релейного експерименту. Цей метод ідентифікації є найбільш розповсюдженим для автоналаштування ПІД-регулятора [1], в його основі лежить режим автоколивань у системі. Переваги такого методу ідентифікації – отримання частотних

характеристик об'єкта будь-якого порядку та простота реалізації. Існують ствердження, що застосування режиму автоколивань є небезпечними для технологічних процесів і їх потрібно уникати. Під час проведення експериментів потрібно обмежити амплітуду автоколивань, тоді даний режим є настільки ж безпечним, як і будь-який інший тестовий сигнал. Також існує велика кількість комерційних програмних засобів налаштування регуляторів [2]. Типова система для налаштування ПІД-регулятора складається з комп'ютера зі спеціалізованим, як правило коштовним, програмним забезпеченням під керуванням операційної системи Windows, комплекту модулів вводу-виводу і сполучних кабелів. Об'єкт включається в контур регулювання, система налаштовується бажаним способом, потім отримані коефіцієнти регулятора записуються в ПІД-контролер.

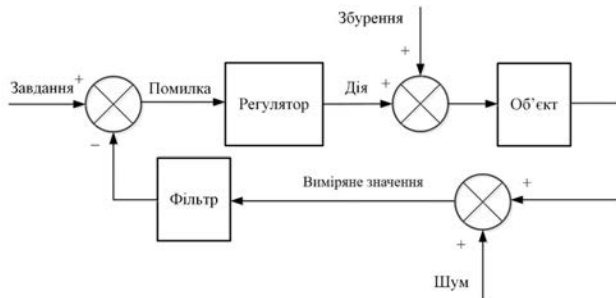
Спеціалісти-практики без ентузіазму сприймають нові підходи до керування, так як вони вимагають набуття нових компетенцій та часто бувають непрозорі для інтуїтивного сприйняття, що ускладнює прийняття оперативних рішень під час пусконалагоджувальних робіт. Відносно новий підхід з використанням внутрішньої моделі об'єкта безпосередньо у структурі регулятора, який набуває поширення через доступність реалізації моделі заданої складності на сучасних ПЛК, також не може стати заміною ПІД-регуляторів. За наявності значного транспортного запізнювання відпрацювання збурень може бути неефективним та потребує ще більшого ускладнення структури регулятора [15]. Тобто він вимагає індивідуального підходу до кожного об'єкта через необхідність точного визначення моделі, у той час як ПІД узагальнює динаміку класу об'єктів за допомогою параметрів налаштувань.

Математичний ПІД-регулятор є теоретичним «ідеалом» реального регулятора, тому для його практичної реалізації необхідно врахувати особливості, викликані реальними умовами технологічного процесу: кінцевий діапазон зміни фізичних параметрів в системі; обмежена точність вимірів та наявність шумів; змінне навантаження, безперервність технологічних процесів; взаємний вплив процесів регулювання; наявність практично у всіх системах нелінійностей типу насичення, обмеження швидкості, гістерезис і люфт; необхідність плавного (безударного) перемикавання режимів регулювання та багато іншого впливає на практичну реалізацію систем керування [4].

**Метою роботи** є реалізація комбінованої системи керування параметрами дуттьового режиму,

що дозволить мінімізувати вплив збурення (інтенсивності дуття кисню) на підтримання заданого вмісту CO<sub>2</sub> у конвертерних газах.

**Виклад основного матеріалу.** Найпоширенішим принципом побудови систем автоматичного регулювання на сьогоднішній день є принцип керування по відхиленню (рис. 1) на базі ПІД закону регулювання.



**Рис. 1.** Структурна схема системи автоматичного регулювання зі зворотнім зв'язком при наявності зовнішніх збурень та шумів

Для досліджень було обрано стандартну структуру ПІД-регулятора, згідно рекомендацій ISA [1]. Якість регулювання у процесі практичної реалізації ПІД-регулятора оцінюється за допомогою (4) інтегрального квадратичного показника (Integral of the square error – ISE):

$$ISE = \int_0^{t_p} e(t)^2 dt. \quad (4)$$

Якість процесу регулювання при використанні ISE визначається квадратичним розбалансом у часі. Налаштування на даний показник якості дозволяє досягнути мінімального часу регулювання, оскільки значне відхилення від завдання регулюючої змінної піднесене до квадрату. Тому ISE є показовим критерієм та використовується у багатьох методах налаштування регуляторів. Для розрахунку параметрів налаштування ПІД-регуляторів системи керування було обрано експрес метод Minimum ISE Zhuang and Atherton [5]. Виконаємо розрахунок ПІД-регулятора (5) процесу зміни ступеня окиснення вуглецю до CO<sub>2</sub> від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни *H* :

$$K_p = \frac{1,048}{K_m} \left( \frac{T_m}{\tau_m} \right)^{0,897} = \frac{1,048}{12,15} \left( \frac{5,6}{1,9} \right)^{0,897} = 0,227 \left[ \frac{M}{\%CO_2} \right],$$

$$T_i = \frac{T_m}{1,195 - 0,368 \frac{\tau_m}{T_m}} = \frac{5,6}{1,195 - 0,368 \frac{1,9}{5,6}} = 5,23 [c], \quad (5)$$

$$T_d = 0,489 \cdot T_m \left( \frac{\tau_m}{T_m} \right)^{0,888} = 0,489 \cdot 5,6 \left( \frac{1,9}{5,6} \right)^{0,888} = 1,05 [c].$$

Виконаємо розрахунок ПІД регулятора (6) процесу інтенсивності дуття кисню кисневого в залежності від положення пневмоклапану:

$$K_p = \frac{1,048}{K_m} \left( \frac{T_m}{\tau_m} \right)^{0,897} = \frac{1,048}{6} \left( \frac{1,2}{0,1} \right)^{0,897} = 1,62 \left[ \frac{\%}{M^2/X\theta} \right],$$

$$T_i = \frac{T_m}{1,195 - 0,368 \frac{\tau_m}{T_m}} = \frac{1,2}{1,195 - 0,368 \frac{0,1}{1,2}} = 1,03 [c], \quad (6)$$

$$T_d = 0,489 \cdot T_m \left( \frac{\tau_m}{T_m} \right)^{0,888} = 0,489 \cdot 1,2 \left( \frac{0,1}{1,2} \right)^{0,888} = 0,065 [c].$$

Система керування зміни інтенсивності дуття є збуренням для системи керування вмісту CO<sub>2</sub>. Отримані динамічні властивості (7) реально-диференційного (РД) компенсатора:

$$W_{РД}^K(s) = K_k \frac{T_k s}{T_k s + 1} = 0,35 \frac{8,9 s}{8,9 s + 1}. \quad (7)$$

У результаті розрахунків регуляторів (5, 6) та РД компенсатора отримано комбіновану систему автоматичного регулювання (рис. 2) режиму дуття киснево-конвертерного процесу. Процедура імітаційного моделювання комбінованої САР параметрами дуття ККП (рис. 2) виконувалась у середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (variable-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,001.

Модель комбінованої системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу наведена на рис. 3.

Виконаємо моделювання перехідних характеристик для описаних вище систем автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу. Розглянемо перехідну характеристику системи регулювання інтенсивністю дуття кисневого конвертера (рис. 4). Отримані показники якості системи наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

**Показники якості САР витрати кисню**

| Показники якості                   | Завдання – вихід |
|------------------------------------|------------------|
| Статична похибка                   | 0                |
| Динамічна похибка                  | 0,025            |
| Час регулювання, с                 | 4,35             |
| Показник затухання                 | 1                |
| Перерегулювання, %                 | 2,5              |
| Integral of the square error (ISE) | 0,085            |

Для системи регулювання вмісту CO<sub>2</sub> під час продувки киснево-конвертерного процесу розглядається задача програмного керування та стабілізації при виникненні збурень: зміни витрати кисню на продувку, зміна швидкості зневуглецювання, введення сипучих та ін. Перехідні характеристики по каналу завдання-вихід (при моделюванні витрата кисню не змінювалась) та збурення-вихід (вплив зміни завдання збоку

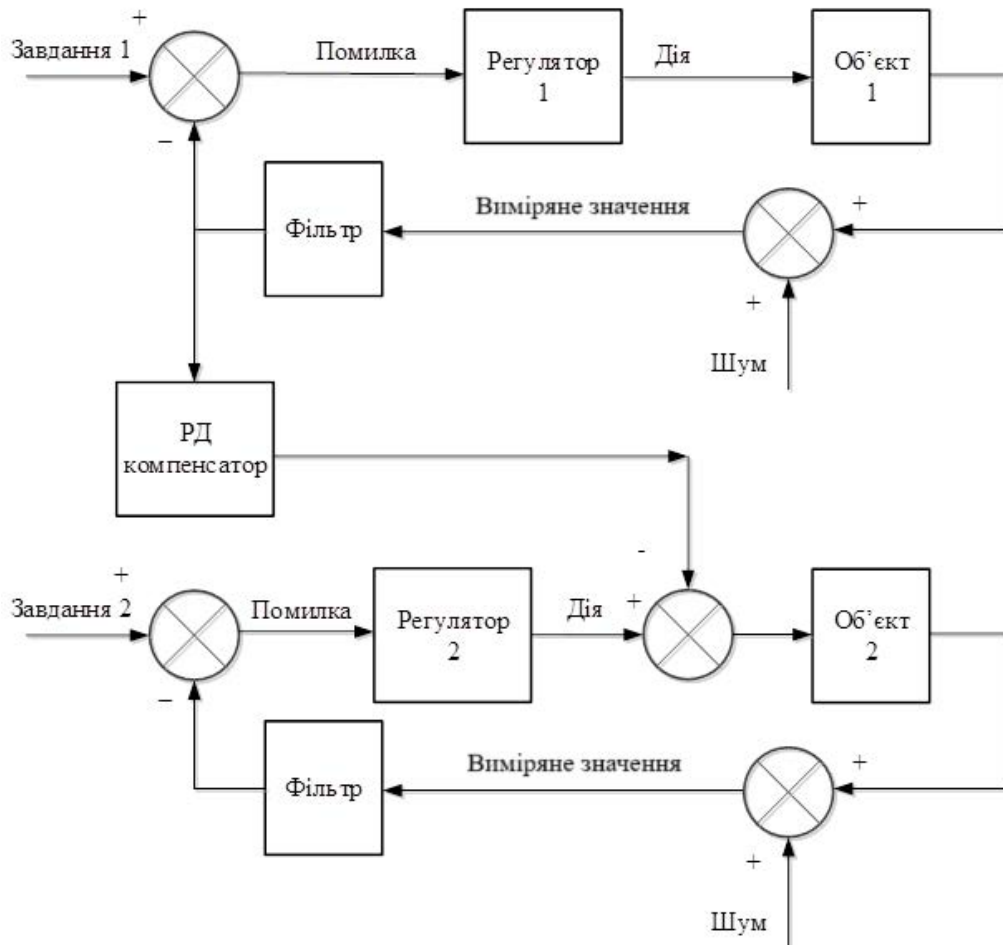


Рис. 2. Структурна схема комбінованої системи автоматичного регулювання

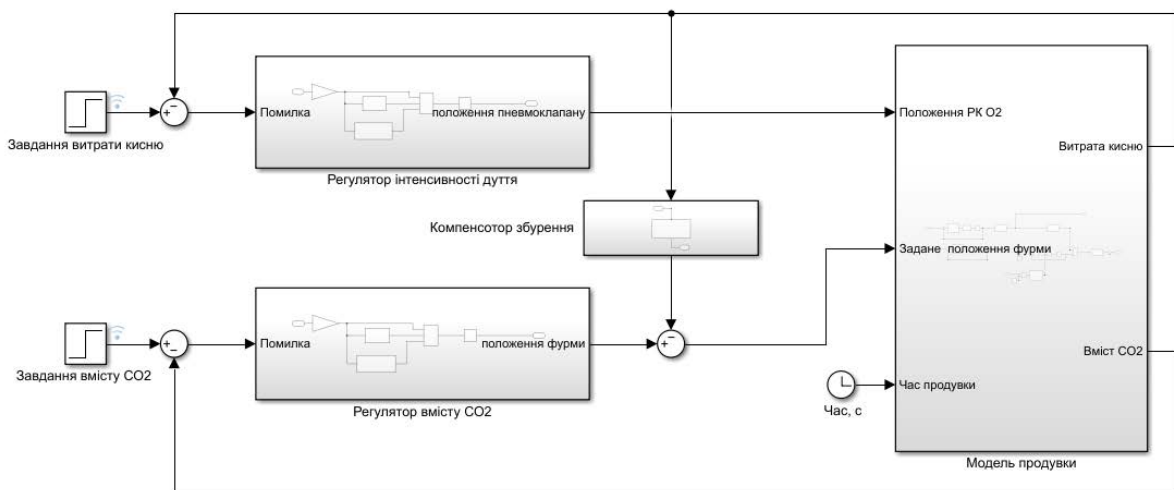


Рис. 3. Модель комбінованої системи регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу

системи регулювання витрати кисню) наведені на рис. 5 та 6 відповідно. Отримані показники якості системи наведені у таблиці 2.

Виконаємо моделювання перехідних процесів (рис. 7) режиму дуття тривалістю 20 хв для 160-тон-

ного конвертера з комбінованою системою автоматичного регулювання вмісту  $\text{CO}_2$  у димових газах та витрати кисню для задачі програмного керування.

Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-

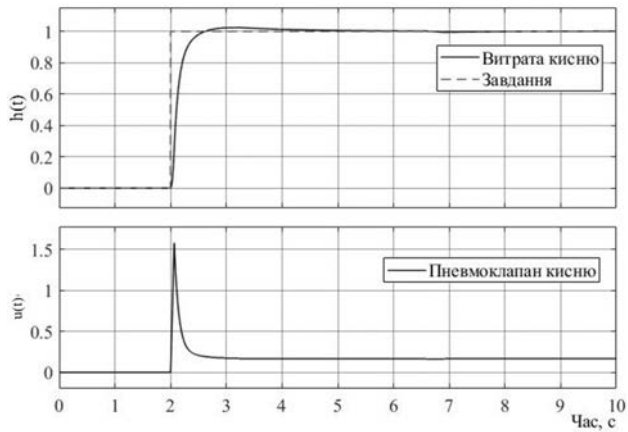


Рис. 4. Перехідний процес системи регулювання продукції киснем по каналу положення клапану подачі кисню-витрата кисню

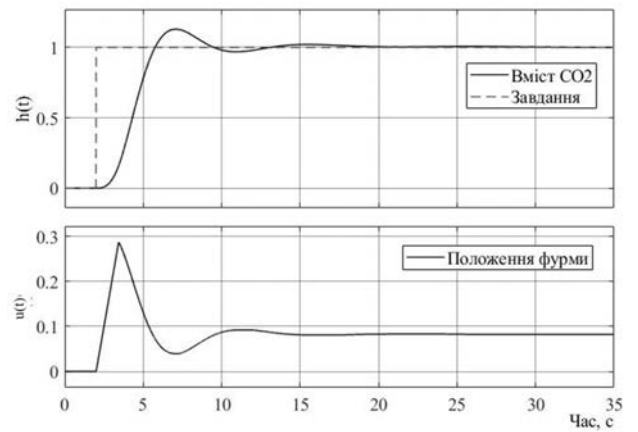


Рис. 5. Перехідний процес системи регулювання по каналу положення фурми-вміст CO<sub>2</sub> у димових газах

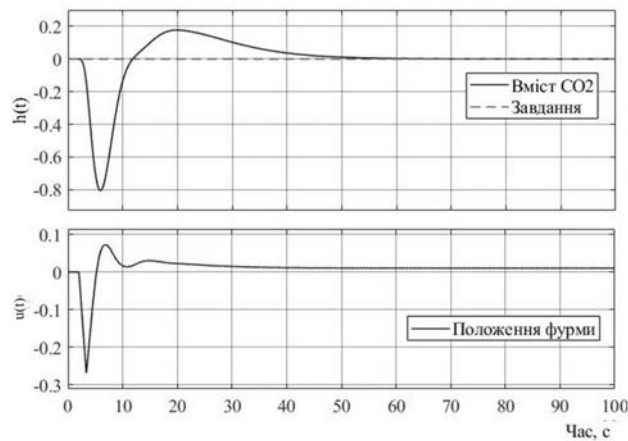


Рис. 6. Перехідний процес комбінованої системи регулювання з РД-компенсатором по каналу зміна завдання системи керування витрати кисню – вміст CO<sub>2</sub> у димових газах

Таблиця 2

Показники якості САР вмісту CO<sub>2</sub>

| Показники якості                   | Завдання – вихід | Збурення – вихід |
|------------------------------------|------------------|------------------|
| Статична похибка                   | 0                | 0                |
| Динамічна похибка                  | 0,13             | -0,805           |
| Час регулювання, с                 | 18,4             | 51               |
| Показник затухання                 | 0,84             | 1                |
| Перерегулювання, %                 | 13               | 25               |
| Integral of the square error (ISE) | 1,87             | 2,5              |

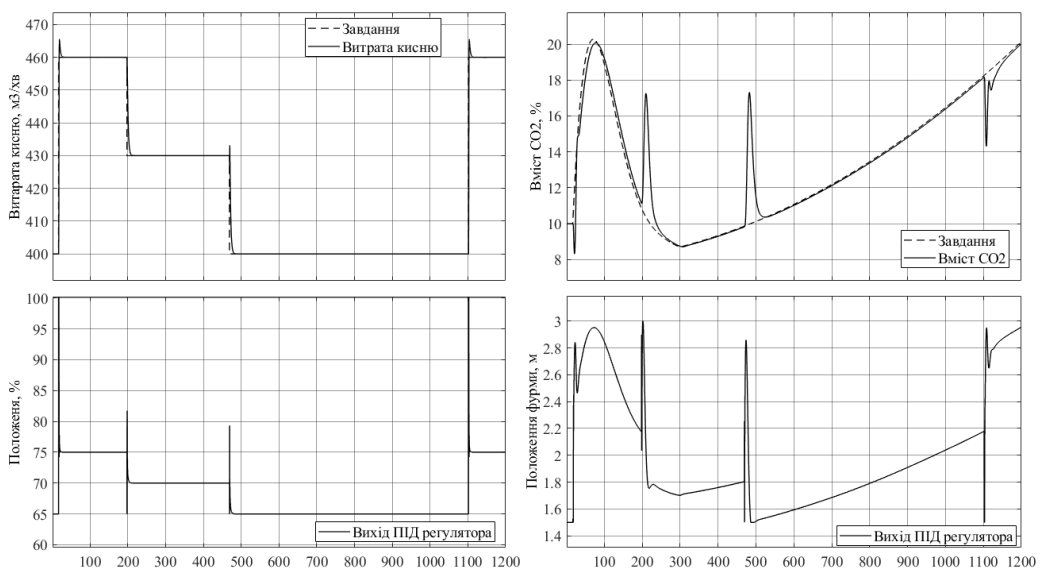


Рис. 7. Перехідні процеси комбінованої системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки

конвертерної плавки з використанням комбінованої системи автоматичного регулювання забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 9075 та вмісту CO<sub>2</sub> у конвертерних газах – 1397; максимальне динамічне відхилення вмісту CO<sub>2</sub> у конвертерних газах склало 17,5%.

**Висновки.** Було розроблено комбіновану систему автоматичного регулювання режиму дугтя киснево-конвертерного процесу і виконано її аналіз. Виконано розрахунок налаштування ПД-регуляторів системи автоматичного регулювання інтенсивності дугтя та ступеня окиснення вуглецю до CO<sub>2</sub>. Вста-

новлено, що система керування зміни інтенсивності дугтя є збуренням для системи керування вмісту CO<sub>2</sub> у конвертерних газах. Проаналізовано вплив залежності зміни інтенсивності дугтя кисню на зміну ступеня окиснення вуглецю до CO<sub>2</sub>, що описується диференціальним рівнянням. В результаті аналізу виконано синтез комбінованої системи регулювання з реально-диференціальним компенсатором. Реалізована комбінована система керування параметрами дугтьового режиму мінімізує вплив збурення (інтенсивності дугтя кисню) на підтримання заданого вмісту CO<sub>2</sub> у конвертерних газах.

#### Список літератури:

1. A multi-layer architecture for distributed data acquisition / M. Bertocco et al. IMTC/2002. 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Anchorage, AK, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/imtc.2002.1007138>
2. Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y. Patents, software, and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. 2006. Vol. 26, Issue 1. P. 42–54. URL: <https://doi.org/10.1109/mcs.2006.1580153>
3. Blevins T. Nixon M. Control Loop Foundation: batch and continuous processes. International Society of Automation, 2011. 406 p.
4. Åström K. J., Hägglund's T. Advanced PID control. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 406 p.
5. Controller Architecture. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 2009. P. 4–17. URL: [https://doi.org/10.1142/9781848162433\\_0002](https://doi.org/10.1142/9781848162433_0002).
6. Interactive tool for analysis of time-delay systems with dead-time compensators / J. L. Guzmán et al. Control Engineering Practice. 2008. Vol. 16, no. 7. P. 824–835. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.09.002>.
7. Process Dynamics and Control / Seborg D. E. et al.. 4th ed. Wiley, 2017. 515 p.
8. Comparison Study of Different Structures of PID Controllers / A. S. Abd El-Hamid et al. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2015. Vol. 11, no. 6. P. 645–652. URL: <https://doi.org/10.19026/rjaset.11.2026>
9. Smuts F. J. Process Control for Practitioners USA: OptiControls, 2011. 315 p. URL: <http://www.opticontrols.com/pcfp-book>
10. Segovia V. R., Hägglund T., Åström K. J. Measurement noise filtering for common PID tuning rules. Control Engineering Practice. 2014. Vol. 32. P. 43–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.07.005>
11. Hägglund T. A unified discussion on signal filtering in PID control. Control Engineering Practice. 2013. Vol. 21, no. 8. P. 994–1006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.03.012>
12. Kovrigo Y. M., Fomenko B. V., Bunke A. S. Achieving more efficient control of boilers by taking technological constraints into account. Thermal Engineering. 2012. Vol. 59, no. 2. P. 147–153. URL: <https://doi.org/10.1134/s0040601512020097>
13. Laskawski M., Wcislik M. Sampling Rate Impact on the Tuning of PID Controller Parameters. International Journal of Electronics and Telecommunications. 2016. Vol. 62, no. 1. P. 43–48. URL: <https://doi.org/10.1515/eletel-2016-0005>
14. Степанець О. В., Маріяш Ю.І. Автоналаштування ПД-регулятора на мінімум інтегрального зваженого в часі модульного критерію якості роботи. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Т. 29(68). № 1. С. 31–36.
15. Stepanets O. V., Movchan A. P. Control of boiler heat load based on assessment of object model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2011. Vol. 4, Issue 8 (52). P. 42–45. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1463/1361>.

#### **Mariash Yu.I., Stepanets O.V. COMBINED FEEDFORWARD AND FEEDBACK CONTROL OF PARAMETERS OF THE BLOWING MODE OF THE BASIC OXYGEN FURNANCE**

*The article is aimed at developing a combined system for automatic control of the blast mode parameters of the basic oxygen furnace process. In the context of intensification, maximization of profitability and ensuring technological safety of production, the problem of setting up, optimizing and improving the structure of automatic*

*control systems arises. Along with the emergence and popularity of advanced control methods, such as model predictive control and fuzzy logic, the most popular today, with a share of up to 90%, are controllers that use PID control laws. The most common principle of building automatic control systems today is the principle of deviation control based on the PID control law. The aim of the study is to implement a combined control system for the blast mode parameters, which will minimize the impact of the disturbance (oxygen blowing intensity) on maintaining the specified CO<sub>2</sub> content in the converter gases. A combined system for automatic control of the blast mode of the oxygen-converter process was developed and analyzed. The tuning of the PID controllers of the system for automatic control of the blowing intensity and the degree of carbon oxidation to CO<sub>2</sub> was calculated. It is established that the control system for changing the blowing intensity is a perturbation for the control system for the CO<sub>2</sub> content in the BOF gases. The influence of the dependence of the change in the intensity of oxygen blowing on the change in the degree of carbon oxidation to CO<sub>2</sub>, which is described by the differential equation, is analyzed. As a result of the analysis, a synthesis of a combined control system with a real-differential compensator was performed. The obtained transient processes of the automatic control system for the oxygen-converter smelting blowing mode using the combined automatic control system provided ISE for the oxygen flow rate contour of 9075 and the CO<sub>2</sub> content in the converted gases of 1397; the maximum dynamic deviation of the CO<sub>2</sub> content in the converted gases was 17.5%. The implemented combined control system of the blast mode parameters minimizes the impact of the disturbance (oxygen blowing intensity) on maintaining the specified CO<sub>2</sub> content in the BOF gases.*

**Key words:** *combined control, feedback, feedforward, PID-controller, control algorithm.*

**Марчук Д.К.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ РОЗТАШУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА АВТОСТОЯНКАХ ДЛЯ РОЗРОБКИ МОЖЛИВИХ НЕЧІТКИХ ПРАВИЛ

З огляду на зростання чисельності автомобільного транспорту та заторів на дорогах, розумне паркування завжди є стратегічним питанням. На сьогодні системи управління паркуванням, які можуть відстежувати вільні місця, стали необхідними практично для всіх міст і мегаполісів. Такі системи дозволяють користувачам легко та швидко знаходити вільні місця та орієнтуватися в їхньому розташуванні. Але системи паркування, що знаходяться на ринку мають як переваги, так і недоліки. Одним із недоліків є потреба в особливому розташуванні камер. Дослідження акцентує увагу на проблемі, яка виникає внаслідок розташування відеокамер, що знаходяться на, або поблизу місць паркування. З огляду на це не завжди зручно визначати зайнято чи вільно паркувальне місце; транспортні засоби можуть перекривати як вільні так і зайняті паркувальні місця; бути припарковані не правильно або займати два і більше місць для паркування. Метою даного дослідження є створення бази правил для моделі нечіткого логічного висновку, яка буде використана у комп'ютеризованій системі пошуку вільного паркувального міста. Через те що багато факторів впливають на зображення, яке надходить з відеокамер було досліджено розташування транспортних засобів на місцях для паркування на парковці по вулиці Героїв небесної сотні у місті Житомир. В роботі проведено аналіз геометричних параметрів транспортних засобів, що розташовані на місцях для паркування. Для відображення площин транспортного засобу та паркувального місця було використано алгоритм триангуляції багатокутника. Для дослідження були зроблені розрахунки площин паркувального місця та транспортних засобів, що знаходяться на цих місцях. Розглянуто п'ять місць для паркування на двох з них знаходяться транспортні засоби. Визначено критерії, за якими можна оцінити доступність місця для паркування. Проведено аналіз зображення на визначення зайнятості паркувального міста. За допомогою програмного забезпечення визначено відсоток вільного або зайнятого місця. На основі отриманих даних було створено базу правил, яка буде використана в алгоритмі знаходження вільного паркувального місця.

**Ключові слова:** нечітка логіка, база правил, модель, триангуляція, геометричні властивості, паркувальне місце, транспортний засіб.

**Постановка проблеми.** Розташування камер на міських парковках не завжди зручно для визначення зайнятості паркувального місця. Транспортні засоби можуть перекривати вільні паркувальні місця, бути припарковані не правильно або займати два і більше місць для паркування. Якщо розглядати кадр з відеопотоку, як 2D зображення, незрозуміло як розташовано транспортний засіб на паркувальному місті. Тому для вирішення проблеми використовують нейронні мережі або нечітку логіку, а поєднання цих двох технологій може бути використано для створення більш надійних і гнучких комп'ютеризованих систем. Основними перевагами нечітких нейронних мереж є можливість працювати з невизначеними, неточними, неповними, неоднозначними даними. Нечіткі нейронні мережі використовують базу нечітких правил. Для створення бази правил потрібно:

- Провести аналіз геометричних параметрів транспортних засобів.
- Провести аналіз зображення на визначення зайнятості паркувального міста.
- На основі отриманих даних створити базу правил.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема паркування стала глобальною для багатьох великих міст по всьому світу. Попит на паркувальні місця зростає швидше, ніж їх пропозиція, що створює серйозні труднощі. Вже було запропоновано безліч рішень для вирішення цієї проблеми.

У дослідженні [1] пропонується рішення проблеми паркування на основі нечіткої логіки. Це рішення рекомендує клієнту найкраще місце для паркування, обробляючи кількість вільних паркувальних місць у різних місцях міста, відстань від клієнта до місця паркування та відповідну

інформацію про дорожній рух. Вхідними даними для розробленої системи є кількість вільних паркувальних місць, відстань і час. Вихідними даними для системи є кількість вільних місць, відстань між користувачем та передбачуваний час доступу до парковки. Таким чином, представлено інтелектуальне рішення проблеми паркування та доступності паркувальних місць.

У статті [2] використовуються чотири лінгвістичні вхідні дані, такі як одиниця паркування автомобіля, відстань, кількість сигналів світлофора та площа парковки, щоб отримати один вихід – час. Цей контролер нечіткої логіки буде корисним для водіїв, щоб знайти найкоротший шлях серед інших шляхів за найменший проміжок часу. Крім того, можна вирішити проблему пошуку відповідного місця для паркування.

У статті [3] пропонується сервіс пошуку паркувального місця на основі даних про місцезнаходження транспортного засобу. Він допомагає знайти найкраще паркувальне місце на залізничному вокзалі для паркування автомобіля на основі поточного місцезнаходження, запланованого часу відправлення, наявності вільних місць та найкоротшого часу в дорозі. Прототип системи спроектований і розроблений для реалізації моделі нечіткого логічного прогнозування з використанням Android SDK 4.0 і Google API 16.

У статті [4] представлено математичне моделювання системи паркування автомобілів на основі нечіткої логіки. Розумна система паркування допомагає отримати інформацію про вільні місця на парковці. Метод використовує нечітку систему розумного паркування автомобілів для невеликих парковок.

Модель, що описана у роботі [5] враховує такі фактори, як відстань, час у дорозі, наявність місць для паркування та вподобання користувача, використовуючи дані, оброблені через Google Maps API та Open-CV. Нечітка логіка використовується в моделі для роботи з неточними концепціями, забезпечуючи адаптивність. Оцінки продуктивності показали вражаючу точність у 92%, що підтверджує його життєздатність для реального впровадження. Це дослідження значно покращує розумні рішення для паркування, демонструючи перспективи скорочення часу пошуку паркувального місця, зменшення заторів і підвищення ефективності паркування.

Застосування штучного інтелекту в транспортній сфері спрямоване на подолання різних проблем. Приклади методів, які знаходять свій шлях до сфери транспорту, включають штучні нейронні

мережі, еволюційні алгоритми, нечітку логіку. У документі [6] представлено огляд методів штучного інтелекту, які застосовуються для вирішення транспортних проблем, головним чином у сфері управління дорожнім рухом, безпеки руху, громадського транспорту та міської мобільності.

Стаття [7] містить новий концептуальний внесок, який детально обговорює маловивчений зв'язок штучного інтелекту, транспорту та розумного міста та те, як це вплине на майбутнє міст.

Розробка ефективної моделі штучного інтелекту є складним завданням через динамічний характер і варіації проблем і даних реального світу. У статті [8] представлено комплексний погляд на «моделювання на основі штучного інтелекту» з принципами та можливостями потенційних методів штучного інтелекту, які можуть відігравати важливу роль у розробці інтелектуальних і розумних систем у різних сферах реального застосування, включаючи бізнес, фінанси, охорону здоров'я, сільське господарство, розумні міста тощо.

У статті [9] описано застосування глибокої нейронної мережі для вирішення проблеми розпізнавання автомобілів і вільних місць для паркування, отриманому з відео потоку. Автори статті довели, що використання згорткових нейронних мереж є основною з переваг. У програмному додатку дослідникам вдалося отримати оптимальний баланс між продуктивністю та точністю за рахунок правильного підбору налаштувань мережі. Авторами роботи [10] запропоновано програмну реалізацію з використанням методів штучного інтелекту для пошуку вільного місця на парковці.

Злиття штучних нейронних мереж і систем нечіткого логічного висновку викликають зростаючий інтерес дослідників у різних наукових та інженерних сферах через зростаючу потребу в адаптивних інтелектуальних системах для вирішення проблем реального світу. Обчислювальна структура, заснована на концепції теорії нечітких множин, нечітких правил «якщо-тоді» та нечіткого міркування [11].

В роботі [12] досліджено принципову структуру інтелектуальної системи та алгоритми поєднання систем комп'ютерного зору та нечіткої логіки. Введено оптимальний критерій на основі навчальної множини, необхідний для налаштування значень нечіткої системи. Наведено реальні дані, які можуть погіршити якість зображення та зменшити ефективність розпізнавання, а також реакцію запропонованої інтелектуальної системи.



Можна зробити висновки, що теоретичні аспекти проблеми паркування тісно пов'язані з нейронними мережами та нечіткою логікою.

**Метою даного дослідження** є розробка правил для моделі нечіткого логічного висновку, яка допоможе виявити вільні місця для паркування та впровадження її в комп'ютеризовану систему пошуку вільних паркувальних місць, що дозволить ефективно інформувати користувачів про наявність вільних паркувальних місць.

**Виклад основного матеріалу.** Модель нечіткого логічного висновку (рис. 1) складається з чотирьох блоків: блоку фазифікації; блоку логічного висновку; блоку дефазифікації; блоку нечітких правил.

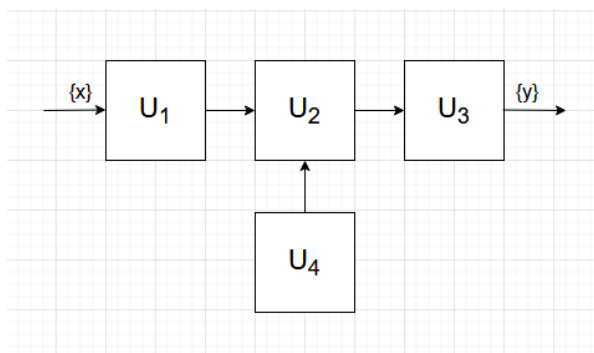


Рис. 1. Модель нечіткого логічного висновку

На рисунку 1 зображено блок фазифікації ( $U_1$ ), де проходить перетворення вхідних чітких даних у нечіткі; блок нечіткого логічного висновку ( $U_2$ ); блок дефазифікації ( $U_3$ ), де проходить нечітких даних у чіткі; блок нечітких правил ( $U_4$ ), де знаходяться інформація у вигляді правил виду «якщо – то»;  $x$  – вхідні дані (чіткі);  $y$  – висновок по правилам.

Для створення моделі нечіткого логічного висновку потрібно створити базу правил, для якої необхідно визначити основні характеристики, що будуть задіяні в рішенні поставленої задачі. Основною характеристикою, що впливає на результат є паркувальне місце. Головним чинником є відсоток зайнятості паркувального місця, другим, то як транспортні засоби займають паркувальне місце.

Для побудови бази правил необхідно провести дослідження розташування транспортних засобів на місцях для паркування. Для дослідження використаємо відеокадри зображень автостоянки, що розташована у місті Житомир на вулиці Героїв небесної сотні і має розмітку для паркування. У дослідженні буде розглянуто п'ять паркувальних місць, два з яких зайняті транспортними засобами.

Характеристика паркувального місця: мінімальний розмір паркувального місця повинен

становити 13,25 кв. м. (ширина повинна становити 2,5 м., довжина – 5,3 м., розміри паркувального місця для інвалідів мають більші розміри ширина – 3,6 м., довжина – 6,2 м.), але багато забудовників для підвищення зручності збільшують площу паркувальних місць до 15 кв. м.

У дослідженні використаємо геометричні параметри транспортних засобів, що знаходяться на парковці. Геометричні властивості об'єктів, що знаходяться на визначеному паркувальному місті будемо знаходити з використанням алгоритму для побудови триангуляції на плоскому наборі з  $N$  точок. Триангуляція в широкому сенсі полягає в розбитті геометричного об'єкта на симплекси. На площині це розбиття на трикутники, що можна побачити на рисунку 2.



Рис. 2. Етапи триангуляції для знаходження відсотку зайнятості паркувального місця транспортним засобом

В дослідженні важливо отримання візуального відображення і результатів підрахунку відсотків, що займає транспортний засіб і відсотків зайнятості паркувального місця (табл. 1). Результати були отримані за допомогою розробленого програмного забезпечення






Для створення правил проведемо аналіз ситуацій, що можуть виникнути на парковці в розрізі відсотку зайнятого місця транспортним засобом (табл. 1).

На першому місті для паркування знаходиться великий транспортний засіб. Транспортний засіб не повністю займає територію паркувального місця. Програмні розрахунки показали, що місце для паркування зайнято на 51.99613%. Можна зробити висновки, якщо паркувальне місце зайнято майже на 52 відсотки, то більше ніхто не зможе припаркуватися на це місто.

Друге паркувальне місце перекриває транспортний засіб, який знаходиться на першому паркувальному місці майже на 66.44849%. Можна зробити висновок, що друге паркувальне місце може бути зайнято. Розташування і кут нахилу камери змінити не можна.

Третє і четверте паркувальне місце треба розглядати разом, тому що транспортний засіб припарковано не правильно і він займає два місця для паркування. За результатами підрахунків другий транспортний засіб займає 21.64109% третього паркувального

Візуальне відображення розрахунків зайнятості паркувального місця

| Місце для паркування | Візуальне відображення розрахунків                                                  | Результати                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                    |    | Parking area: 1.091458<br>Car area: 3.40178<br>Intersection area: 0.5675159<br><br>Parking occupation: 51.99613%<br>Car occupation: 16.68291%                                                                                                                                                                                                                 |
| 2                    |    | Parking area: 0.8980738<br>Car: 3.40178<br>Intersection area: 0.5967565<br><br>Parking occupation: 66.44849%<br>Car occupation: 17.54248%                                                                                                                                                                                                                     |
| 3                    |   | Parking area: 0.9084731<br>Car1 area: 3.40178<br>Intersection car1 & parking area: = 0.1211344<br><br>Parking occupation: 13.33385%<br>Car1 occupation: 3.560913%<br><br>Car2 area: 2.08932<br>Intersection car2 & parking area: = 0.4521516<br><br>Parking occupation: 49.77049%<br>Car2 occupation: 21.64109%<br><br>All cars parking occupation: 63.10434% |
| 4                    |  | Parking area: 0.6454452<br>Car area: 2.08932<br>Intersection area: 0.5709473<br><br>Parking occupation: 88.45791%<br>Car occupation: 27.32695%                                                                                                                                                                                                                |
| 5                    |  | Parking area: 0.4803072<br>Car area: 2.08932<br>Intersection area: 0.1817422<br><br>Parking occupation: 37.83875%<br>Car occupation: 8.698631%                                                                                                                                                                                                                |

місця. Але якщо розглянути друге і третє паркувальне місце можна зробити висновок, що між цими транспортними засобами можна виділити одне паркувальне місце. Четверте паркувальне місце зайнято на 88.45791%, тому четверте паркувальне місце вважаємо зайнятим.

П'яте паркувальне місце вільно на 37.83875%, тому вважаємо його зайнятим.

Підсумовуючи результати дослідження розташування транспортних засобів на парковці представимо варіанти різних ситуацій, що потребують логічного висновку. У Таблиці 2 представлені варіанти відсотку зайнятості паркувального місця транспортними засобами. Для висновку використано логіколінгвістичного множини даних {місце сильно вільне, місце слабко вільне, місце сильно зайняте, тощо}.

Таблиця 2

**Зайнятість місця для паркування транспортними засобами для різних випадків**

|           | % зайнятості паркувального місця транспортними засобами | Висновок             |
|-----------|---------------------------------------------------------|----------------------|
| Випадок 1 | 0-10                                                    | місце сильно вільне  |
| Випадок 2 | 10-25                                                   | місце слабко вільне  |
| Випадок 3 | 25-50                                                   | місце слабко зайняте |
| Випадок 4 | 50-75                                                   | місце сильно зайняте |
| Випадок 5 | 75-100                                                  | місце зайняте        |

У таблиці 3 наведені варіанти, коли паркувальне місце займає декілька транспортних засобів.

Таблиця 3

**Відсоток транспортного засобу на місці паркування**

|           | % 1-го ТЗ | % 2-го ТЗ | Висновок             |
|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| Випадок 1 | 0-10      | 0-10      | місце сильно вільне  |
| Випадок 2 | 10-25     | 0-10      | місце слабко вільне  |
| Випадок 3 | <50       | 0-10      | місце слабко зайняте |
| Випадок 4 | >50       | 0-10      | місце сильно зайняте |
| Випадок 5 | >75       | *         | місце зайняте        |
| Випадок 6 | 10-25     | 10-25     | місце слабко зайняте |
| Випадок 7 | 25-50     | 10-25     | місце сильно зайняте |
| Випадок 8 | 25-50     | 25-50     | місце зайняте        |
| Випадок 9 | 50+       | 10+       | місце зайняте        |

Для виведення результату в нечітких системах використовуються нечіткі правила. В результаті проведеного аналізу було виведено основну систему правил для поточної задачі з системою нечіткого логічного висновку типу Такагі-Сугено:

**Список літератури:**

1. Tuncer, T. and Yar, O., 2019. Fuzzy Logic-Based Smart Parking System. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 24(5)
2. Saeed, M. and Haris, M., 2020. Smart parking system using fuzzy logic controller for alien cities. *International Journal*, 9(1), pp .62–71.
3. Chen, Z., Xia, J. and Irawan, B., 2013. Development of Fuzzy Logic Forecast Models for Location--Based Parking Finding Services, *Fuzzy Computing and Intelligent Transportation*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/473471>

**Якщо** <транспортний засіб займає менше 10% паркувального місця> **То** <місце сильно вільне > F1.

**Якщо** <транспортний засіб займає менше 25% паркувального місця> **То** <місце слабко вільне > F2.

**Якщо** <транспортний засіб займає менше 50% паркувального місця> **То** <місце слабко зайняте > F3.

**Якщо** <транспортний засіб займає більше 50% паркувального місця> **То** <місце сильно зайняте > F4.

**Якщо** <транспортний засіб займає більше 75% паркувального місця> **То** <місце зайняте > F5.

**Якщо** <на паркувальному місці немає транспортних засобів > **То** <місце вільно > F6.

**Якщо** <менше 10% транспортного засобу займає паркувальне місце> **То** <місце сильно вільне > F7.

**Якщо** <менше 25% транспортного засобу займає паркувальне місце> **То** <місце слабко вільне > F8.

**Якщо** <менше 50% транспортного засобу займає паркувальне місце> **То** <місце слабко зайняте > F9.

**Якщо** <більше 50% транспортного засобу займає паркувальне місце> **То** <місце сильно зайняте > F10.

**Якщо** <більше 75% транспортного засобу займає паркувальне місце> **То** <місце зайняте > F11.

**Якщо** <ТЗ1 займає менше 25% паркувального місця & ТЗ2 займає менше 25% паркувального місця > **То** <місце слабко зайняте > F12.

**Якщо** <ТЗ1 займає менше 50% паркувального місця & ТЗ2 займає менше 25% паркувального місця > **То** <місце сильно зайняте > F13.

**Якщо** <ТЗ1 займає менше 50% паркувального місця & ТЗ2 займає менше 50% паркувального місця > **То** <місце зайняте > F14.

**Якщо** <ТЗ1 займає більше 50% паркувального місця & ТЗ2 займає більше 10% паркувального місця > **То** <місце зайняте > F15.

**Висновки.** У дослідженні проведено аналіз геометричних параметрів транспортних засобів, що розташовані на місцях для паркування на парковці міста Житомира.

Проведено аналіз зображення на визначення зайнятості паркувального міста. Для дослідження було обрано п'ять паркувальних місць.

На основі отриманих даних було створено базу правил.

4. Umoren, U.E., Okoronkwo, G.O., Ogbonnaya, A.E. and Chiagunye, T.T., 2023. Mathematical Modelling of a Fuzzy logic based Car parking system. *JOURNAL OF INVENTIVE ENGINEERING AND TECHNOLOGY (JIET)*, 4(1), pp. 19–28.
5. Elomiya, A., Krupka, J. and Jovicic, S., 2023. A Smart Parking System Using Surveillance Cameras and Fuzzy Logic: A Case Study at Pardubice University's Campus. *Procedia Computer Science*, 225, pp. 4881–4890.
6. Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S. and Bagloee, S.A., 2019. Applications of artificial intelligence in transport: An overview. *Sustainability*, 11(1), p. 189.
7. Nikitas, A., Michalakopoulou, K., Njoya, E.T. and Karampatzakis, D., 2020. Artificial intelligence, transport and the smart city: Definitions and dimensions of a new mobility era. *Sustainability*, 12(7), p. 2789.
8. Sarker, I.H., 2022. Ai-based modeling: Techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. *SN Computer Science*, 3(2), p.158. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x>
9. V. Levkivskiyi, D. Marchuk, N. Lobanchykova et al., 2022. Available parking places recognition system. *CEUR Workshop Proceedings 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering Volume*, № 3077. P. 123–134
10. Levkivskiyi, V.L., Marchuk, G.V., Cyporenko, V.V. & Marchuk, D.K. 2021, Kompiuterna programa Algoritmichno-programne zabezpechennja obrobky ta analizu potoku kadriv videodanyh, shho nadkhodiat z kamer mista, [Online], available at: <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8019/109822.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. Abraham A. Neuro fuzzy systems: State-of-the-art modeling techniques, 2001, *Connectionist Models of Neurons, Learning Processes, and Artificial Intelligence: 6th International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks, IWANN 2001 Granada, Spain, June 13–15, Proceedings, Part 16*. pp. 269–276.
12. Roadway gate automatic control system with the use of fuzzy inference and computer vision technologies / O. S. Amosov et al. 2017 12 th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Siem Reap, 18–20 June 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/iciea.2017.8282932> (date of access: 01.11.2023)

#### **Marchuk D.K. ANALYSIS OF POSSIBLE OPTIONS FOR THE LOCATION OF VEHICLES IN PARKING LOTS TO DEVELOP POSSIBLE FUZZY RULES**

*With the growing number of vehicles and traffic congestion, smart parking is always a strategic issue. Today, parking management systems that can track available spaces have become a necessity for almost all cities and metropolitan areas. Such systems allow users to easily and quickly find free spaces and navigate their location. But parking systems on the market have both advantages and disadvantages. One of the disadvantages is the need for a specific location of cameras. Research has focused on the problem that arises from the location of video cameras located in or near parking spaces. In this regard, it is not always convenient to determine whether a parking space is occupied or free; vehicles can overlap both free and occupied parking spaces; be parked incorrectly or occupy two or more parking spaces. The purpose of this research is to create a rule base for a fuzzy inference model that will be used in a computerized system for finding free parking in a city. Since many factors affect the image coming from video cameras, the location of vehicles in parking spaces in the parking lot on the street of Heroes of the Heavenly Hundred in Zhytomyr was investigated. The article analyzes the geometric parameters of vehicles located in parking spaces. A polygon triangulation algorithm was used to display the planes of the vehicle and the parking space. For the study, we calculated the planes of the parking space and the vehicles located in these spaces. Five parking spaces are considered, two of which have vehicles. The criteria by which the availability of a parking space can be assessed are determined. An image analysis was carried out to determine the occupancy of the parking city. The software was used to determine the percentage of free or occupied spaces. Based on the data obtained, a rule base was created to be used in the algorithm for finding a free parking space.*

**Key words:** fuzzy logic, rule base, model, triangulation, geometric properties, parking space, vehicle.

**Матюшин О.В.**

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

**Вислоух С.П.**

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

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ

*Високоякісне оброблення отворів у деталях із композитних матеріалів залишається дуже складним виробничим завданням. Правильний вибір параметрів різання для поточного шару оброблюваного матеріалу дозволяє отримати необхідну якість поверхні з максимальною продуктивністю і при цьому задані режими можуть призвести до дефектів наступного шару матеріалу. Тому є доцільним використання автоматизованої системи керування процесом різання (АСК).*

*У статті представлено АСК процесом свердління отворів у деталях із вуглепластику. Наведено її структурну і функціональну схеми, а також загальний алгоритм її роботи. Розроблено математичні залежності осьової сили від режимів свердління та діаметра отвору, коефіцієнта розширення від осьової сили, шорсткості від режимів свердління та кута при вершині свердла, а також шорсткості від осьової сили. При цьому пропонується загальна математична модель процесу свердління деталей із вуглепластику, критерієм оптимальності якої є максимальна продуктивність оброблення отворів з обмеженнями за параметрами якості.*

*Запропонована система використовує алгоритм керування за поточною інформацією шляхом застосування технічних засобів автоматизації та відповідного програмного забезпечення. За вимірним значенням осьової сили в режимі реального часу з інтервалом опитування 50 мс виконується прогнозування значень коефіцієнта розширення та шорсткості поверхні отвору за розробленими математичними залежностями. При цьому за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК) підтримується оптимальне значення кількості обертів шпинделя за допомогою привода головного руху та керування подачею з використанням привода подач.*

*Використання АСК процесом свердління дозволить підтримувати оптимальні значення режимів різання, що забезпечують отримання необхідних параметрів коефіцієнта розширення отвору та шорсткості його поверхні.*

**Ключові слова:** композиційні матеріали, вуглепластики, свердління, розширення отворів, шорсткість, автоматизована система керування, режими свердління, осьова сила, оптимальні режими, продуктивність.

**Постановка проблеми.** На сьогодні в авіабудівній, аерокосмічній, машинобудівній та приладобудівній галузях особливого поширення набувають композиційні матеріали. Це викликано їх високими показниками міцності та жорсткості по відношенню до маси. Також композитні матеріали мають високу стійкість до корозії.

Основною операцією механічного оброблення даних матеріалів є свердління. Проте на відміну від традиційних конструкційних матеріалів даний процес супроводжується наступними дефектами: розширенням поверхні отвору, термодеструкцією матриці, виривами та висмикуванням волокон, усадкою і великою шорсткістю оброблених поверхонь [1].

Дефекти в композиційних матеріалах, зокрема в вуглепластиках, можуть суттєво впливати на їхню якість та механічні властивості деталей, з яких вони виготовлені. Одним із основних дефектів, що часто виникає у вуглепластиках, є розширення поверхні отвору, що полягає у відокремленні шарів матеріалу поблизу отвору, яке може виникнути в процесі свердління внаслідок недостатньої адгезії між шарами. Розширення призводить до зниження несучої міцності деталі та негативно впливає на довговічність матеріалу внаслідок зниження його структурної цілісності, що призведе до погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Формально розширення поверхні отвору характеризується його коефіцієнтом, що визначається

як відношення максимального діаметра отвору до його номінального значення [2].

На практиці реалізовано різні шляхи зменшення розшарування отворів. Так, використання опорної пластини під заготовкою при свердлінні отвору зменшує коефіцієнт розшарування. Проте оптимальним варіантом вирішення цієї задачі є керування режимами різання. Поєднання високої швидкості різання (кількості обертів шпинделя), малої подачі та використання свердла з невеликим значенням кута при вершині ефективно мінімізує фактор розшарування при свердлінні отворів в композитах [3].

В [4] встановлено, що при свердлінні отворів у вуглепластику значення розшарування отвору перевищуватиме допустиму величину, якщо осьова сила різання буде більше критичного значення, особливо в місцях входу та виходу свердла із композитного матеріалу. Також неконтрольоване свердління може спричинити пошкодження навколо отвору через розшарування волокон на вході та виході свердла з оброблюваного матеріалу [3].

Крім того, поширеним дефектом свердління отворів в композитах є підвищена шорсткість поверхні, що виникає внаслідок анізотропії властивостей оброблюваного матеріалу, неправильно вибраних режимів оброблення, зносу різального інструменту та властивостей оброблюваного матеріалу. Велика шорсткість поверхні отвору зазвичай негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробу, що складається із вуглепластикових деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При свердлінні отворів в композитних матеріалах Hocheng і Dharan запропонували теорію, що базується на механіці руйнування, яка дозволяє виконувати прогнозування критичної осьової сили різання, що викликає пошкодження від розшарування при свердлінні композиційних ламінатів [5]. Основними параметрами в цій методиці є властивості оброблюваного матеріалу, а саме: модуль пружності та в'язкість міжшарового руйнування.

Критичне значення осьової сили ( $P_{крит}$ ) за цією теорією визначається за наступною формулою [5]:

$$P_{крит} = \pi \left[ \frac{8G_{lc}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

де  $G_{lc}$  – в'язкість міжшарового руйнування, Дж/м<sup>2</sup>;

$E_1$  – модуль пружності, Н/м<sup>2</sup>;

$h$  – товщина необробленого матеріалу під інструментом, мм;

$\nu_{12}$  – коефіцієнт Пуассона.

У роботі [4] на основі моделі критичного значення осьової сили розроблено інтелектуальну систему, яка може автоматично підтримувати осьову силу різання менше критичних значень в процесі оброблення композиційних матеріалів.

Експериментальні дослідження [6] показали, що розшарування відбуваються як на виході свердла з оброблюваного матеріалу, так і на вході в нього. Тобто потрібно враховувати дві величини розшарування або використовувати максимальне значення, яке пропонується у даній роботі.

Більшість попередніх досліджень з питань адаптивного керування процесами оброблення базуються на вимірюванні сили, потужності та/або крутного моменту [7]. Для композитів акустичну емісію використовували для виявлення початку виникнення мікротріщин в процесі різання і вважають її корисним параметром для моніторингу пошкоджень у композитах [4]. Іншими параметрами, що використовуються для моделювання процесу обробки, моніторингу та контролю, є значення струму шпинделя, температура інструменту та вібрації заготовки.

На рис. 1 зображена загальна схема інтелектуальної системи, що пропонується авторами [4], мета якої полягає в тому, щоб отримати отвір з максимальною продуктивністю, забезпечуючи при цьому відсутність розшарування. Функції контролера у системі включають безперервний моніторинг сили, сигналів акустичної емісії та/або вібрації та розташування свердла для визначення етапу свердління. Тут найкращою стратегією є максимізація подачі для скорочення часу циклу в процесі оброблення. В момент контакту інструменту з матеріалом та виходу з нього подачу необхідно обмежити для уникнення розшарування. Подача на етапі нормального свердління (без розшарування) також має контролюватися для уникнення утворення розшарування.

У роботі [1] проведено моніторинг акустичної емісії (АЕ) в режимі реального часу для контролю якості свердління заготовок із склопластика, щоб вивчити вплив параметрів оброблення (швидкості різання та подачі) на осьову силу та знос інструменту по задній поверхні, що впливає на усадку отвору, а також для оцінки зв'язку між контрольованими параметрами. Тут АЕ використовується як активний інтелектуальний індикатор для моніторингу стану процесу. АЕ, що утворюється в процесі свердління композитних матеріалів, здебільшого викликана деформацією матриці, різанням волокна, механізмами тертя, розшаруванням та зносом інструменту.

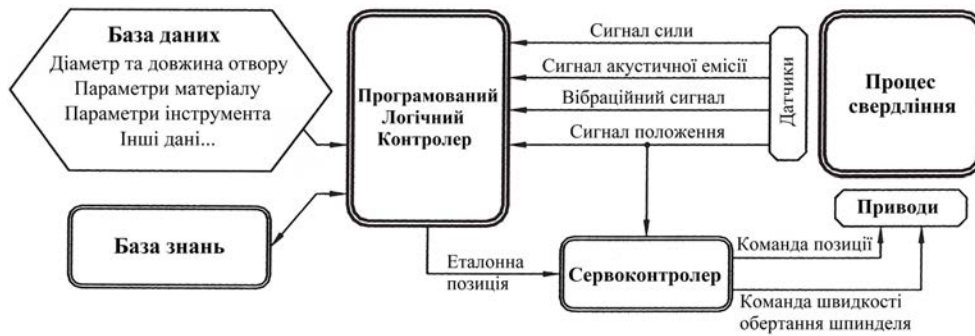


Рис. 1. Загальна схема інтелектуальної системи керування процесом свердління [4]

Автори [3] використовують оптимальне керування для моніторингу осьової сили та корегування її значення шляхом зміни подачі. При цьому як заготовка використовується склопластиковий ламінат. У цій роботі динаміка свердління в склопластикових ламінатах зафіксована у формі моделі простору станів третього порядку між осьовою силою та подачею. Потім на основі розробленої передатної функції застосовується оптимальне керування осьовою силою в процесі свердління.

Таким чином, дослідниками [3] експериментально доведено, що в композитних матеріалах можна просвердлити отвори з мінімальним розшаруванням, якщо осьова сила під час операції свердління не перевищує критичного значення.

Методи керування з використанням нечіткої логіки [2] та штучних нейронних мереж [8] дозволяють отримати добрі результати за відсутності математичної моделі процесу. Осьовою силою також можна керувати за допомогою простого пропорційно-інтегрального (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) контролера [3]. Пропорційне підсилення допомагає швидко досягти опорної сили, а інтегратор забезпечити нульові помилки зміщення.

У роботах [9, 10] автори пропонують виконувати свердління вуглепластику з використанням зворотного зв'язку на основі осьової сили для зменшення розшарування отвору. Дану систему представлено на рис. 2.

З досліджень [3] встановлено, що шорсткість поверхні та коефіцієнт розшарування вуглепластику залежить від подачі, кількості обертів шпинделя (швидкості різання), діаметра свердла та кута при вершині свердла.

Таким чином, встановлено, що можна визначити режими різання, що забезпечують мінімальне розшарування в процесі свердління вуглепластику, але при цьому задача свердління з максимальною продуктивністю та допустимим розшаруванням залишається невирішеною.



Рис. 2. Структура системи керування осьовою силою [9]

В цих роботах не враховується шорсткість поверхні отвору, що також є важливим фактором для забезпечення експлуатаційної надійності деталі в складальному виробі. Основним недоліком запропонованих систем керування є те, що вони враховують лише коефіцієнт розшарування отвору та в них відсутня інформаційна база даних композиційних матеріалів з відповідними математичними моделями та режимами оброблення.

**Метою роботи** є підвищення ефективності процесу оброблення деталей з композиційних матеріалів шляхом керування процесом свердління з використанням автоматизованої системи, що дозволить отримати необхідні параметри якості поверхонь отворів з максимальною продуктивністю. Для функціонування автоматизованої системи керування необхідно розробити методику керування процесом свердління, створити її структурну і функціональну схеми та отримати математичну модель процесу свердління з використанням відповідних математичних моделей параметрів якості оброблюваних поверхонь отворів в деталях з вуглепластику.

**Виклад основного матеріалу.** На основі аналізу використовуваних автоматизованих систем керування процесів свердління отворів запропонована система керування, структурна схема якої представлена на рис. 3.

У розробленій АСК заготовку із вуглепластику закріплено в жорсткому пристосуванні, прикріпленому до п'єзоелектричного динамометра Kistler 9257B, який призначений для вимірювання значення осьової сили у процесі свердління. На підсилювач поступає значення напруги, що генерується динамометром пропорційно прикладеній осьовій силі. Отриманий сигнал підсилюється для отримання аналогового сигналу осьової сили, звідки надходить до АЦП (аналогово-цифровий перетворювач), де перетворюється у цифровий сигнал. Для підсилення та перетворення сигналу використовувався 8-канальний підсилювач-перетворювач типу 5070A01110 фірми Kistler. Після перетворення цифровий сигнал подається на вхід персонального комп'ютера. На комп'ютері встановлено програмне забезпечення DupoWare фірми Kistler, яке призначене для аналізу сигналу осьової сили. У блоці обробки вимірювань обчислюється значення коефіцієнта розшарування та шорсткості поверхні за вимірним значенням осьової сили та порівнюється із заданим у базі даних. При цьому

база даних містить критичне значення осьової сили, що розраховано за параметрами оброблюваного матеріалу, а також задані відповідно до технічних вимог значення коефіцієнта розшарування та шорсткості поверхні. При необхідності в обчислювальному блоці виконується визначення коригуючих значень подачі та кількості обертів шпинделя за створеними математичними залежностями. Після цього програмований логічний контролер формує керуючі впливи та вносить корективи до програми верстата з ЧПК. Керування процесом свердління виконується за подачею, а кількість обертів шпинделя встановлюється та підтримується оптимальним постійним значенням для конкретного діаметра свердла. Керуюча програма формує скореговані керуючі сигнали по зміні значень подачі на виконавчі механізми (привод подач) верстата з ЧПК. Привод механізму подач складається із двигуна ( $M_2$ ) та коробки подач, що відповідно змінюють подачу на нове розраховане значення. Для підтримання значення кількості обертів подається значення керуючого сигналу на привод головного руху, що складається з двигуна ( $M_1$ ) та коробки швидкостей. Закінчення циклу свердління виконується за програмою при досягненні заданої глибини свердління. При цьому динамометр підключений до ПК за допомогою інтерфейсу RS-232.

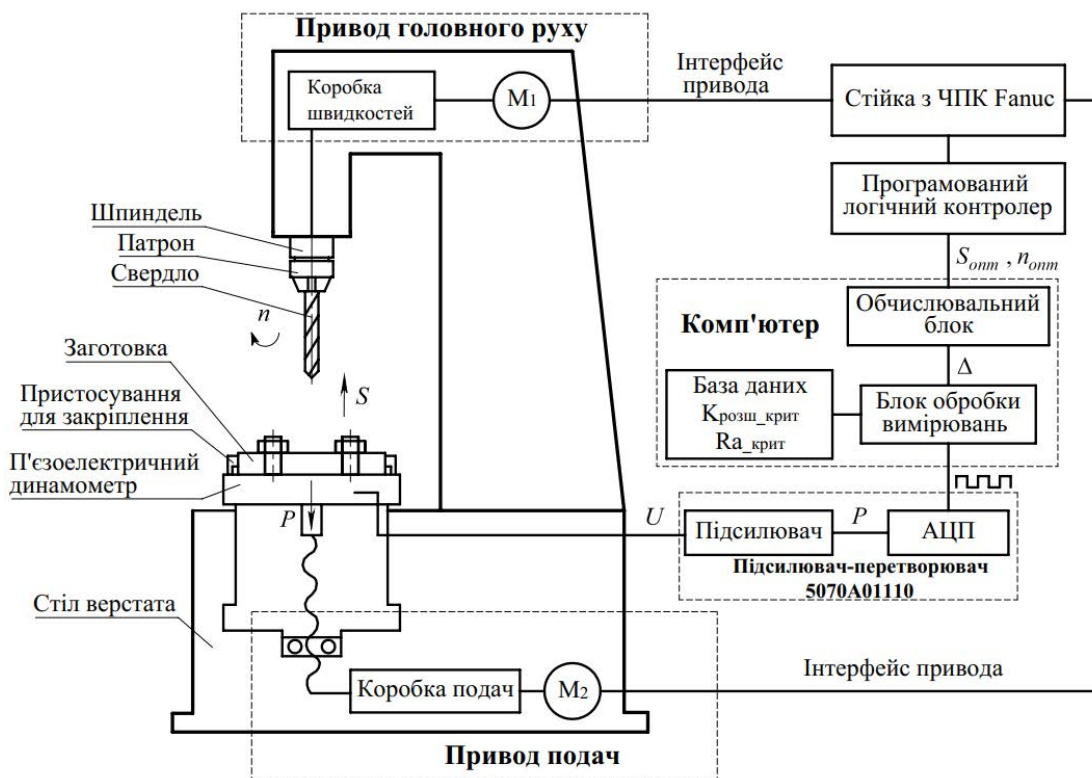


Рис. 3. Структурна схема АСК процесом свердління деталей із вуглепластику



Процес керування виконується в такій послідовності: запуск процесу із наперед визначеними (рекомендованими, оптимальними) режимами оброблення; підхід, де свердло виконує переміщення до заготовки; контакт, коли наконечник свердла контактує з матеріалом заготовки; нормальне свердління, тобто свердління без розшарування (або в межах допустимого); ініціація (непряме визначення) розшарування шляхом вимірювання осьової сили різання, у випадку перевищення критичної осьової сили, коли настає підвищення розшарування; коригування режимів оброблення з використанням зворотного зв'язку шляхом зменшення значення подачі; вихід свердла, коли наконечник свердла виходить наскрізь із заготовки; завершення процесу свердління, коли отвір вже отримано; відведення свердла, тобто свердло необхідно відвести із заготовки та перемістити назад в нульову точку.

Розроблена система є замкненою із зворотним зв'язком. Інтервал опитувань динамометра 9257В становить 50 мс. При цьому із паспортних даних обладнання встановлено, що верстата на базі системи з ЧПК Fanuc відпрацьовують керуючий вплив приблизно за 20 мс.

На основі структурної схеми системи керування отримано її функціональну схему, що зображена на рис. 4.

В наданій замкненій технологічній системі основним є процес свердління отвору в композиційному матеріалі. Вхідним керуючим впливом в системі є подача, а вихідним – регульована осьова сила.

Згідно з наданою схемою динамометр в процесі оброблення деталі виконує функції перетворювача сили  $P$ , що через підсилювач підключений до входу пристрою порівняння. Рух подачі стола передається через ходовий гвинт (гвинтову пару) та редуктор, що має кутову швидкість  $\omega_p$ , від регульованого двигуна. Двигун постійного струму містить вбудований тахогенератор, напруга на виході якого ( $U_d$ ) пропорційна кутовій швидко-

сті двигуна. Для живлення двигуна використовується підсилювач-перетворювач. На вхід суматора подається сигнал  $U_z$ , що відповідає необхідному значенню осьової сили. На інший вхід суматора надходить сигнал  $U_0$ , що виробляється перетворювачем сили (п'єзоелектричним динамометром) та підсилювачем. Цей сигнал відповідає реальному значенню осьової сили. Помилка  $\Delta U = U_z - U_0$  надходить на вхід підсилювача-перетворювача, який виробляє напругу для живлення двигуна  $U_{II}$ , що визначає величину подачі так, щоб звести неузгодженість до мінімуму. Таким чином, АСК шляхом керування подачею стола здійснює стабілізацію осьової сили на заданому рівні. В якості об'єкта керування в АСК входить процес свердління деталей із вуглепластику та пружна система верстата, вихідною величиною якої є деформація  $x$ .

Реалізація АСК процесу свердління отворів у деталях з вуглепластику можлива на основі застосування математичних моделей параметрів якості оброблених поверхонь, що пов'язують коефіцієнт розшарування і їх шорсткість з режимами та умовами різання.

Для отримання відповідних математичних моделей використано результати експериментальних досліджень, що надано в [2]. Як заготовки в цих дослідженнях використовували прутки з вуглепластику діаметром 50 мм і товщиною 10 мм. Щільність оброблюваного матеріалу становила 1,1 г/см<sup>3</sup>. Методом формування є ручна укладка із орієнтацією волокон 0/90°. Операції свердління виконували на свердлильному верстаті з ЧПК (3-осьовий верстат з ЧПК MAXMILL з контролером FANUC OiMate MC, номер моделі CNC 2000EG). Для свердління використовували твердосплавні свердла з покриттям TiAlN діаметрами 6, 8 і 10 мм з кутом при вершині 118° [2].

На основі результатів експериментальних досліджень отримано математичну залежність осьової сили від режимів свердління та діаметра свердла методом групового врахування аргументів з використанням програми GMDH Shell DS,

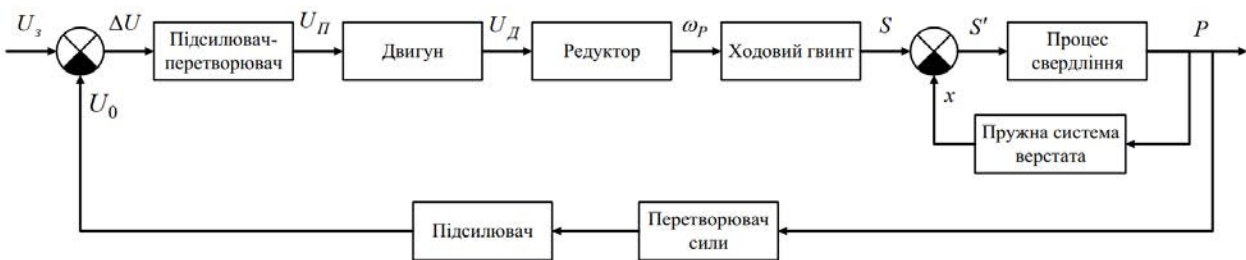


Рис. 4. Функціональна схема АСК процесом свердління

яка була спрощена шляхом підстановки коефіцієнтів в загальну формулу:

$$P = 0,17563 \cdot n - 374,454 \cdot d - 7,72357 \cdot S + 573,98 \cdot S^{1/3} + 4672,8693 \cdot d^{1/3} - 126,7096 \cdot n^{1/3} - 6567,829, \quad (2)$$

де  $P$  – осьова сила, Н;

$n$  – кількість обертів свердла, об/хв;

$d$  – діаметр свердла, мм;

$S$  – подача свердла, мм/хв.

Отримана залежність показує, що діаметр отвору має найбільший вплив на осьову силу. Це очевидно, оскільки зі збільшенням діаметра отвору осьова сила також зростає. Оскільки загальний вплив швидкості обертання шпинделя менший, ніж подачі, то в запропонованій системі використано керування подачею для отримання необхідної якості поверхні отвору.

Для реалізації зворотного зв'язку в АСК використовується залежність максимального коефіцієнта розшарування від осьової сили різання. Для її отримання використано результати експериментальних досліджень [2], де максимальний коефіцієнт розшарування визначали як максимальне значення від значень розшарувань на вході та виході свердла з оброблюваного матеріалу. При цьому використано поліноміальну регресію 4 порядку (рис. 5) у середовищі Matlab:

$$K_{розш} = -5,231685e-12P^4 + 1,046342e-08P^3 - 7,016552e-06P^2 + 0,0018712P + 0,8805905 \quad (3)$$

При цьому відносна похибка розробленої математичної моделі не перевищує 1,27%.

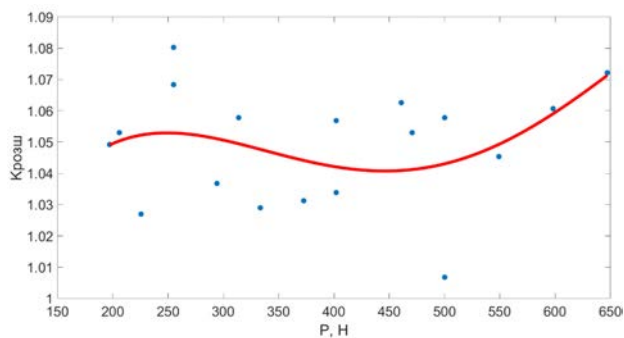


Рис. 5. Графік отриманої залежності коефіцієнта розшарування від осьової сили

Оброблення результатів експериментальних досліджень [11] за методом групового врахування аргументів дозволило отримати математичну залежність величини шорсткості поверхні отвору  $Ra$  від кількості обертів свердла  $n$ , подачі  $S$  та кута при вершині свердла ( $angle$ )  $Ra = f(n, S, angle)$  із коефіцієнтом R-квдрат, що становить 0,955:

$$Ra = -0,604141 - 1,72594e - 07 \cdot n \cdot S + 0,00186921 \cdot S + 0,0293639 \cdot angle - 0,000148889 \cdot angle^2 \quad (4)$$

Для отримання даної залежності використано вуглепластик, що складається із 50% вуглецевого волокна за вагою з орієнтацією 0/90°. В якості матриці використана епоксидна смола. Композитний матеріал мав товщину  $8 \pm 0,1$  мм та складався із 32 шарів. Використовуваний матеріал заготовки був у формі листа  $160 \text{ мм} \times 160 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$ , а потім розрізаний у формі брусків шириною 20 мм для подальшої механічної обробки. Процес свердління виконувався на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК (SMG-300) із використанням твердосплавних свердл діаметром 5 мм з кутами при вершині 60, 100 і 140 градусів. При цьому режими обробки варіювались в таких межах: кількість обертів  $n$  – від 1250 до 4000 об/хв та подача  $S$  – від 50 до 800 мм/хв [11].

Для реалізації процесу свердління в АСК з контролем параметра шорсткості обробленої поверхні за результатами експериментів [11] отримано математичну модель залежності шорсткості від осьової сили, візуальне представлення якої показано на рис. 6.

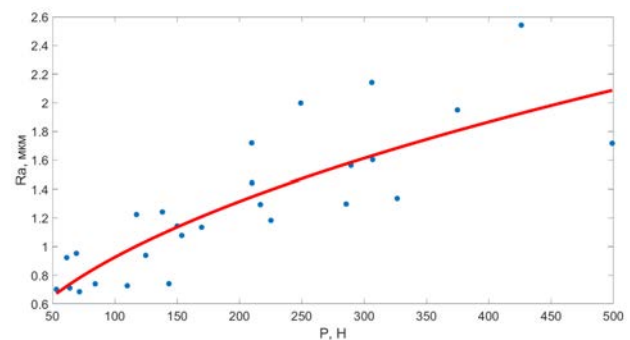


Рис. 6. Графік отриманої залежності шорсткості від осьової сили

У середовищі SPSS Statistics за допомогою модуля «Регресія» використано порівняння критичних для отримання залежності, що найкраще описує вхідні дані. Встановлено, що степеневий вид рівняння регресії найбільш точно апроксимує дану залежність (5) із зкорельованим коефіцієнтом R-квдрат, що становить 0,732.

$$Ra = 0,09P^{0,506} \quad (5)$$

В результаті статистичної обробки інформації можна стверджувати, що при підвищених обертах шпинделя, найменша подача та найменший діаметр свердла можуть забезпечити мінімальне значення осьової сили, мінімальний коефіцієнт розшарування та добру шорсткість обробленої поверхні.

Для реалізації свердління з максимальною продуктивністю  $N$  для розробленої АСК пропонується розв'язати оптимізаційну задачу, що ґрун-

тується на математичній моделі швидкості вида-лення матеріалу.

Необхідно визначити режими різання (швид-кість  $V$  і подачу  $S$ ), що забезпечують

$$\max N = f(V, S), \quad (6)$$

в області допустимих рішень:

$$K_{розш} = f_1(V, S) \leq K_{розш, \max};$$

$$Ra = f_2(V, S) \leq Ra_{дон};$$

$$P \leq P_{крит};$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max};$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

При цьому кількість обертів свердла ( $n$ , об/хв) визначається через швидкість різання як:

$$n = \frac{1000V}{\pi \cdot d}, \quad (7)$$

де  $d$  – діаметр свердла, мм;

$V$  – швидкість різання, м/хв.

Таким чином, шляхом розв'язання цієї оптимі-заційної задачі визначаються оптимальні режими різання, що мають найбільшу продуктивність про-цесу з забезпеченням заданих параметрів якості оброблених поверхонь (розшарування і шор-сткості) з врахуванням параметрів використовува-ного обладнання, різального інструменту і обро-блюваного матеріалу. За отриманими значеннями режимів різання виконується процес свердління з використанням АСК.

**Висновки.** Для реалізації раціонального про-цесу свердління деталей із вуглепластику запро-поновано використовувати автоматизовану сис-тему керування зі зворотним зв'язком на основі вимірювання осьової сили, оскільки її зна-чення безпосередньо пов'язане з параметрами якості – розшаруванням та шорсткістю обробле-ної поверхні.

Запропонована АСК дозволяє забезпечити задані параметри якості поверхні отвору, зміню-ючи подачу та підтримуючи оптимальне значення кількості обертів на основі значення осьової сили, що вимірюється п'єзоелектричним динамометром.

Створені математичні залежності розшару-вання і шорсткості обробленої поверхні від режи-мів різання дозволяють сформувавши математичну модель процесу свердління отворів у вуглепла-стику із максимальною продуктивністю.

Розроблена АСК може бути використана для оптимізації та контролю процесів оброблення широ-кого спектра композитних матеріалів, включаючи вуглецеві, арамідні та скловолокнисті матеріали.

Впровадження даної системи при виготов-ленні деталей із композиційних матеріалів сприяє збільшенню продуктивності, підвищенню його ефективності та якості виробів. Завдяки своїй гнучкості та рівню автоматизації, ця система є перспективним рішенням для сучасних вироб-ничих підприємств, що прагнуть оптимізувати свої процеси та підняти конкурентоспроможність на ринку готових виробів.

#### Список літератури:

1. Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S. K. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 185, no. 1–3. P. 184–190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.114>.
2. Abhishek K., Datta S., Mahapatra S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 76, no. 1-4. P. 401–416. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6199-3>.
3. Singh A. P., Sharma M., Singh I. Optimal control of thrust force for delamination-free drilling in glass-fiber-reinforced plastic laminates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 231, no. 13. P. 2396–2407. URL: <https://doi.org/10.1177/0954405416629864>.
4. Dharan C. K. H., Won M. S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Vol. 40, no. 3. P. 415–426. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(99)00065-6).
5. Ho-Cheng H., Dharan C. K. H. Delamination During Drilling in Composite Laminates. *Journal of Engineering for Industry*. 1990. Vol. 112, no. 3. P. 236–239. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2899580>.
6. Матошин О. В., Вислоух С. П. Прогнозування коефіцієнта розшарування отворів в деталях із вуглепла-стику. *XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефектив-ність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*, м. Київ, 20–21 груд. 2023 р. С. 122–126.
7. Петраков Ю. В. Стан і перспективи розвитку САМ-систем в машинобудуванні. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць*. 2013. № 2(68). С. 44–54.
8. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model / S. R. Karnik et al. *Materials & Design*. 2008. Vol. 29, no. 9. P. 1768–1776. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014>.

9. Ohzeki H., Hoshi H., Arai F. Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites with Feedback Control Based on Cutting Force. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2012. Vol. 6, no. 1. P. 52–64. URL: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.6.52>.

10. Dobrinski A., Dudarev A. Intelligent automated drilling in the laminate composites and hybrid materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38, no. 4. P. 1980–1983. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.723>.

11. Shahrajabian H., Farahnakian M. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013. Vol. 14, no. 10. P. 1829–1837. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0245-1>.

#### **Matoshyn O.V., Vysloukh S.P. SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF DRILLING HOLES IN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER PARTS**

*High-quality machining of holes in parts made of composite materials remains a very difficult production task. The correct selection of cutting modes for the current layer of the processed material allows you to obtain the necessary surface quality with maximum productivity, and at the same time, the specified modes can lead to defects in the next layer of material. Therefore, it is advisable to use an automated cutting process control system (ACS).*

*The article presents an ACS for the process of drilling holes in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) parts. Its structural and functional schemes, as well as the general algorithm of its operation, are presented. Mathematical dependences of thrust force on drilling modes and hole diameter, delamination factor on thrust force, roughness on drilling modes and point angle, as well as roughness on thrust force were developed. At the same time, a general mathematical model of the process of drilling CFRP parts is proposed, the optimality criterion of which is the maximum productivity of processing holes with limitations on quality parameters.*

*The proposed system uses a control algorithm based on current information through the use of technical automation tools and appropriate software. Based on the measured value of the thrust force in real time with a polling interval of 50 ms, the values of the delamination factor and the roughness of the hole surface are predicted according to the developed mathematical dependencies. At the same time, with the help of a programmable logic controller (PLC), the optimal value of the number of revolutions of the spindle is maintained using the main motion drive and feed control using the feed drive.*

*The use of ACS in the drilling process will allow maintaining the optimal values of the cutting modes, which ensure obtaining the necessary parameters of the hole delamination factor and the roughness of its surface.*

**Key words:** *composite materials, carbon fiber reinforced polymer, drilling, delamination, roughness, automated control system, drilling modes, thrust force, optimal modes, productivity.*

**Melnychuk B.P.**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Shevchenko V.V.**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF PARTS

*The article presents an automated system for monitoring the surface roughness parameters of parts using the optical method of confocal chromatic sensing with on-site measurements.*

*One of the most important parameters of parts is reliability and accuracy. These parameters directly depend on the surface roughness parameters, so it is important to process parts with the specified parameters that will meet the purpose of the part. There are many methods for measuring roughness parameters, most of which involve removing the part from the machine between operations, which introduces some of the errors associated with part installation into the machining process. In addition, conventional methods and portable devices for measuring roughness parameters are often impossible to use for measuring parts of small dimensions and complex geometric shapes.*

*The method of chromatic confocal sensing, which is based on the use of the phenomenon of light dispersion, i.e., reflects the dependence of the refractive index on the medium or frequency of light, is used in this work. The optical system is based on the design of a confocal chromatic microscope. The ray tracing method was used to determine the focal lengths for different light wavelengths passing through the objective. After passing through the lens, white light is decomposed into a spectrum, with each wavelength focused at a certain distance from the lens to form a set of monochromatic images. The Lagrange multiplier method was used to develop and visually interpret the mathematical relationship between focal length and light wavelength. Thus, using the method of confocal chromatic sensing, it is possible to measure the surface geometry and calculate the roughness parameters based on the measurements. The paper also presents and describes a block diagram of the algorithm for controlling the roughness parameters, a block diagram of the algorithm for measuring the roughness parameters, and a block diagram of an automated system for controlling the roughness parameters of the surface of parts.*

*An automated system for controlling the surface roughness parameters of parts by the optical method, with on-site measurements, will increase the measurement accuracy and production productivity.*

**Key words:** CNC machines, automated production, surface roughness parameters, in-situ measurements, chromatic confocal sensing method.

**Introduction.** Roughness refers to the microgeometry of a solid and determines the nature of the interaction between a device part and other parts in the machine tool system. This is an important indicator in the product specification, determined by the degree of deviation of the actual surface profile at the base length from the theoretical smooth surfaces of a given geometric shape. Roughness determines the wear resistance and strength of a part, the tightness of joints, chemical resistance, and the appearance of the part. Depending on the conditions, the appropriate roughness parameter is assigned. For example, for friction parts, this parameter should be minimal, as high roughness will accelerate wear in the contact areas. At the same time, surfaces that do not have contact with other surfaces or do not perform

any functions may have a high roughness parameter, since additional processing is unnecessary [1].

According to research, surface roughness measurements can be divided into two types: contact (profilometers and profilographs) and non-contact (optical, pneumatic, ultrasonic, electrical, and temperature). Optical methods are most often used because they provide high measurement speed and high resolution. Measurements can be carried out with preliminary removal of the part and its installation in the measuring device, but such methods are undesirable because they increase equipment downtime and therefore reduce production efficiency, while at the same time introducing errors in the installation of the part during subsequent processing. Therefore, in-situ measurement methods

are increasingly used, i.e., measurements do not require part removal and are performed directly in the machine tool holder [1].

**Formulation of the problem.** To measure the roughness parameters using traditional methods, it is often necessary to remove the part from the machine between operations, which can cause some errors and inaccuracies in the part processing process. At the same time, portable devices for measuring roughness parameters are unsuitable for measuring parts of small dimensions and complex geometry.

**The purpose of the article.** The aim is to develop an automated system for monitoring the surface roughness parameters of parts using the optical method of confocal chromatic sensing, with measurements carried out on site. The advantages of such a system will be that measurements will be carried out on-site, which will reduce the impact of installation errors on the accuracy of the part as a whole, and the use of the optical method will increase measurement accuracy, reduce production costs, and increase its productivity by reducing the number of defective parts.

**Presenting main material.** Roughness is a set of irregularities that form a real surface relief that differs from the specified one, with a relatively small step on the base length. It is formed as a result of processing: protrusions and depressions are formed, the surface layer of the material is strengthened or destroyed, and internal stresses occur. Roughness directly depends on the method of machining the part, the cutting modes, the overall stiffness of the machine-tool-part system, the materials of the part itself and the cutting tool, and the heating. The roughness index affects the performance characteristics of machine parts and assemblies – friction, wear resistance, tightness, fatigue life, corrosion resistance, tribological characteristics, heat transfer, adhesion, contact pressure, aerodynamic characteristics, and electrical contact. Therefore, machining parts with specified roughness parameters is very important.

In accordance with DSTU ISO 4287:2012, roughness parameters are determined by six indicators, they are divided into 3 types: height, step and height-step.

The altitude ones include the following:  $R_a$  is the average arithmetic deviation of the profile within the base length;  $R_z$  is the sum of the average absolute values of the heights of the 5 largest protrusions and depths of the 5 largest depressions of the profile within the base length;  $R_{max}$  is the distance between the line of profile protrusions and the line of profile depressions within the base length [2];

The following are considered to be step parameters:  $S$  is the arithmetic mean of the step of profile irregularities along the vertices within the base length;  $S_m$  is the arithmetic mean of the step of profile irregularities within the base length;

Only one parameter belongs to the height-step parameters:  $tp$  – the ratio of the reference length of the profile to the base length.

In foreign literature, you can also find many other roughness parameters such as:  $R_q$  is the root mean square value, or the root mean square value of the deviations of the profile height from the midline;  $R_{vi}$  is the maximum depth of depressions below the midline within the reference length;  $R_{pi}$  is the maximum height of peaks above the midline within the reference length;  $R_{sk}$  is the asymmetry, or the measure of asymmetry of the profile relative to the midline;  $R_{ku}$  is the kurtosis, or the measure of sharpness (or tailing) of the profile relative to the midline [3].

There are many methods for estimating surface roughness. There are two ways to assess roughness: qualitative and quantitative.

Qualitative assessment is often used in production conditions. For this purpose, the so-called standards are used – specially made surface samples with a pre-measured and specified roughness. The surface roughness is assessed by visual comparison.

Quantitative methods for assessing roughness are performed in two ways: contact and non-contact [4].

Contact methods include those that use special devices such as profilers and profilometers.

There is also a method of casts used to assess roughness in hard-to-reach areas.

Non-contact methods include: temperature, pneumatic, ultrasonic, but such methods allow to determine the roughness only indirectly, so there are a number of optical methods that allow to accurately determine the surface roughness, these include the method of light and shadow intersection, interference, raster, laser scattering, and chromatic confocal sensing, the latter has a number of advantages over other methods, so it was used in the study.

The chromatic confocal sensing method is based on the use of the phenomenon of light dispersion.

The advantages of this method are as follows:

This method can be used to measure any surface: mirror, curved, inclined (up to  $82^\circ$ ), rough, transparent, etc;

The measurement by this method does not form shadow zones, which allows you to evaluate not only the roughness parameter, but also the surface topography;

Taking into account the fact that the light wavelength can be divided many times, this method has a very high resolution (up to 1 nm), which depends on the resolution of the spectrometer and the accuracy of the lenses in the optical system;

As long as the measurements are performed within the permissible range, a certain wavelength will always be focused on the surface of the part;

The optical system and the controller can be connected via fiber optics, which allows for remote measurements;

The accuracy of the confocal chromatic sensing method is not affected by external interference, such as changes in temperature, light, or electromagnetic interference;

This method can also be used to measure the thickness of thin transparent films on the surface of parts (up to 6 layers);

This method can also be used to measure the roughness of surfaces inside holes [5];

In addition, this method achieves a high frequency of data acquisition (up to 70 kHz).

To build the optical component of the system for confocal chromatic sensing, we need: a full-spectrum white light source, for which we decided to use LEDs, since they consume little energy and have a long service life, a 50:50 beam splitter, which was used as a translucent mirror, two apertures, and an HPCS300 minispectrometer. The advantages of this

spectrometer are the ability to connect both via USB and RS285 protocol, which allows for remote and online measurements [6, 7].

We also used a plan apochromatic microscope objective with a twenty-fold magnification and a numerical aperture of about 0.75 (Fig. 1), made under patent of March 17, 1998, No. 5 729 391, inventor Itoe Ito, Kawasaki, Japan, assignee of Nikon Corporation, Tokyo, Japan [8].

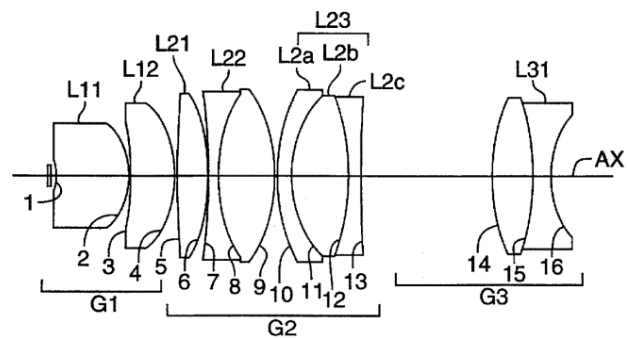


Fig. 1. Plan apochromatic microscope objective [8]

Fig. 2 shows the schematic arrangement of the elements of the optical component of the roughness parameters control system.

The principle of operation of the optical component of the roughness control system: the light source 1, which contains a spherical mirror, focuses the light so that it passes through the input aperture 2 with a hole

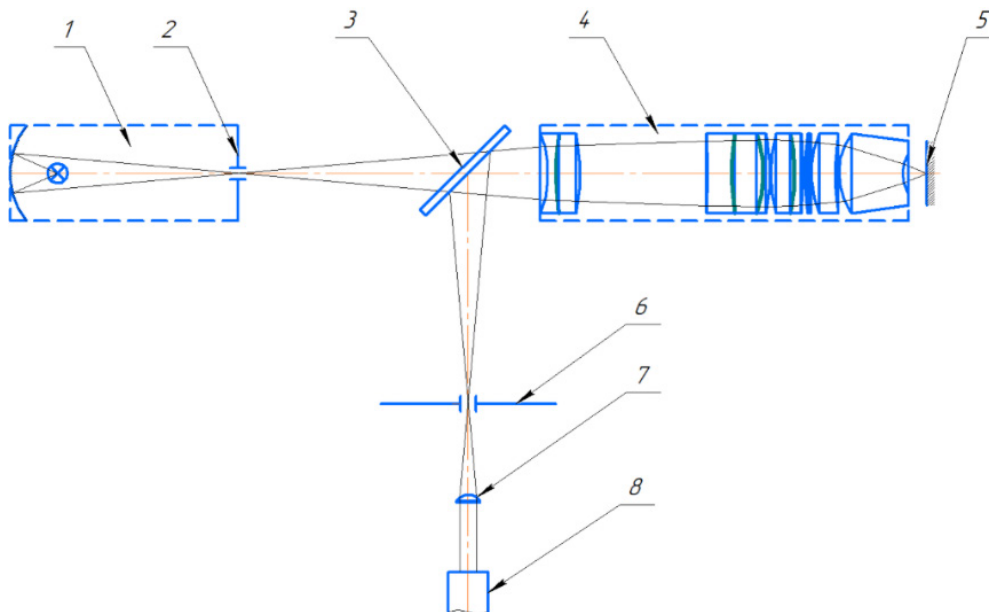


Fig. 2. Schematic arrangement of elements of the optical component of the system for controlling roughness parameters: 1 – light source; 2 – inlet aperture; 3 – beam splitter 50:50; 4 – microscope objective; 5 – surface under study; 6 – outlet aperture; 7 – collimator lens; 8 – spectrometer objective

size of 1 mm. After passing through the aperture 2, the light passes through a translucent mirror, which serves here as a beam splitter 3 50:50 and enters the lens 4, after passing through the lens, the light is decomposed into a spectrum and only one wavelength is focused on the surface under study 5, the focused light is reflected back and after passing through the lens 4 enters the beam splitter 3, from here the reflected part of the light returns back to the source 1, and part enters the direction of the output aperture 6. Its role is to filter out the unfocused wavelengths and let only the focused light pass through. The filtered light enters the collimator lens 7 and then enters the spectrometer objective.

The tracing method was used to calculate the focal lengths for different wavelengths. A collimating lens consists of two surfaces on which light is refracted and a medium in which light passes. Studies [9] have shown that the nature of refraction and transmission of a light beam in different media can be described mathematically.

The refractive matrix describes how a light wave is refracted at the boundary of two media (for example, air-glass), and is written in the form of a matrix  $\mathfrak{R}$  :

$$\mathfrak{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where:  $D_1$  – is the force of one refractive surface, which is calculated as:

$$D_1 = \frac{n_{i1} - n_{t1}}{R_1}, \quad (2)$$

where:  $n_{t1}$  – the refractive index in the second medium (or in the medium of beam transmission);  $n_{i1}$  – refractive index in the first medium (or medium of incidence);  $R_1$  – surface radius.

The transmittance matrix describes how a light wave behaves in a homogeneous medium, we write it in the form  $\mathfrak{T}$  :

$$\mathfrak{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d_{21}/n_{t1} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where:  $d_{21}$  – distance between the point of incidence of the beam on the first surface and the second.

Since the lens consists of two surfaces and a medium, the system matrix A, which describes the nature of the light wave passing through the bulk lens, will consist of two refractive matrices and one transmission matrix, and will have the following form:

$$A_{21} = \mathfrak{R}_1 \mathfrak{T}_1 \mathfrak{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d_{21}/n_{t1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -D_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

After mathematical transformations, this matrix is written in the following form:

$$A_{21} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{D_2 d_1}{n_l} & -D_1 - D_2 + \frac{D_2 D_1 d_1}{n_l} \\ \frac{d_1}{n_l} & 1 - \frac{D_1 d_1}{n_l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

where:  $d_l$  – lens thickness, mm;  $n_l$  – refractive index of the lens.

The determinant of this matrix is always equal to one  $|A_{21}| = 1$ . Additional studies have also shown that the matrix term  $-a_{12} = -\frac{n_{i1}}{f_o} = +\frac{n_{t2}}{f_i}$

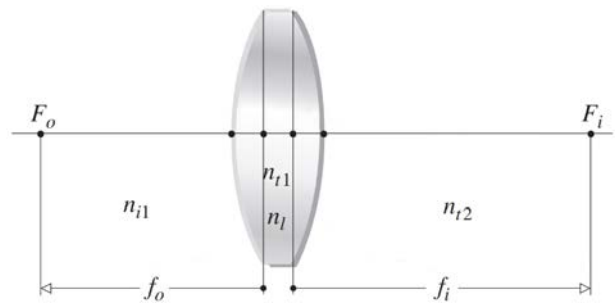


Fig. 3. Focal lengths of lenses

So, to calculate the focal lengths for different wavelengths for a lens, you need to calculate the matrix  $A_{16,1}$

$$A_{16,1} = \mathfrak{R}_{16} \mathfrak{T}_{1615} \mathfrak{R}_{15} \mathfrak{T}_{1514} \mathfrak{R}_{14} \mathfrak{T}_{1413} \mathfrak{R}_{13} \mathfrak{T}_{1312} \mathfrak{R}_{12} \mathfrak{T}_{1211} \mathfrak{R}_{11} \times \\ \times \mathfrak{T}_{1110} \mathfrak{R}_{10} \mathfrak{T}_{109} \mathfrak{R}_9 \mathfrak{T}_{98} \mathfrak{R}_8 \mathfrak{T}_{87} \mathfrak{R}_7 \mathfrak{T}_{76} \mathfrak{R}_6 \mathfrak{T}_{65} \mathfrak{R}_5 \mathfrak{T}_{54} \mathfrak{R}_4 \mathfrak{T}_{43} \mathfrak{R}_3 \mathfrak{T}_{32} \mathfrak{R}_2 \mathfrak{T}_{21} \mathfrak{R}_1$$

Calculations have shown that different focal lengths of the light wave passing through the lens correspond to different focal lengths:

Table 1

Table of fixed values of the function  $f(\lambda_i)$

| $\lambda_i$ , nm      | 380   | 435   | 490   | 580   | 700   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f_i(\lambda_i)$ , mm | 6.648 | 6.782 | 6.881 | 6.993 | 7.091 |

Accordingly, by interpolating using the Lagrange multiplier method, we obtain the function of the focal length  $f_i$  versus wavelength  $\lambda_i$  (Fig. 4).

$$f_i(\lambda_i) = -4.11\lambda_i^4 + 16.31\lambda_i^3 - 22.26\lambda_i^2 + 13.56\lambda_i + 3.91. \quad (6)$$

Figure 5 shows the algorithm of the roughness control process. The algorithm for measuring the roughness parameters is as follows: first, the user enters the base length or roughness class at the setup stage. After that, the corresponding measurement modes are read from the microcontroller memory. Next, the LED and spectrometer are powered on. Before starting roughness measurements, the sensor will first measure the received spectrum to make sure that it is within the extreme focal lengths. If



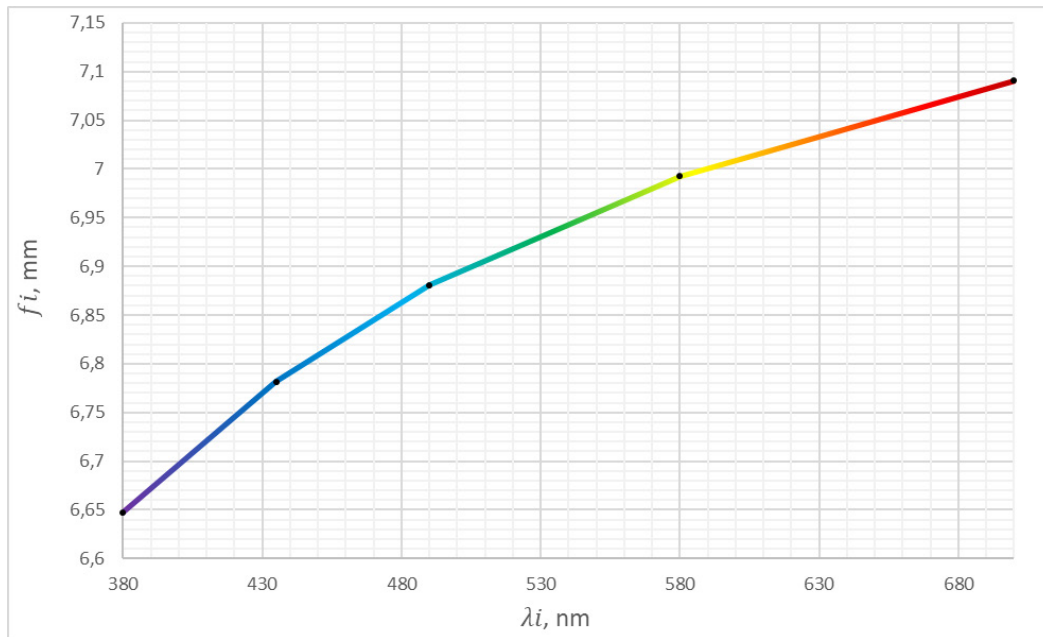


Fig. 4. Dependence of the focal length  $f_i$  on the wavelength  $\lambda_i$

the sensor is too close or too far from the surface of the surface to be examined, the positioning error will be estimated and the distance will be corrected. Otherwise, the mechanism will start moving along the surface to be examined. After the movement starts, the measurement of the spectrum reflected from the surface begins. During the measurement, the program works in a loop, constantly recording the obtained peak value of the spectrum and checking the condition for the end of the measurement. The exit condition is the end of the base segment. And when it occurs, the command to stop measurements and movement is executed, then the power of the spectrometer and LED is turned off. After that, the computer analyzes the data, displays the calculated roughness parameters and profilogram or records them in memory.

The algorithm for calculating the roughness parameters is shown in Fig. 6. First, the file is opened, the condition of opening and file integrity is checked. If the file is okay and not empty, the file is read and converted first to an array of type String, then to a list of type double. At this stage, the obtained values of the light wavelength are converted to the distance between the lens and the surface using the mathematical model (6). After that, the selected input parameters are checked and compared with the measured data. If the measured profile length is greater than the base length, it is reduced to the base length, and if it is the other way around, a request to change the base length is displayed. The next step is to build a graph within the

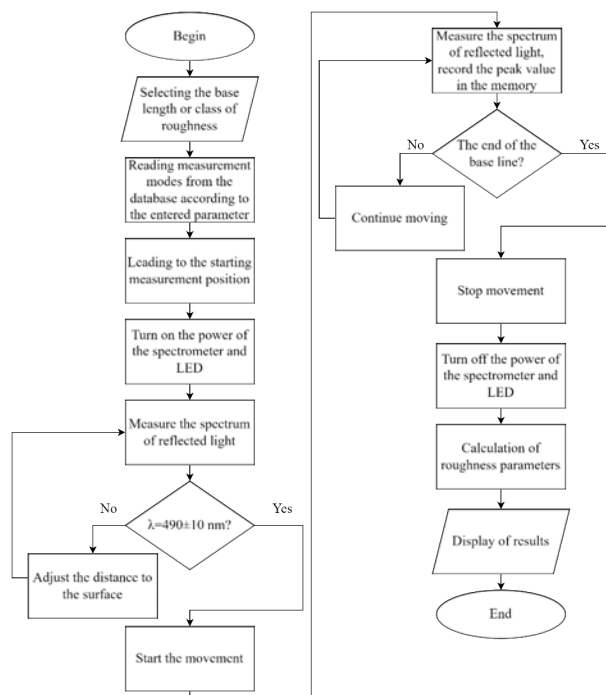


Fig. 5. Block diagram of the algorithm for measuring roughness parameters

base length. Next, the average line is calculated and plotted, relative to which the roughness parameters will be calculated. The next step is to calculate the parameters  $R_a$  and  $R_z$  and, after checking whether they are within the normal range, the corresponding results are displayed.

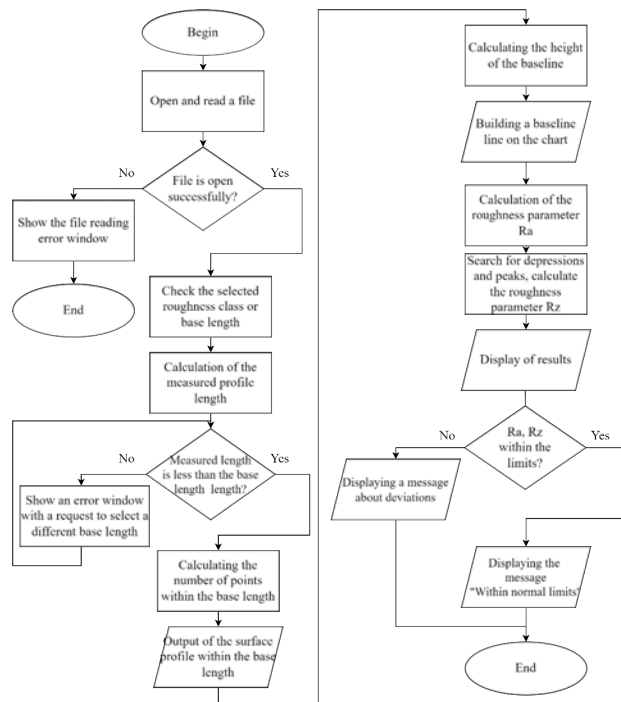


Fig. 6. Block diagram of the algorithm for calculating roughness parameters

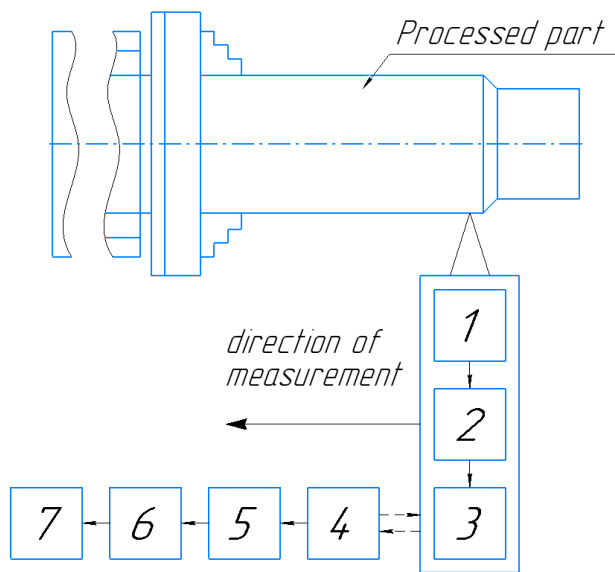


Fig. 7. Block diagram of the automated system for controlling the surface roughness of parts

The block diagram of the automated system for controlling the surface roughness parameters of parts is shown in Fig. 7.

Block 1 is the optical component of the automated system, which includes a white light source, a lens, a beam splitter, an aperture, and a spectrometer. The latter has a minimum integration time of 50  $\mu$ s, which allows measurements with a frequency of up to 20 kHz. The speed of the caliper movement is set depending on the

oriented roughness class or on the base measurement length (0.25–4 mm/s). During the measurement, the spectrometer measures the spectrum of the returned light and records the peak value of the spectrum at each moment of time in the memory (Block 2). Upon completion of the measurement, the recorded values are transmitted via a wired or wireless communication interface (Block 3 and Block 4) to a computer (Block 5). The latter calculates the roughness parameters and, using the comparison unit (Unit 6), evaluates whether the measured roughness parameters correspond to the specified ones. The last step is to display the results (Block 7). There is also a feedback between the spectrometer and the computer, which allows the computer to give a command to start and end measurements.

Compared to the profilograph, the chromatic confocal sensing method has an average error of about 5%. This makes it possible to measure the surface roughness with high accuracy with a Ra parameter of 0.2–0.7 [6].

### Conclusions.

1. Based on the analysis of the state of the art and a review of existing solutions, it was decided to develop an automated system for monitoring the surface roughness parameters of parts using the optical method of confocal chromatic sensing. The advantage of this method is that it is non-contact, has high accuracy and speed of measurement;

2. Based on the analysis of sources and the method of confocal chromatic sensing, an automated system for monitoring the parameters of surface roughness of parts by the optical method was developed, elements of the optical component of the system were selected, and the focal lengths for different wavelengths of light for a flat-apochromatic lens were calculated using the tracing method, which showed that the difference in focal lengths for wavelengths of 380 nm and 700 nm is 0.45 mm;

3. Based on the calculation of focal lengths for different light wavelengths using the Lagrange interpolation formula, a mathematical model (6) was developed that established a nonlinear relationship of the focal length  $f_i$  on the wavelength  $\lambda_i$ , passing through the lens;

4. Based on the design of a confocal chromatic microscope, a structural diagram of an automated system for monitoring the parameters of the surface roughness of a part by the optical method was developed, which will allow measurements to be made in-situ, that is, without removing the part from the part holder;

5. On the basis of the developed mathematical model, an algorithm for the process of controlling and measuring roughness parameters was developed, which will allow measurements to be carried out in an automated mode, that is, in conditions of "unmanned production".

**Bibliography:**

1. В. Остаф'єв В.А., Тимчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивна система управління. Механізація і автоматизація управління.–Київ.– 1983, с.18-20.
2. Shunmugam M. S., Whitehouse D. J. Surfaces and surface metrology. *International Journal of Precision Technology*. 2013. Vol. 3, no. 4. P. 317. URL: <https://doi.org/10.1504/ijptech.2013.058255> (date of access: 20.01.2024).
3. Alkhovyk O. V. Modern methods and means to control microgeometric parameters of surfaces of parts and devices. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2021. No. 3. P. 30–35. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/06> (date of access: 20.01.2024).
4. Roughness Measurement. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, 2013. P. 2967. URL: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_101166](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_101166) (date of access: 20.01.2024);
5. Chromatic Confocal Sensor Vs. Laser Displacement Sensor. *Chromatic Confocal Sensor Manufacturer*. URL: <https://www.geramtech.com/chromatic-confocal-sensor-advantages/> (date of access: 20.01.2024).
6. Quinsat Y., Tournier C. In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precision Engineering*. 2012. T. 36, № 1. С. 97–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.011> (date of access: 20.01.2024).
7. HPCS300 Spectral Illuminance Sensing Module. *Hangzhou Hoptek Technology Co.,Ltd*. URL: <https://www.hoptek.net/en/products/detail/300.html> (date of access: 20.01.2024).
8. Microscope objective lens: patent 5729391 Japan : G02B 21/02; G02B 9/12. No. 792,539 ; applied on 15.01.1997 ; published on 13.10.1998, Bulletin no. US005729391A. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/4c/c5/eb/0dacf0e01457d1/US5729391.pdf> (date of access: 20.01.2024).
9. Hecht E. Optics, Global Edition. 5th ed. Pearson Higher Education & Professional Group, 2016. Vol. 5. 704 p. URL: <https://emineter.files.wordpress.com/2020/04/hecht-optics-5ed.pdf> (date of access: 20.01.2024).

**Мельничук Б.П., Шевченко В.В. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ**

У статті представлено автоматизовану систему контролю параметрів шорсткості поверхні деталей за допомогою оптичного методу конфокального хроматичного зондування з проведенням вимірювань на місці.

Одними з найважливіших параметрів деталей є надійність та точність. Ці параметри безпосередньо залежать від параметрів шорсткості поверхні, тому важливо провести обробку деталей із заданими параметрами, що будуть відповідати призначенню деталі. Існує багато методів вимірювання параметрів шорсткості, більшість з них передбачають зняття деталі з верстату між операціями, в результаті чого в процес обробки деталі вноситься частина похибок, що пов'язані із установкою деталі. Також, звичайні методи та портативні прилади для вимірювання параметрів шорсткості часто неможливо використати для вимірювання деталей малих розмірів та складних геометричних форм.

В роботі використаний метод хроматичного конфокального зондування, що заснований на використанні явища дисперсії світла, тобто відображає залежність показника заломлення від середовища або частоти світла. Оптична система створена на основі конструкції конфокального хроматичного мікроскопа. Метод трасування променів був використаний з метою визначення фокусних відстаней для різних довжин світлової хвилі, що проходять через об'єктив. Після проходження об'єктиву біле світло розкладається в спектр, при цьому кожна довжина світлової хвилі фокусується на певній відстані від об'єктиву та утворює набір монохроматичних зображень. Метод множників Лагранжа був використаний для розробки та візуальної інтерпретації математичної залежності між фокусною відстанню та довжиною світлової хвилі. Таким чином за допомогою методу конфокального хроматичного зондування можна вимірювати геометрію поверхні та на основі вимірювань розрахувати параметри шорсткості. Також в роботі представлені та описані блок-схема алгоритму процесу контролю параметрів шорсткості, блок-схема алгоритму процесу вимірювання параметрів шорсткості та блок-схема автоматизованої системи контролю параметрів шорсткості поверхні деталей.

Автоматизована система контролю параметрів шорсткості поверхні деталей оптичним методом, з проведенням вимірювань на місці, дозволить підвищити точність вимірювань та продуктивність виробництва.

**Ключові слова:** верстати з ЧПК, автоматизоване виробництво, параметри шорсткості поверхні деталей, вимірювання на місці, метод хроматичного конфокального зондування.

**Мрак В.Б.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Климаш М.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Масюк А.Р.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Колодій Т.Б.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## МЕТОДИ ТА ПОКАЗНИКИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ РОЗРОБЦІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

*Дане дослідження призначене для вивчення найпоширеніших методів виділення фону у відеопослідовностях, а також для використання методів порівняльного аналізу та кількісних характеристик для вибору найкращих алгоритмів виділення фону. У результаті цього дослідження був запропонований загальний показник ефективності алгоритму виділення фону на відеопослідовностях, які були отримані зі стаціонарних камер відеоспостереження в системах відеоспостереження.*

*Також в роботі було розроблено покращений метод виявлення динамічних об'єктів у відеопослідовностях, який базується на алгоритмі ViBe. Покращення полягало в використанні колірної схеми UVW\*, застосуванні подвійних порогових рівнів, і використанні елементів теорії експертних систем для усунення невизначеностей у класифікації пікселів, включаючи математичний апарат теорії Демстера-Шефера та трансформуючу довірчої моделі, розробленому Філіпом Сметсом (Philippe Smets). Також використовувався динамічний підхід у оновленні фонові моделі з використанням інформації від сусідніх пікселів.*

*Запропоновано новий показник для комплексної оцінки ефективності виявлення об'єктів у системах відеоспостереження. Цей показник визначає ймовірність виявлення об'єкта інтересу або тривожної події оператором системи відеоспостереження, враховуючи вплив його власного зорового апарату або використання програмного алгоритму. Запропонований показник відображає функціональну залежність ймовірності виявлення об'єкта від відстані між цим об'єктом та камерою відеоспостереження. Ураховуючи різні параметри, такі як характеристики оптичної системи, властивості пристрою відображення інформації (монітора), а також кількість встановлених камер, цей показник визначається як результат слідування конкретним умовам функціонування системи відеоспостереження.*

*Такий підхід дозволяє враховувати різноманітні фактори, які можуть впливати на процес виявлення об'єктів та тривожних подій у різних умовах спостереження. Показник є комплексним і враховує як технічні аспекти системи відеоспостереження, так і психофізіологічні особливості оператора, забезпечуючи об'єктивну метрику ефективності.*

**Ключові слова:** відеоспостереження, інтелектуальна система відеоспостереження, виявлення динамічних об'єктів, показник ефективності, удосконалений ViBe.

**Постановка проблеми.** Розвиток методів побудови інтелектуальних систем відеоспостереження та обробки інформації у вказаних системах, введення загального показника ефективності алгоритму відокремлення фону в відео послідовностях, розробка вдосконаленого методу виявлення динамічних об'єктів у відеопослідовностях на основі алгоритму ViBe, із застосуванням елементів теорії експертних систем для поліпшення класифікації пікселів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питанням дослідження інтелектуальних систем відеоспостереження присвячені праці широкого кола вітчизняних та закордонних науковців, таких як Боуманс Т (Bouwman T), Антуан Вакаван (Antoine Vacavant), Собрал Андриус (Sobral Andrews), Зівкович З. (Zivkovic Z.), Турані Алі (Tourani Ali), Веластін Серджіо (Velasin Sergio), Лі Інг (Li Ying) та ін.

Проблематику впровадження інформаційних технологій в процеси організації охорони у своїх

роботах досліджували Шинкарук О.М., Катеринчук І.С., Олег БОРОВИК, Роман РАЧОК, Юлія БАБІЙ та ін. В роботах вищевказаних науковців значну увагу приділено підвищенню ефективності охорони за рахунок впровадження сучасних технологічних рішень.

**Метою статті** є підвищення результативності використання систем відеоспостереження за рахунок оптимізації методів побудови таких систем.

**Виклад основного матеріалу**

**1. Удосконалення методу виявлення динамічних об'єктів у відео послідовностях.** Розглядаються системи відеоспостереження з функціями відеоаналітики. Припустимо, що в якості елементів вхідних даних системи використовується відеопослідовність, яка представляє собою послідовність кадрів, змінюючись у часі з певною швидкістю. Кожен кадр представляє собою масив пікселів  $p$  з координатами  $(x, y)$  та значеннями інтенсивності випромінювання  $v(p)$ .

Отже, основна задача полягає в створенні фонові моделі пікселя на основі його попередніх  $N$  значень  $v(p)$  та класифікації значення пікселя  $p$  з координатами  $(x, y)$  у поточному кадрі як  $v(p)$  на підставі визначених критеріїв. Критерії призначені для виділення корисного сигналу від шуму на відповідному рівні та зменшення кількості помилок першого та другого роду. Результатом є класифіковані значення  $v(p)$  для кожного пікселя у кадрі.

Обмеження накладені на вхідні відеопослідовності включають в себе отримання даних з камер стаціонарного відеоспостереження із роздільною здатністю не менше  $320 \times 240$  пікселів та швидкість зміни кадрів не менше 15 кадрів в секунду.

Вдосконалений метод виявлення динамічних об'єктів у відеопослідовностях відрізняється від оригінального ViVe використанням колірної схеми  $UVW^*$ , подвійних порогових рівнів, та елементів теорії експертних систем для усунення невизначеностей у класифікації пікселів, а також застосуванням динамічного підходу у оновленні фонові моделі за рахунок сусідніх пікселів. Алгоритм може бути розділений на такі етапи: ініціалізація фонові моделі; виявлення переднього плану (динамічних об'єктів); оновлення фонові моделі.

Під час ініціалізації фонові моделі для кожного пікселя  $p$  з координатами  $(x, y)$  зберігається певна, задана кількість його попередніх значень  $v(p)$ . Далі для кожного пікселя поточного кадру можна створити модель:

$$M(p) = \{v_1(p), v_2(p), \dots, v_N(p)\}. \quad (1)$$

Під час етапу виявлення переднього плану перевіряється, чи належить поточний піксель фонові моделі. Для цього значення пікселя  $p$  з координатами  $(x, y)$  у поточному кадрі позначається як  $v(p)$ , і навколо нього будується сфера радіусом  $R$  в колірному просторі  $UVW^*$ . Після цього визначається кількість  $K$  значень, які потрапили в цю сферу. Для досягнення цього необхідно обчислити відстань між двома пікселями в Евклідовому просторі та порівняти її із значенням  $R$ :

$$\Delta E(v(p_i), v(p_j)) = \begin{cases} |v(p_i) - v(p_j)| > R, \\ |v(p_i) - v(p_j)| \leq R. \end{cases} \quad (2)$$

де  $v(p_i)$  – значення пікселя з координатами у поточному  $i$ -му кадрі;  $v(p_j)$  – значення пікселя з координатами в попередньому  $j$ -му кадрі.

Евклідову відстань між  $v(p_i)$  та  $v(p_j)$  в колірному просторі  $U^*V^*W^*$  представимо у наступному вигляді:

$$\Delta E(v(p_i), v(p_j)) = \sqrt{(U^*(v(p_i)) - U^*(v(p_j)))^2 + (V^*(v(p_i)) - V^*(v(p_j)))^2 + (W^*(v(p_i)) - W^*(v(p_j)))^2}. \quad (3)$$

У випадку, коли абсолютна різниця між значеннями  $v(p_i)$  та  $v(p_j)$  перевищує певний поріг  $R$ , піксель вважається кандидатом на приналежність до переднього плану (як частина динамічного об'єкта); в іншому випадку він вважається частиною заднього плану (фону).

Фіксоване порогове значення  $R$ , особливо при застосуванні алгоритму в ускладнених умовах (різкі зміни освітлення, тремтіння камери, динамічний фон тощо), може бути недостатньо ефективним рішенням. Зокрема, визначення низького значення  $R$  може призводити до включення до фонові класу лише тих пікселів, що мають показники, найбільш схожі до еталонних. Однак це також може призводити до деякої «зашумленості» в результаті помилкових класифікацій фонові пікселів.

З іншого боку, встановлення високого значення  $R$  може призводити до класифікації динамічних об'єктів як фонові у випадках, коли показники пікселя, який дійсно належить динамічному об'єкту, менше за пороговий рівень. Щоб вирішити цю проблему, пропонується використовувати динамічне налаштування порогових рівнів.

Позначимо  $R_{low}$  як відносно низьке значення порогового рівня і  $R_{high}$  як відносно велике значення порогового рівня (рис. 1). В цьому випадку прийняття рішення розглядається вже не в двох випадках (як у виразі (2)), а в трьох:

$$\Delta E(v(p_i), v(p_j)) = \begin{cases} |v(p_i) - v(p_j)| < R_{low}, \\ R_{low} \leq |v(p_i) - v(p_j)| \leq R_{high}, \\ |v(p_i) - v(p_j)| > R_{high}. \end{cases} \quad (4)$$

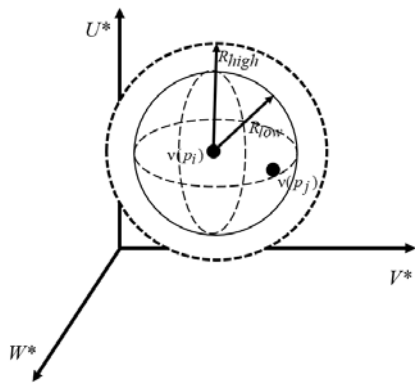


Рис. 1. Візуалізація значень пікселів  $v(p_i)$  та  $v(p_j)$  в колірному просторі  $U^*V^*W^*$  з пороговими рівнями  $R_{low}$  та  $R_{high}$

Наступним етапом є обчислення кількості точок, які віднесені до переднього плану та до фону. Розрахунки за формулою (7) проводяться  $N$  разів, що призводить до отримання результату – кількості співпадаючих пікселів, позначеної як  $K$ . Подальше визначення мінімальної кількості елементів  $K$ , які вважаються кандидатами на фон, дозволяє класифікувати піксель як фоновий. В іншому випадку вважається, що цей піксель відноситься до переднього плану. У вихідному алгоритмі ViVe, авторами запропоновано наступне правило для цього:

$$N_i = \begin{cases} 1 < R & K < \#_{min}, \\ 0 \geq R & K \geq \#_{min}. \end{cases} \quad (5)$$

Якщо  $K < \#_{min}$ , то піксель віднесений до динамічного об'єкту, в іншому випадку - до фону. В нашому випадку ми маємо інтервал невизначеності, в який може потрапити піксель, вважаючи його можливим динамічним об'єктом чи фоном. Для однозначної класифікації використовується математичний апарат теорії Демстера-Шефера [1] [2] [3] [4]. Згідно з основними положеннями цієї теорії, функція достовірності відображає суму усіх ваг підмножин  $B$  множини  $A$  (гіпотеза  $A$ ) та має наступний вигляд:

$$bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B). \quad (6)$$

Вагова функція  $m(B)$  відображає розподіл ваг певності.

Функція правдоподібності  $pl(A)$  є сумою ваг множин  $B$ , котрі перетинаються з множиною  $A$ :

$$pl(A) = \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B). \quad (7)$$

При цьому,  $bel(A) \leq P(A) \leq pl(A)$ , де  $P(A)$  точна ймовірність гіпотези  $A$ .

Давайте позначимо  $A^{R_{low}}$  як гіпотезу правильної класифікації пікселя як фону і  $A^{R_{high}}$  як гіпо-

тезу правильної класифікації пікселя як динамічного об'єкту. Тоді вагові функції цих подій можна відобразити наступним чином:

$$m(A^{R_{low}}) = \frac{K_{low}}{K}, \quad (8)$$

$$m(A^{R_{high}}) = \frac{K_{high}}{K}, \quad (9)$$

$$m(A^{R_{low}} \cup A^{R_{high}}) = \frac{K - K_{low} - K_{high}}{K}. \quad (10)$$

Для консолідації цих вагових функцій застосуємо трансформуючу довірчу модель Філіпа Сметса (Philippe Smets) [5]:

$$P_{Bel}(x) = \sum_{x \in A \subseteq X} \frac{m(A)}{|A|}. \quad (11)$$

Застосувавши зазначену модель до задачі консолідації цих вагових функцій, отримаємо дві функції довірчих моделей  $P_{Bel}(A^{R_{low}})$  та  $P_{Bel}(A^{R_{high}})$ . У випадку, якщо  $P_{Bel}(A^{R_{low}}) \geq P_{Bel}(A^{R_{high}})$ , то поточний піксель класифікується як приналежний до фону, інакше – як приналежний до динамічного об'єкта.

На етапі оновлення фонові моделі, якщо піксель  $p_i$  в поточному кадрі був класифікований як фоновий, проводяться наступні дві процедури:

Спочатку випадковим чином із множини  $M(p)$  вибирається компонента, яка замінюється значенням пікселя в поточному  $i$ -му кадрі  $v(p_i)$ ;

З околу пікселя  $p_i$  випадковим чином вибирається елемент, значення якого також буде замінено на відповідне значення пікселя в поточному кадрі  $v(p_i)$ .

Ці процедури забезпечують просторову узгодженість фонові моделі, оскільки значення фонові моделі одного пікселя також впливають на фонову модель сусідніх пікселів.

Оригінальний алгоритм ViVe має недолік, пов'язаний з появою «фантомних об'єктів» під час ініціалізації фонові моделі, що виникають при появі динамічних об'єктів. Запропоновано використовувати динамічний підхід в оновленні фонові моделі, враховуючи сусідні пікселі, з метою усунення цих артефактів. Трирівневе оточення враховує різні рівні окілності для кожного пікселя ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ), щоб забезпечити більш точне оновлення фонові моделі (див. рис. 2).

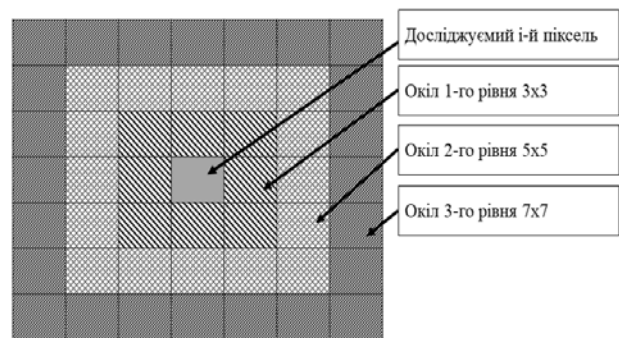


Рис. 2. Модель трирівневого околу контрольного пікселя

Для реалізації зазначеного підходу передбачено ймовірнісний вибір розміру околиці фонового пікселя під час оновлення фонові моделі. Цей вибір здійснюється на основі емпірично отриманих коефіцієнтів ( $K_{okol}^1 = 0.83$ ,  $K_{okol}^2 = 0.11$ ,  $K_{okol}^3 = 0.06$ ) та застосування рівномірного закону розподілу випадкових величин всередині кожного з трьох рівнів окільності.

Величини окільності обираються ймовірносно, де ймовірність вибору кожного рівня окільності визначається відповідними коефіцієнтами. Зокрема, використовується рівномірний закон розподілу для генерації випадкових чисел всередині кожного рівня.

Реалізація цього підходу дозволяє ефективно визначати розмір окільності фонового пікселя на основі ймовірнісного підбору, що дозволяє досягти оптимальності в процесі оновлення фонові моделі.

**2. Розробка показника ефективності виявлення об'єктів за допомогою систем відеоспостереження.** У наукових дослідженнях присвячених оцінці ефективності систем оптико-електронного спостереження, вчені розглядають різні аспекти. Наприклад, Даник Ю.Г. [6] ввів показники ефективності для оцінки виконання цільових завдань операторами. Проте ці показники не враховують параметри оптичного приймального пристрою, такого як камера відеоспостереження, та параметри пристрою відображення інформації, такого як монітор. Йонсон Дж. (Johnson J.) [7] запропонував використання свого критерію для визначення ймовірності виявлення об'єкта оператором системи відеоспостереження. Проте цей критерій не враховує деякі важливі параметри, такі як характеристики зорової системи людини та рівень освітлення. Вольмерхаузен Р.Г. (Vollmerhausen R.H.) [8] розробив показник успішності виконання завдань, який враховує параметри оптичної системи, зорової системи людини і рівень освітлення. В роботі Колобродова В.Г. та Гаврилюка А.І. [9] був запропонований аналітичний вираз для визначення ймовірності розпізнавання об'єкта в системах відеоспостереження. Однак ці методи не враховують рівень професійної підготовки людини-оператора, його ступінь втоми та кількість одночасно спостерігаємих відеоканалів. Боровик О.В. та Рачок Р.В. [10] розглядали математичний підхід для розрахунку ймовірності виявлення об'єкта технічними засобами системи оптико-електронного спостереження, з урахуванням дальності об'єкта від технічного засобу спостереження, умов спостереження та розмірів

об'єкта. Проте у цій роботі не враховано аспекти зорового сприйняття оператора, характеристики приймального оптичного пристрою (камери відеоспостереження) та параметри відображення інформації (монітора).

При оцінці ефективності функціонування систем відеоспостереження можна розглядати різноманітні критерії, які можна класифікувати за такими групами:

**Економічні критерії:** Здійснюється оцінка вартості розгорнутої системи у порівнянні з ймовірними втратами.

**Функціональні критерії:** Оцінюється ступінь відповідності функціональних можливостей системи вимогам концепції безпеки та іншим критеріям.

**Критерії ефективності:** Оцінюється, наскільки конфігурація розгорнутої системи відеоспостереження може забезпечити необхідні ймовірності виявлення загроз.

**Ефективність виявлення об'єкту інтересу чи тривожної події в секторах огляду камер відеоспостереження** можна оцінювати за такими показниками:

**Ймовірність виявлення оператором:** Ймовірність того, що людина-оператор виявить об'єкт чи подію безпосередньо.

**Ймовірність виявлення програмним алгоритмом:** Можливість програмного алгоритму виявити об'єкт чи подію.

**Ймовірність виявлення оператором за допомогою оповіщення:** Ймовірність того, що людина-оператор виявить об'єкт чи подію за допомогою сповіщення від програмного алгоритму.

Враховуючи концепцію показників ефективності виконання завдань операторами у системі відеоспостереження, які були запропоновані в роботі [6] і характеризують роботу конкретного оператора, ймовірність виявлення тривожної події самими операторами системи відеоспостереження визначається наступним чином:

$$P_{op}(A) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{op}^i), \quad (12)$$

де  $P_{op}^i$  – ймовірність виявлення тривожної події  $i$ -м оператором системи відеоспостереження.

$$P_{op}^i = K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i, \quad (13)$$

де  $K_{op}^i$  – коефіцієнт готовності  $i$ -го оператора;  
 $K_{\psi}^i$  – коефіцієнт психофізіологічної надійності  $i$ -го оператора;

$K_{bio}^i$  – коефіцієнт біологічної надійності, в тому числі функціональної придатності  $i$ -го оператора.

$$K_{op}^i = 1 - \frac{T_0 + T_{oth}}{T}, \quad (14)$$

де  $T_0$  – час, протягом якого оператор не знаходився на робочому місці;

$T_{oth}$  – час протягом якого оператор знаходився на робочому місці, але не вів спостереження за обстановкою;

$T$  – загальний час роботи оператора.

Стандарт ДСТУ EN62676-4 [11] визначає критерії ефективності для виконання оператором різноманітних завдань, таких як моніторинг, детектування, спостереження, розпізнавання, ідентифікація, інспектування. Для досягнення цих завдань визначені конкретні показники, такі як відсоток висоти кадру та густина в міліметрах на піксель. Цей стандарт також інтерпретує вимоги по категоріям відповідно до роздільної здатності монітора для різних категорій використання системи відеоспостереження.

При оцінці ймовірності виявлення об'єкта оператором системи відеоспостереження використовується критерій Джонсона [7], [12], який базується на порівнянні розміру спостерігаемого об'єкта з числом періодів штрихової міри, що йому відповідає. Ця методика включає в себе аналіз здатності оператора відрізнити об'єкти в залежності від їхнього розміру та інших параметрів.

Джонсон застосував свій підхід до визначення ефективності спостереження за військовими транспортними засобами. Він врахував різні рівні сприйняття об'єктів, такі як виявлення, орієнтація, розпізнавання та ідентифікація [13]. Критерії Джонсона використовуються для оцінки здатності оператора системи відеоспостереження виконувати різні завдання в залежності від розміру спостеріганих об'єктів.

Лабораторією NVESD (Night Vision and Electronic Sensors Directorate) був запропонований показник успішності виконання задачі, відомий як ТТР (Targeting Task Performance). Однак критерій Джонсона, як вказано, не враховує ряд важливих параметрів, таких як характеристики зорової системи людини та характеристики освітлення. Емпірична формула для розрахунку ймовірності виявлення об'єкта виглядає наступним чином [8], [16]:

$$P = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}, \quad (15)$$

$$N_{res} = \frac{\sqrt{A_{obj}} \cdot TTP}{R}, \quad (16)$$

$$E = 1,51 + 0,24 \cdot \frac{V}{V_{50}}, \quad (17)$$

де  $A_{obj}$  – площа спостерігаемого об'єкта;

$R$  – відстань до об'єкта;

$V$  – кількість штрихів, що відповідають об'єкту спостереження;

$V_{50}$  – значення критерію Джонсона для 50% ймовірності виявлення об'єкта.

$$TTP = \sqrt{TTPH \cdot TTPV}, \quad (18)$$

$$TTPH = \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \left[ \frac{C_{obj}}{CTFH_{sys}(\xi)} \right]^{1/2} d\xi, \quad (19)$$

$$TTPV = \int_{\eta_{min}}^{\eta_{max}} \left[ \frac{C_{obj}}{CTFV_{sys}(\eta)} \right]^{1/2} d\eta, \quad (20)$$

де  $TTPH$ ,  $TTPV$  – горизонтальна та вертикальна складові показника;

$\xi_{max}$ ,  $\eta_{max}$  – максимальна горизонтальна та вертикальна просторові частоти при заданому контрасті;

$\xi_{min}$ ,  $\eta_{min}$  – мінімальна горизонтальна та вертикальна просторові частоти при заданому контрасті;

$C_{obj}$  – контраст цілі відносно фону;

$CTFH_{sys}$ ,  $CTFV_{sys}$  – функція порогового контрасту (CTF – Contrast threshold function) системи для горизонтальної та вертикальної площини відповідно.

$$CTFH_{sys}(\xi) = \frac{CTF_{eye}}{MTF_{dys} \cdot MTF_{sys}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot QH_{hor} \cdot QV_{hor}}{L^2} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

$$CTFV_{sys}(\eta) = \frac{CTF_{eye}}{MTF_{dys} \cdot MTF_{sys}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot QH_{ver} \cdot QV_{ver}}{L^2} \right)^{1/2}, \quad (22)$$

де  $CTF_{eye}$  – функція порогового контрасту неозброєного ока оператора;

$MTF_{dys}$  – модуляційна передаточна функція дисплею;

$MTF_{sys}$  – модуляційна передаточна функція камери відеоспостереження;

$QH_{hor} \cdot QV_{hor}$  – ширина смуги шумів в горизонтальній та вертикальній площині відповідно;

$\alpha$  – середньоквадратичне значення шуму дисплею;

$\sigma$  – коефіцієнт пропорційності;

$L$  – яскравість дисплею.

Отже, ймовірність виявлення об'єкта залежить не лише від коефіцієнтів готовності, психофізіологічної та біологічної надійності, але також від фізично-можливої ймовірності виявлення тривожної події. Цей показник враховує параметри оптичної системи, характеристики зорової системи людини, дальність до об'єкта спостереження і інші фактори. Таким чином, ймовірність виявлення тривожної події (об'єкта) і-м оператором системи відеоспостереження може бути виражена наступним чином:

$$P_{op}^i = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i. \quad (23)$$



Вираз (23) залишається в силі для однокамерної системи відеоспостереження. Проте, у випадку використання багатоканальної системи відеоспостереження ймовірність виявлення тривожної події (об'єкта) буде зменшуватися зі збільшенням кількості камер відеоспостереження.

Якщо оператор віддає перевагу тактиці послідовного перегляду кожного відеоканалу, то час спостереження в секундах  $t$  для кожного відеоканалу складатиме приблизно 2 секунди, а час фіксації зору на кожному відеоканалі приблизно 0,3 секунди. Отже, в такому випадку, решта відеоканалів залишаються без уваги оператора.

Важливо врахувати, що фізіологічні особливості людини дозволяють спостерігати об'єкти також за допомогою периферійного зору. Зону зору людини можна розділити на наступні частини: зону центрального зору ( $5^\circ$ ), зону ясного зору (до  $30^\circ$ ), та зони периферійного зору (до  $110^\circ$ ) (див. рис. 3). Для розрахунку кута зору оператора використовується наступний вираз:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h}{2l}\right), \quad (24)$$

де  $h$  – лінійний розмір монітору;

$l$  – відстань від ока до площини монітору.

По суті, кут зору оператора визначається як кут між лініями, які з'єднують крайні точки монітору (по горизонталі або вертикалі) та точку, де знаходиться око оператора.

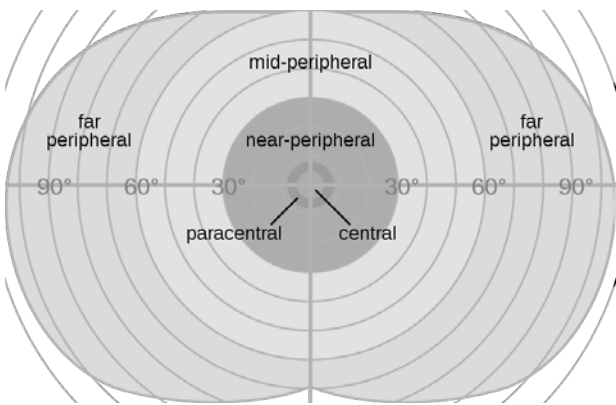


Рис. 3. Зони зору людини [17]

По факту, ймовірність виявлення об'єктів зменшується при віддаленні від центральної зони зору людини. З цією метою у вираз (30) вводиться комплексний коефіцієнт  $K_{periph}^i$  для врахування кількості камер відеоспостереження та особливостей периферійного зору людини. Відповідно, вираз (30) матиме такий вигляд:

$$P_{op}^i = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i \cdot K_{periph}^i. \quad (25)$$

Ймовірність виявлення тривожної події чи об'єкта інтересу програмним алгоритмом залежить від самого алгоритму та умов застосування. Позначимо цю ймовірність як  $P_{alg}$ . Проте виявлення тривожної події програмним алгоритмом не є результируючим показником усієї системи, оскільки алгоритм лише сповіщає оператора системи відеоспостереження про певну подію, і сам оператор приймає рішення. Очевидно, що ймовірність виявлення тривожної події операторами системи відеоспостереження з допомогою програмного алгоритму  $P_{op/alg} \leq P_{alg}$ , при цьому  $P_{op/alg} \rightarrow P_{alg}$ .

Отже, критерій ефективності виявлення об'єктів, який виражається у ймовірності виявлення тривожної події, прийме наступний вигляд:

$$P_{obj} = P_{op} \cdot P_{op/alg} + P_{op} \cdot (1 - P_{op/alg}) + P_{op/alg} \cdot (1 - P_{op}). \quad (26)$$

Для розширення можливостей застосування запропонованого критерію, вираз (26) можна записати у вигляді [18]:

$$P_{obj} = \left\{ \begin{aligned} & (1 - \prod_{i=1}^N (1 - \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i \cdot K_{periph}^i)); \\ & 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i \cdot K_{periph}^i) \cdot P_{op-alg} + \\ & + 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i \cdot K_{periph}^i) \cdot (1 - P_{op-alg}) + \\ & + P_{op-alg} \cdot (1 - 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op}^i \cdot K_{\psi}^i \cdot K_{bio}^i \cdot K_{periph}^i)). \end{aligned} \right.$$

**Висновки.** Було розроблено вдосконалений метод виявлення динамічних об'єктів у відеопослідовностях на основі алгоритму ViVe. Покращення включає в себе використання колірної схеми  $U*V*W^*$ , застосування подвійних порогових рівнів та використання елементів теорії експертних систем для усунення невизначеностей у класифікації пікселів. Для цього використовується математичний апарат теорії Демстера-Шефера, а також розроблена модель довіри за допомогою транс формуючої Філіпа Сметса (Philippe Smets). Крім того, використовується динамічний підхід у відновленні фонові моделі за рахунок інформації від сусідніх пікселів.

Запропоновано показник для оцінки ефективності виявлення об'єктів у системах відеоспостереження. Цей показник виражає ймовірність виявлення об'єкту інтересу (тривожної події) оператором чи програмним алгоритмом в залежності від дальності об'єкта до камери відеоспостере-

ження. Враховуючи параметри оптичної системи, характеристики пристрою відображення інформації (монітора), кількість камер відеоспостереження та інші фактори, запропонований показник стає індикатором ефективності функціонування системи відеоспостереження [18].

#### Список літератури:

1. Beynon M., Curry B., Morgan P. The Dempster-Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modelling. *Omega*. 2000. Вип. 28(1). С. 37–50. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(99\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00033-X).
2. Deng Y. Generalized evidence theory. *Applied Intelligence*. 2015. Вип. 43. С. 530–543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-015-0661-2>.
3. Pearl J. Reasoning with Belief Functions: An Analysis of Compatibility. *The International Journal of Approximate Reasoning*. Вип. 4, No. 5/6. С. 363–389. DOI : 10.1016/0888-613X(90)90013-R.
4. Yager R., Liu Liping. *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Berlin, 2008. 806 с.
5. Smets P., Kennes R. The Transferable Belief Model. *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Berlin : Springer, 2008. С. 693–736. DOI : [https://doi.org/10.1007/978-3-540-44792-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-540-44792-4_28).
6. Багатокритерійна математична модель формування надмірної структури системи моніторингу для ситуаційного управління її параметрами. *Проблеми телекомунікацій. / Даник Ю. Г. та ін.* 2016. Вип. 1. С. 110–123.
7. Johnson J. Analysis of image forming systems. *Proceedings of the Image Intensifier Symposium*. U.S. Army Engineer Research and Development Lab, Ft. Belvoir, VA. (DTIC report AD 220 160), . С. 249–273.
8. Vollmerhausen R., Jacobs E. The Targeting Task Performance (TTP) Metric A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. *The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance : Technical report AMSEL-NV-TR-230*. 2004. 126 с.
9. Гаврилюк А. І., Колобродов В. Г. Вплив типу та параметрів дисплея на ймовірність розпізнавання в оглядовій телевізійній системі. *Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць*. 2004. Вип. 27. С. 37–44.
10. Боровик О.В. Методика оцінки ефективності функціонування однієї вежі системи оптико-електронного спостереження. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : Військові та технічні науки*. 2016. № 4(70). С. 208–226.
11. ДСТУ EN 62676-4:2017. Системи відеоспостереження охоронного призначення. Частина 4. Правила застосування (EN 62676-4:2015, IDT). [чинний від 2017]. .
12. Sjaardema T.A., Smith C.S., and Birch G.C. History and Evolution of the Johnson Criteria : *Technical Report*. URL : DOI : 10.2172/1222446.
13. І. В. Курта, А. Е. Лагун Розроблення системи розпізнавання людських облич для відеоспостереження. *Автоматика, вимірювання та керування*. 2020. 57-66 с. DOI : <https://doi.org/10.23939/amm2020.01.057>
14. П. В. Цимбал, О. В. Линник, Я. М. Бордачова Перспективи використання технічних засобів виявлення неправдивої інформації при розслідуванні кримінальних правопорушень. *Міжнародний юридичний вісник: актуальні проблеми сучасності*. Вип. 4–5 (8–9) 2017 144-149 с.
15. Gerald C. *Electro-Optical Imaging System Performance – fifth edition*. Bellingham, USA : JCD Publishing and SPIE Press, 2008. 538 с.
16. Рибалко М. С., Микитенко В. І., Мамута О. Д. Узгодження діаметрів вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної оптико-електронної системи спостереження. *Вісник національного технічного університету України «КПІ», Приладобудування*. 2011. Вип. 42. С. 54–61.
17. Peripheral vision. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* : веб-сайт. URL : [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Peripheral\\_vision&oldid=951214281](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Peripheral_vision&oldid=951214281) (дата звернення: 09.01.2021).
18. Research of the efficiency dynamic objects detecting on the video sequence from video surveillance cameras. *Paradigm of Knowledge. / Babaryka A. O. at all.* Frankfurt, 2020.

#### **Mrak V.B., Klymash M.M., Masyuk A.R., Kolodiy T.B. METHODS AND INDICATORS OF EFFICIENCY ASSESSMENT IN THE DEVELOPMENT OF INTELLIGENT VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS**

*This study is designed to explore the most common background subtraction methods in video sequences and to utilize methods of comparative analysis and quantitative characteristics to select the best background*

*subtraction algorithms. As a result of this research, a comprehensive performance indicator for the background subtraction algorithm in video sequences obtained from stationary surveillance cameras in surveillance systems was proposed.*

*Additionally, an improved method for detecting dynamic objects in video sequences was developed in the work, based on the ViBe algorithm. The enhancements included the use of the  $U*V*W*$  color scheme, the application of dual threshold levels, and the use of elements from the theory of expert systems to eliminate uncertainties in pixel classification. This involved mathematical tools from the Dempster-Shafer theory and a trust transformation model developed by Philippe Smets. A dynamic approach was also employed in updating the background model using information from neighboring pixels.*

*A new metric for the comprehensive assessment of object detection efficiency in video surveillance systems was proposed. This metric determines the probability of an operator in a video surveillance system detecting an object of interest or triggering an alarm event, considering the influence of their own visual apparatus or the use of a software algorithm. The proposed metric reflects the functional dependence of the probability of object detection on the distance between the object and the surveillance camera. Taking into account various parameters, such as optical system characteristics, information display device properties (monitor), and the number of installed cameras, this metric is determined as a result of adherence to specific operational conditions of the surveillance system.*

*This approach allows for the consideration of various factors that may affect the process of object and event detection under different observation conditions. The metric is comprehensive, taking into account both the technical aspects of the surveillance system and the psychophysiological features of the operator, providing an objective efficiency metric.*

**Key words:** *video surveillance, intelligent video surveillance system, detection of dynamic objects, efficiency indicator, improved ViBe.*

**Нічепорук А.О.**

Хмельницький національний університет

**Бармак О.В.**

Хмельницький національний університет

**Манзюк Е.А.**

Хмельницький національний університет

**Продеус М.С.**

Хмельницький національний університет

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МЕТАМОРФНИХ ВІРУСІВ РОЗПОДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ

*Представлена стаття присвячена проблемі виявлення зловмисного програмного забезпечення, зокрема метаморфним вірусам. Складність виявлення та ідентифікації такого типу зловмисного програмного забезпечення зумовлена використанням ними технік переміщення та переписування власного коду при поширенні. Кожна нова копія, що створюється метаморфним вірусом відрізняється від вже існуючих. Зазначена особливість такого типу вірусів дозволяє нівелювати використання сигнатурного аналізу, що лежить в основі більшості сучасних антивірусних засобів. Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод виявлення метаморфних вірусів розподіленими системами на основі порівняння еквівалентних функціональних блоків. Представлений метод ґрунтується на отриманні характеристичних ознак, за якими можна ідентифікувати метаморфні віруси. Цими ознаками є кількісні показники, що визначають схожість зразків метаморфних вірусів між собою за дистанцією Дамерау-Левенштейна, кількістю операцій вставки, видалення, перестановки та співпадіння опкодів, а також за поведінкою програмою. Вихідними даними для отримання кількісних ознак є дизасембльовані лістинги операційних кодів (опкодів): підозрілої програми та її зміненої версії, що сформована в захищеному віртуальному середовищі. Формування логічної ознаки (поведінки) здійснюється на основі опрацювання послідовності API викликів функцій, що здійснює програма в процесі власного виконання. Для проведення виявлення метаморфних вірусів залучено систему нечіткого логічного висновку. Проведено експериментальні дослідження по визначенню оптимальної метрики подібності, що залучається до визначення еквівалентних функціональних блоків, а також порогу подібності функціональних блоків. В результаті проведеного експерименту ефективність виявлення метаморфних вірусів NGVCK склала 94%, а рівень хибних спрацювань 4% при порозі подібності функціональних блоків на рівні 0,6.*

**Ключові слова:** зловмисне програмне забезпечення, метаморфний вірус, NGVCK.

**Постановка проблеми.** В умовах постійного розвитку технологій та зростання віртуальних загроз, виявлення зловмисного програмного забезпечення (ЗПЗ) стає актуальним завданням для забезпечення безпеки інформаційних систем. Зловмисне програмне забезпечення включає в себе різноманітні загрози, такі як віруси, троянські програми, worms та інші форми шкідливого коду, які можуть завдати серйозної шкоди конфіденційності, цілісності та доступності інформації. Актуальність цієї проблематики визначається зростанням кількості та складності атак, які спрямовані на користувачів, компанії та урядові установи. Зловмисне програмне забезпечення може використовуватися

для крадіжки особистих даних, розповсюдження шахрайської інформації, атак на критичну інфраструктуру та інші злочинні дії.

У цьому контексті, особливу увагу слід приділити проблематиці виявлення метаморфних вірусів. Головною особливістю, що відрізняє метаморфний вірус від іншого типу ЗПЗ є використання обфускації [1]. Застосування методів обфускації дозволяє видозмінити синтаксис програмного коду, проте залишити семантичну складову роботи вірусного алгоритму. Ця особливість робить створення сигнатур для вірусного коду неможливим, що створює умови для появи нових форм шкідливого програмного забезпечення.

Також важливим фактором є доступність метаморфних генераторів, які дозволяють використовувати методи обфускації без спеціальних знань у цій області.

Таким чином враховуючи ці загрози, розробка ефективних методів виявлення ЗПЗ й, зокрема, метаморфних вірусів стає стратегічно важливою задачею для забезпечення цифрової безпеки в різних сферах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для виявлення метаморфного зловмисного програмного забезпечення відомі підходи відрізняються набором ознак, за якими здійснюється віднесення досліджуваного зразка до одного із класів – ЗПЗ або довірених додатків [2-6]. Ці ознаки можуть включати як статичні так і динамічні атрибути, такі як опкоди (кодові інструкції), структуру графу потоку керування (control flow graph), API виклики, поведінку виконуваних файлів (мережеву активність, зовнішнє середовище виконання, таке як наприклад, системний реєстр) або їх комбінації. Таким чином відомі методи можна класифікувати відповідно до способу отримання цих характеристик, що дозволяє розділити їх на статичні, динамічні та комбіновані методи виявлення [7].

При статичному аналізі ЗПЗ здійснюється дослідження зразка без його фактичного виконання. Під час статичного аналізу аналізуються вихідний код або виконуваний файл, а також його структура, без виконання фактичних операцій.

Динамічний аналіз виконується шляхом спостереження за діями програми під час її роботи в реальному або безпечному середовищі. За допомогою динамічного аналізу можна ідентифікувати поведінку, функціональність та індикатори програми, які дозволяють визначити, чи є про-

грама зляканою чи ні. Процес динамічного аналізу складається з трьох етапів: налаштування та дезінфекція середовища, виконання шкідливої програми та моніторинг та логування поведінки шкідливого програмного забезпечення.

Ще однією категорією за якою можна класифікувати відомі методи виявлення метаморфного ЗПЗ є методами опрацювання цих ознак, що включають в себе такі методи як дерева рішень, нейронні мережі, генетичні алгоритми, приховані марківські моделі, тощо.

Проте, разом із досить високою достовірністю виявлення, сучасні методи характеризуються значним рівнем хибнопозитивних та хибнонегативних спрацювань, що зменшує загальну точність виявлення метаморфних вірусів, і як наслідок задача розробки нових методів виявлення є досить важливим завданням.

**Метою статті** є аналіз методів виявлення метаморфних вірусів розподіленими системами на основі порівняння еквівалентних функціональних блоків.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Для виявлення метаморфних вірусів запропоновано метод, що складається із наступних кроків: підготовка даних, локалізація місця пошуку, пошук еквівалентних функціональних блоків, уточнення вибору еквівалентних функціональних блоків та класифікація. Розглянемо детальніше кожен крок методу. Схему функціонування методу виявлення метаморфних вірусів зображено на рис. 1.

**Підготовка даних.** Для виявлення метаморфних вірусів, як й іншого ЗПЗ, основним етапом є виокремлення характеристичних ознак, опрацювання яких засобами машинного навчання дозволяє віднести досліджувану програму до класу корисних програм чи метаморфних вірусів.



Рис. 1. Схеми функціонування методу виявлення метаморфних вірусів

У даній роботі розділимо ознаки для ідентифікації метаморфних вірусів на дві групи: кількісні ознаки та логічна ознака. Кількісні ознаки дозволяють оцінити на скільки відрізняються між собою дві версії метаморфного вірусу, в той час як логічна ознака визначає поведінку підозрілої програми. Комбінація зазначених ознак дозволяє розмежувати ситуацію при якій відмічається видозмінення коду програми, попри відсутність шкідливої активності. Така ситуація може виникнути, наприклад, коли корисні програми застосовують обфускацію до власного коду, переслідуючи при цьому ідею захисту прав інтелектуальної власності, а не механізм уникнення розпізнання антивірусною програмою.

Вихідними даними для отримання кількісних ознак є дизасембльовані лістинги операційних кодів (опкодів): підозрілої програми та її зміненої версії. Формування логічної ознаки (поведінки) здійснюється на основі опрацювання послідовності API викликів функцій, що здійснює програма в процесі власного виконання.

З метою створення зміненої версії підозрілої програми та формування її поведінки, здійснюється запуск підозрілої програми в середовищі модифікованого емулятора. Під поняттям «модифікований емулятор» розуміється захищене середовище для емуляції апаратного забезпечення комп'ютерної системи, параметри та налаштування якого змінюються при кожному новому запуску, з метою уникнення розпізнання вірусною програмою власного виконання у віртуальному середовищі [8].

Таким чином, в результаті виконання кроку підготовки даних буде отримано два лістинги опкодів (для підозрілої програми та її зміненої версії) та лістинг API викликів, що представляє поведінку підозрілої програми.

**Локалізація місця пошуку.** При вирішенні задачі виокремлення характеристичних ознак для ідентифікації метаморфних вірусів важливим етапом є визначення місця пошуку всередині програми. Оскільки, складовими одиницями у структурі виконуваних файлів PE EXE є секції, то й опрацювання даних буде здійснюється тільки у межах визначених секцій, а не у всьому виконуваному файлі. Ці обмеження місця пошуку зумовлено значними часовими та ресурсними витратами.

Визначимо поняття «секція для порівняння» як секція в структурі підозрілої програми або її зміненої версії, що використовуватиметься для виокремлення кількісних характеристичних ознак. Після визначення точки входу у програму, здійснюється

пошук секції для порівняння. Секція буде маркуватись як «секція для порівняння», якщо її ім'я належить до стандартних імен секцій, вона володіє атрибутом виконання, або якщо в секції міститься команда довгого переходу в останню секцію. Слід зазначити, що для формування кількісних ознак, локалізація місця пошуку проводиться як для підозрілої програми, так й до її зміненої версії.

**Пошук еквівалентних функціональних блоків.** Після визначення місця пошуку характеристичних ознак у підозрілій програмі та її зміненої версії наступний етап передбачає розбиття лістингів опкодів на функціональні блоки (ФБ), з метою пошуку еквівалентних частин коду – еквівалентних функціональних блоків. Порівняння еквівалентних функціональних блоків дозволить отримати кількісні ознаки, що надасть змогу оцінити на скільки дві версії метаморфного вірусу відрізняються між собою (або схожі між собою). Отриманні ознаки будуть покладені в основу вектора ознак схожості зразка коду до метаморфного вірусу.

В запропонованому методі ФБ  $FB$  буде називатись максимальна послідовність дизасембльованих інструкцій  $\{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ , що характеризується наступним властивостями: потік керування обов'язково заходить в блок через першу інструкцію; всередині блоку не може бути інструкції безумовного або умовного переходу (інструкції виклику підпрограми допускаються), всі інструкції в блоці виконуються послідовно; в кінці блоку присутня принаймні одна інструкція умовного або безумовного переходу.

З метою спрощення процесу аналізу та обробки операнди інструкцій не враховуються.

Тоді позначимо програму до емуляції через  $F_p$ , а після емуляції –  $F_s$ . Після виконання процесу дизасемблювання, з використанням інтерактивного дизасемблера IDAPro, отримаємо дві множини функціональних блоків:  $FB^{F_p} = \{fb_1^{F_p}, fb_2^{F_p}, \dots, fb_m^{F_p}\}$  та  $FB^{F_s} = \{fb_1^{F_s}, fb_2^{F_s}, \dots, fb_n^{F_s}\}$ . Тоді для пошуку еквівалентних ФБ використаємо статистичну метрику Term Frequency – Inverse Document Frequency, яка застосовуватиметься до кожного окремого функціонального блоку для програм  $F_p$  та  $F_s$ :

$$S_{FB} = \frac{n_i}{\sum_k n_i} * \log \left( \frac{N + 1.0}{n_j} \right) \quad (1)$$

де  $n_i$  – кількість входжень  $i$ -го опкоду у функціональний блок;

$k = \overline{1, k_a}$  – кількість опкодів у функціональному блоці, де  $k_a$  – загальна кількість асемблерних інструкцій;

$N$  – загальна кількість функціональних блоків, причому  $N_{F_p} \neq N_{F_s}$ ;

$n_j$  – кількість функціональних блоків в якому присутній  $i$ -й опкод.

Результатом виконання етапу обчислення статистичної оцінки присутності опкоду у ФБ для програми до емуляції  $F_p$  та програми після емуляції  $F_s$  є матриці, рядки яких визначають ФБ програми, а стовпці – опкоди, що присутні в функціональному блоці. Кожна комірка матриці визначає оцінку появи  $i$ -го опкода в  $j$ -му функціональному блоці.

Після отримання ФБ наступним кроком здійснюється визначення еквівалентних функціональних блоків. Для цього обчислюється оцінка схожості двох функціональних блоків з програми  $F_p$  та програми  $F_s$ . Для реалізації цього етапу використовуються метрики відстані.

Якщо значення оцінки схожості двох ФБ менше порогового значення  $\delta$ , тобто  $E(FB_i^{F_p}, FB_j^{F_s}) \leq \delta$ , то виконується повторне обчислення оцінки схожості для ФБ із програми  $FB_i^{F_p}$  та наступного ФБ, що слідує за блоком  $FB_j^{F_s}$ . Зазначені вище дії повторюються поки значення оцінки схожості буде менше або рівне порогового значення. Значення  $\delta$  визначається експериментальним чином.

**Уточнення вибору еквівалентних функціональних блоків.** Якщо за результатами попереднього етапу виявиться так, що одному ФБ з  $F_p$  відповідатимуть декілька ФБ із програми  $F_s$ , тоді слід додатково виконати процес уточнення вибору еквівалентних ФБ.

Задля уточнення вибору еквівалентних ФБ визначимо ймовірність слідування операційних кодів у ФБ. Для цього для кожного еквівалентного ФБ  $eFB_1^{F_s}, eFB_2^{F_s}, \dots, eFB_n^{F_s}$  та блоку  $FB_i^{F_p}$  сформуємо матрицю ймовірності слідування операційних кодів. Кожна комірка матриці скрадатиметься із відношення кількості появи пари опкодів до загальної кількості опкодів у рядку. Після отримання матриць еквівалентних ФБ для програми до та після емуляції здійснюється їх порівняння та вибір мінімальної оцінки схожості:

$$R = \frac{1}{N^2} \left( \sum_{i,j=1}^{N-1} |a_{i,j} - b_{i,j}|^2 \right), \quad (2)$$

де  $a_{i,j}$  – комірка матриці для еквівалентного ФБ  $eFB_i^{F_p}$ ,  $b_{i,j}$  – комірка матриці для еквівалентного ФБ  $eFB_j^{F_s}$ ,  $N$  – загальна кількість опкодів для пар блоків.

**Порівня ЕФБ, формування вектора ознак та класифікація.** Після отримання пар еквівалентних функціональних блоків, наступним етапом є їх порівняння із використанням метрики Дамерау-Левенштейна. В результаті порівняння пар ЕФБ здійснюється формування вектора ознак схожості зразка коду до метаморфного вірусу:

$$\overline{V}_m = \begin{matrix} L_{mod}(E), L_{med}(E), X_{mod}(E), X_{med}(E), D_{mod}(E), \\ D_{med}(E), I_{mod}(E), I_{med}(E), M_{mod}(E), M_{med}(E), Y \end{matrix}, \quad (3)$$

де  $E = \{\varepsilon_i\}_{i=1}^n$  пари еквівалентних функціональних блоків (ПЕФБ) між програмами до та після емуляції;  $n$  – загальна кількість ЕФБ;  $L_{mod}$  – модальне значення метрики Дамерау-Левенштейна між ПЕФБ  $\varepsilon_i$  програм до та після емуляції;  $L_{med}$  – медіанне значення метрики Дамерау-Левенштейна між ПЕФБ  $\varepsilon_i$  програм до та після емуляції;  $X_{mod}$  – модальне значення кількості необхідних операцій обміну опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $X_{med}$  – медіанне значення кількості необхідних операцій обміну опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $D_{mod}$  – модальне значення кількості необхідних операцій видалення операційних кодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $D_{med}$  – медіанне значення кількості необхідних операцій видалення опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $I_{mod}$  – модальне значення кількості необхідних операцій вставки опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $I_{med}$  – медіанне значення кількості необхідних операцій вставки опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $M_{mod}$  – модальне значення кількості співпадінь опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $M_{med}$  – медіанне значення кількості співпадінь опкодів між ПЕФБ для  $\varepsilon_i$ ;  $Y$  – ступінь небезпеки поведінки програми.

З метою оцінки ступеня небезпеки поведінки проводиться порівняння її поведінки із визначеним набором шкідливих поведінкових шаблонів. Якщо формується відповідність між діями підозрілої програми та одним із шкідливих шаблонів, то властивість вектора схожості для метаморфних вірусів приймає значення підозрілості (Low, Medium або High).

Для класифікації сформованого вектора ознак залучено систему нечіткого логічного висновку на основі алгоритму Мамдані [9]. Вхідними лінгвістичними виступатимуть ознаки із сформованого вектора ознак (3). В якості вихідної лінгвістичної змінної визначено ступінь подібності до метаморфного вірусу. Кожна вхідна та вихідна лінгвістична змінна задана терм-множиною: Low, Medium та High. В якості функцій приналежності для входів було обрано трапецієподібну, для виходів – трикутну.

**Експериментальні дослідження.** При визначенні кількісних ознак ключовим питанням є вибір метрик за якими буде здійснюватись визначення ЕФБ. Фактично рішення, за яким ФБ будуть вважатись еквівалентними приймається на основі того, наскільки ці блоки є схожими між собою в метричному просторі. Тому, було проведено дослідження впливу метрик подібності, а також

значення порогу подібності ФБ на загальну ефективність виявлення метаморфних вірусів.

Для проведення експерименту, в якості тестових даних, було згенерувало 210 зразків метаморфних вірусів. Тестові зразки були сформовані за допомогою метаморфного генератора NGVCK. Весь процес дослідження проводився в середовищі модифікованого емулятора на основі Qemu. В якості метрик подібності було вибрано наступні метрики: евклідова метрика ( $m^1$ ), квадрат евклідової метрики ( $m^2$ ), махтенська метрика ( $m^3$ ), метрика Чебишева ( $m^4$ ) та метрика Мінковського ( $m^5$ ).

Таблиця 1

**Залежність ефективності виявлення метаморфних вірусів NGVCK від метрики та значення порогу подібності ФБ**

| Поріг подібності двох ФБ | m1   | m2   | m3   | m4   | m5   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| $\delta=0,5$             | 0,87 | 0,83 | 0,87 | 0,78 | 0,81 |
| $\delta=0,6$             | 0,88 | 0,86 | 0,88 | 0,83 | 0,86 |
| $\delta=0,7$             | 0,92 | 0,86 | 0,82 | 0,79 | 0,82 |
| $\delta=0,5$             | 0,87 | 0,91 | 0,81 | 0,91 | 0,81 |
| $\delta=0,6$             | 0,89 | 0,92 | 0,84 | 0,88 | 0,82 |
| $\delta=0,7$             | 0,84 | 0,86 | 0,84 | 0,87 | 0,83 |
| $\delta=0,5$             | 0,84 | 0,81 | 0,78 | 0,91 | 0,78 |
| $\delta=0,6$             | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,94 | 0,83 |
| $\delta=0,7$             | 0,73 | 0,82 | 0,83 | 0,88 | 0,82 |
| $\delta=0,5$             | 0,85 | 0,82 | 0,84 | 0,91 | 0,86 |
| $\delta=0,6$             | 0,84 | 0,86 | 0,88 | 0,9  | 0,87 |
| $\delta=0,7$             | 0,86 | 0,81 | 0,79 | 0,87 | 0,82 |
| $\delta=0,5$             | 0,74 | 0,82 | 0,85 | 0,84 | 0,75 |
| $\delta=0,6$             | 0,75 | 0,82 | 0,87 | 0,81 | 0,82 |
| $\delta=0,7$             | 0,72 | 0,74 | 0,79 | 0,75 | 0,8  |

В результаті проведеного експерименту ефективність виявлення метаморфних вірусів NGVCK

склала 94% (табл. 1). Для досягнення такого результату на етапі вибору еквівалентних функціональних блоків залучено манхтенську метрику зі значенням порогу подібності  $\delta = 0.6$ . При такому значенні ефективності виявлення хибні спрацювання склали близько 4%. Стосовно залежності кількості еквівалентних функціональних блоків від значення порогу подібності, то слід відмітити, що при зменшенні значення порогу збільшувалась кількість ЕФБ. Теоретично встановлення мінімального значення порогу подібності призведе до ситуації, при якій одному функціональному блоку підозрілої програми будуть еквівалентними всі функціональні блоки її зміненої версії, що є невірним.

**Висновки.** В роботі запропоновано метод виявлення метаморфних вірусів, що заснований на виділенні характеристичних ознак для ідентифікації метаморфних вірусів. Цими ознаками є кількісні показники, що визначають схожість зразків метаморфних вірусів між собою за дистанцію Дамерау-Левенштейна, кількістю операцій вставки, видалення, перестановки та співпадіння опкодів, а також за поведінкою. Вихідними даними для отримання кількісних ознак є дизасембльовані лістинги опкодів: підозрілої програми та її зміненої версії, що сформована в захищеному віртуальному середовищі. Формування логічної ознаки здійснюється на основі опрацювання послідовності API викликів функцій, що здійснює програма в процесі власного виконання.

Проведено експерименти по визначенню оптимальної метрики подібності, що залучається до визначення еквівалентних функціональних блоків. В результаті проведеного експерименту ефективність виявлення метаморфних вірусів NGVCK склала 94%, а рівень хибних спрацювання 4% при порозі подібності функціональних блоків на рівні 0,6.

**Список літератури:**

1. Savenko O., Lysenko S., Nicheporuk A., Savenko B. Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search *CEUR-WS*. 2017. 1844. Pp. 555–569.
2. Jha A.K., Vaish A., Patil, S. A Novel Framework for Metamorphic Malware Detection. *SN Computer Science*. 2023. 4, 10. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01433-1>
3. Sahay S.K., Sharma A., Rathore H. Evolution of Malware and Its Detection Techniques. *Information and Communication Technology for Sustainable Development. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019. 933. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7166-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7166-0_14)
4. Alsmadi T., Alqudah N. A Survey on malware detection techniques, *2021 International Conference on Information Technology (ICIT)*, Amman, Jordan, 2021, Pp. 371–376, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT52682.2021.9491765>.
5. Mohammed A. F., Marhusin M. F., Sulaiman R., Instrumenting API Hooking for a Realtime Dynamic Analysis, *2019 International Conference on Cybersecurity*, Negeri Sembilan, Malaysia, 2019, Pp. 49-52, doi: <https://doi.org/10.1109/ICoCSec47621.2019.8971017>.



6. Verma A. K., Sharma S. K., Malware Detection Approaches using Machine Learning Techniques-Strategic Survey, 2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, Greater Noida, India, 2021, Pp. 1958-1962, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAC3N53548.2021.9725369>.

7. Yang Y., Li Z., Wang H., Xu C., Ma X., Towards effective metamorphic testing by algorithm stability for linear classification programs. Journal of Systems and Software. 2021. 180. 111012.

8. Нічепорук А.О., Нічепорук Ю.О., Савенко Б.О., Стецюк М.В. Використання модифікованих емуляторів для виявлення метаморфних вірусів в корпоративній мережі. Вісник Хмельницького національного університету: Серія «Технічні науки». Хмельницький, 2017, № 2. С. 199–207.

9. Нічепорук А.О. Використання нечіткої класифікації для виявлення метаморфних вірусів в корпоративній мережі Вісник Хмельницького національного університету: Серія «Технічні науки». Хмельницький. 2016. № 4. С. 128–132.

#### **Nicheporuk A.O., Barmal O.V., Manziuk E.A., Prodeus M.S. THE METHOD OF DETECTION OF METAMORPHIC VIRUSES BY DISTRIBUTED SYSTEMS BASED ON COMPARISON OF EQUIVALENT FUNCTIONAL BLOCKS**

*The presented article is devoted to the problem of detecting malicious software, in particular metamorphic viruses. The difficulty of detecting and identifying this type of malicious software is due to their use of techniques of substitution and rewriting their own code during propagation. Each new copy created by the metamorphic virus is different from the existing ones. This feature of this type of virus allows to eliminate the use of signature analysis, which is the basis of most modern antiviruses. To solve this problem, a method of detection of metamorphic viruses by distributed systems based on comparison of equivalent functional blocks is proposed. The presented method is based on obtaining characteristic features that can be used to identify metamorphic viruses. These features are quantitative indicators that determine the similarity of samples of metamorphic viruses to each other by the Damerau-Levenshtein distance, the number of operations of insertion, deletion, permutation and coincidence of opcodes, as well as by the behavior of the program. The source data for obtaining quantitative features are the disassembled listings of operational codes (opcodes): the suspicious program and its modified version, formed in a protected virtual environment. The formation of a logical feature (behavior) is carried out on the basis of the processing of the sequence of API calls of functions carried out by the program in the process of its own execution. A fuzzy logic inference system is used to detect metamorphic viruses. Experimental studies have been carried out to determine the optimal metric of similarity, which is involved in the definition of equivalent functional blocks, as well as the threshold of similarity of functional blocks. As a result of the conducted experiment, the detection efficiency of NGVCK metamorphic viruses was 94%, and the level of false positives was 4% at a threshold of similarity of functional blocks at the level of 0.6.*

**Key words:** malware, metamorphic virus, NGVCK.

**Oleshchenko L.M.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## INTERCITY PASSENGER FLOW FORECASTING AND MTE BUSES OPTIMAL OPERATION USING LSTM NEURAL NETWORK

*The article presents an analysis of existing software and software platforms for intelligent data analysis that are used to forecast passenger flow between cities. The main statistical methods used for forecasting passenger flow between cities are given. In the research, a software method of data collection and passenger flow forecasting on intercity routes of Ukraine using LSTM neural network is proposed. Data on passenger flows between the cities of Chernihiv and Kyiv from 2011 to 2015 were used for learning and training the neural network. The Python programming language and the Flask web framework were used to develop the software, in particular, the prediction module. Studies have shown the effectiveness of using the LSTM neural network in comparison with such statistical forecasting methods as linear trend, logarithmic trend, moving average, Holt-Winters exponential smoothing. The proposed software makes it possible to make an optimal plan for the use of the buses based on the forecast value of the passenger flow and the mathematical programming model for the given structure of the rolling stock of the MTE. The LSTM model can be effective for medium-term passenger flow forecasting on long-distance routes because it can take into account long-term time series dependencies such as seasonality and trends. However, it is important to note that LSTM can tend to overfit on small amounts of data, and this can be computationally expensive, especially with large data sizes. In addition, LSTM may not perform effectively under unstable or variable conditions that may occur in the field of passenger flow forecasting.*

**Key words:** software, Python programming language, machine learning, LSTM neural network, forecasting, data mining software platforms, passenger flow, data processing, intercity passenger transportation, MTE, optimization, buses, mathematical programming.

**Problem statement.** The forecasting of intercity passenger flow involves a combination of mathematical and software methods to analyze historical data, identify patterns, and predict future trends. One mathematical method commonly employed is time series analysis, where historical passenger data is examined to understand patterns and variations over time. This involves techniques such as moving averages, exponential smoothing, and autoregressive integrated moving average (ARIMA) models. Additionally, machine learning algorithms, including neural networks like the Long Short-Term Memory (LSTM) model, are increasingly used for their ability to capture complex patterns and dependencies in data. On the software side, forecasting tools and platforms equipped with advanced analytics and machine learning (ML) capabilities provide a user-friendly interface for transportation analysts and planners to apply these mathematical methods effectively. The integration of these mathematical and software approaches allows for accurate predictions, facilitating optimized planning and resource allocation in intercity passenger transportation systems of the motor transport enterprise (MTE).

**The purpose of this research** is to analyze and improve existing methods of intercity passenger flow

forecasting and optimizing MTE buses utilization using LSTM neural network.

**Related research and existing software solutions analysis for forecasting passenger flow between cities.** Forecasting passenger flow between cities involves a combination of statistical methods and machine learning algorithms, depending on the complexity of the data and the accuracy required [1–7]. ARIMA models are widely used for time series forecasting. They can capture trends, seasonality, and other patterns in historical passenger flow data. Simple linear regression can be used to establish relationships between passenger flow and various predictor variables, such as economic indicators, population growth, or events.

Holt-Winters exponential smoothing method is suitable for time series data with trend and seasonality. It considers three components: level, trend, and seasonality. By assigning weights to recent observations, this method adapts to changing patterns over time. The level represents the average value, the trend captures the direction, and seasonality accounts for repeating patterns. The method involves updating these components iteratively to make accurate predictions, making it particularly effective for time series forecasting, including passenger flow in transportation systems.

Bayesian approaches can incorporate prior knowledge and update predictions based on new data. Bayesian models are useful when dealing with uncertainty in passenger flow forecasts. Random Forests can handle non-linear relationships and interactions between variables. They are robust and effective for forecasting when there are multiple factors influencing passenger flow.

LSTM networks are a type of recurrent neural network (RNN) designed for sequence data. They can capture long-term dependencies and are suitable for time series forecasting (Fig. 1).

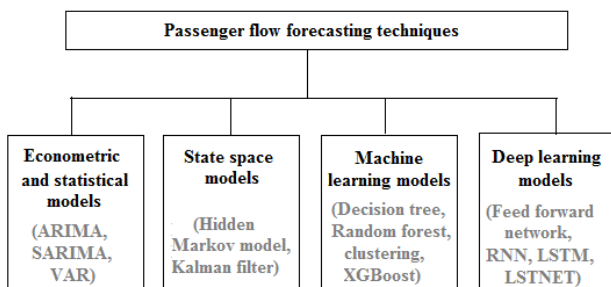


Fig. 1. Passenger flow forecasting techniques [1–7]

SVR (Support Vector Regression) is effective for regression tasks, including forecasting. It works well in high-dimensional spaces and is robust to outliers. XGBoost and LightGBM are gradient boosting algorithms that can handle complex relationships and non-linearities. They often perform well in forecasting tasks. K-Nearest Neighbors (KNN) can be used for regression tasks by predicting the average or weighted average of the  $k$ -nearest neighbors. It's a non-parametric algorithm suitable for various data distributions.

Combining multiple models through ensemble methods can improve overall forecasting accuracy. For instance, combining the predictions of different machine learning algorithms. Clustering can be applied to identify patterns in passenger behavior or to group cities with similar traffic characteristics. A hybrid approach, combining statistical methods with ML algorithms, is often employed for more accurate and robust predictions. Software solutions exist for forecasting passenger flow between cities, offering advanced analytical tools and models to aid in decision-making for transportation planners. These solutions integrate mathematical models and ML algorithms.

TransCAD is a transportation planning software that integrates GIS (Geographic Information System) with transportation modeling. It allows for the analysis of intercity passenger flows, considering factors like demographics, land use, and transportation infrastructure (Fig. 2).

TensorFlow and PyTorch are popular open-source ML libraries that can be used for building predictive models. Data scientists and transportation analysts can leverage these platforms to implement ML algorithms, including neural networks like LSTM, for passenger flow forecasting.

TensorFlow is designed to scale seamlessly from mobile devices to large-scale distributed systems. This scalability is crucial for handling large datasets and complex models in passenger forecasting scenarios.

PyTorch's dynamic computational graph allows for more intuitive model development and easier debugging. This flexibility is advantageous when experimenting with different model architectures for passenger forecasting. PyTorch provides TorchServe, a flexible

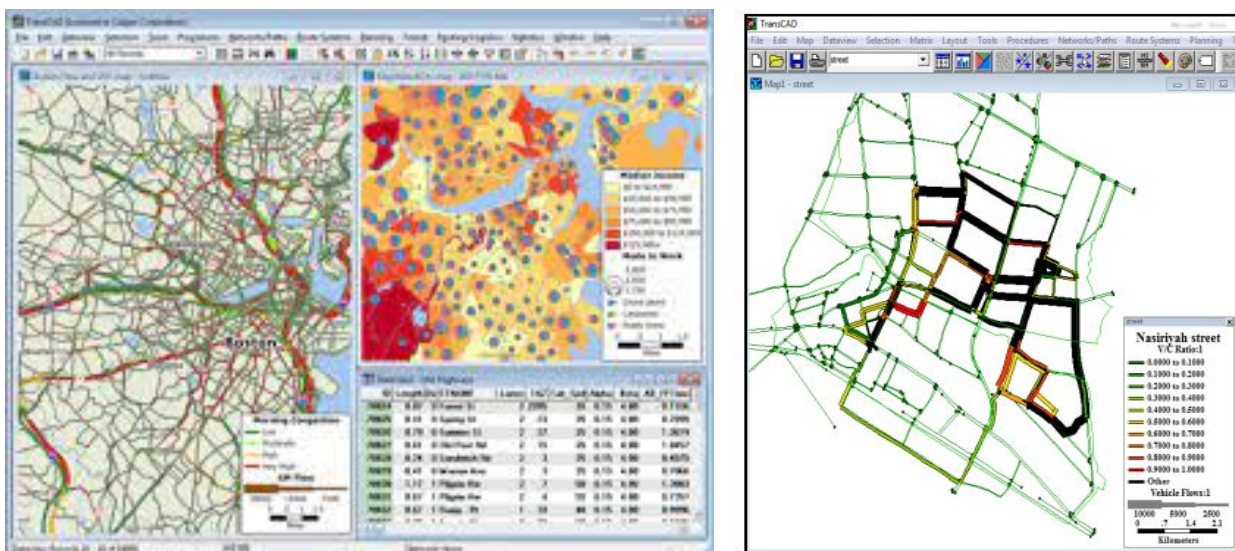


Fig. 2. TransCAD transportation planning software [8]

and easy-to-use library for serving PyTorch models in production environments. This can aid in deploying and managing passenger forecasting models at scale.

RapidMiner is a predictive analytics platform that offers a visual interface for designing, testing, and deploying predictive models. It supports ML algorithms and can be used for forecasting passenger flow based on historical data (Fig. 3).

RapidMiner allows the integration of various data sources, enabling to combine historical passenger data with other relevant information such as weather, holidays, events, or transportation schedules. This comprehensive dataset can improve the accuracy of passenger forecasting models. The platform provides tools for cleaning, transforming, and pre-processing data. This is crucial for passenger forecasting as it helps in handling missing values, outliers, and ensuring data quality, which is essential for building accurate predictive models.

RapidMiner supports a wide range of ML algorithms, including regression, classification, and time series analysis to build models for passenger demand prediction based on historical patterns, allowing transportation providers to optimize resource allocation and improve service efficiency.

RapidMiner offers AutoML capabilities, which can automate the process of selecting and tuning ML models. This is particularly useful for those who may not have extensive data science expertise but still want to harness the power of advanced analytics for passenger forecasting. Given that passenger forecasting often involves time-dependent data,

RapidMiner's capabilities in time series analysis can be beneficial. It allows for the identification of temporal patterns and trends that can be used for more accurate predictions.

RapidMiner supports ensemble learning techniques, where multiple models are combined to improve predictive performance. This can be useful in passenger forecasting scenarios where different factors may influence demand, and combining multiple models can provide more robust predictions.

The platform provides tools for visualizing data and model outputs. Clear visualizations can help transportation providers understand the patterns and trends in passenger data, facilitating informed decision-making.

RapidMiner is designed to handle large datasets and can scale to meet the demands of forecasting for transportation systems with significant passenger volumes. Depending on the specific requirements, RapidMiner can be used to deploy models for real-time predictions. This is crucial for dynamic situations where passenger demand patterns may change rapidly.

While not dedicated forecasting tools, data visualization platforms like Tableau and Power BI can be integrated with predictive models. They enable users to create interactive dashboards and visualize forecasted passenger flow trends, making it easier for stakeholders to understand the insights.

In general the passenger flow forecasting process is shown in Fig. 4.

While mainly used for traffic simulation, VISSIM can be employed to model and simulate intercity

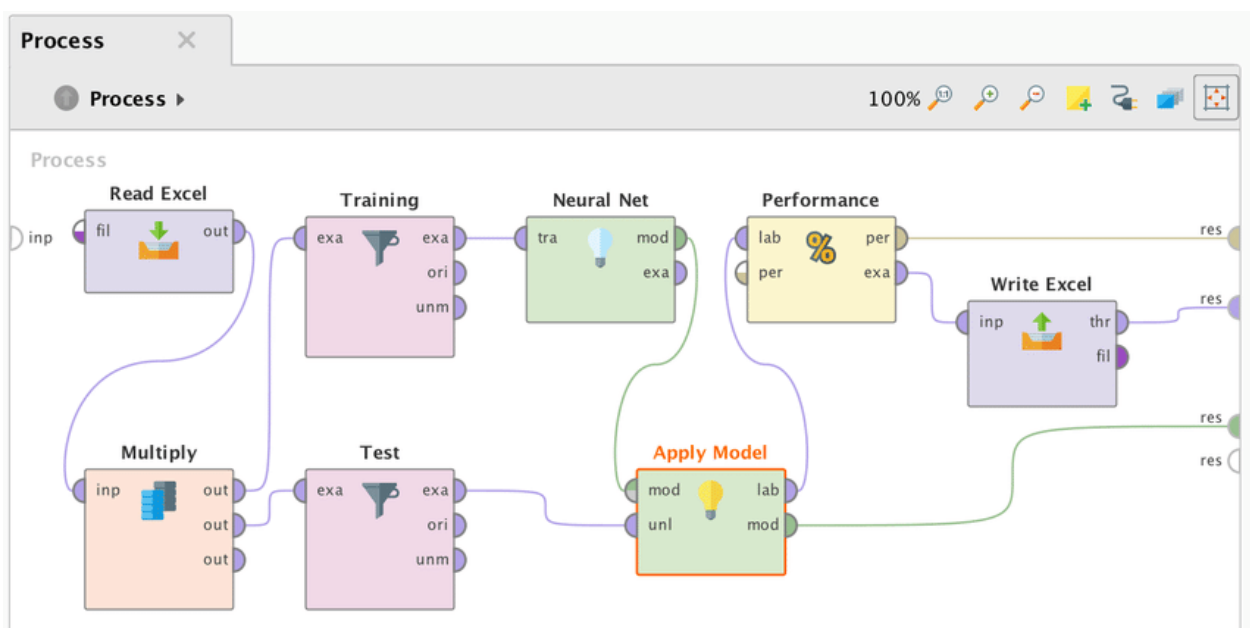


Fig. 3. RapidMiner process model for forecasting

passenger flow scenarios. It helps in understanding the impact of different factors on traffic flow and can aid in forecasting based on simulation results. Analysts often use statistical analysis tools like R and Python to perform in-depth statistical analysis on historical data. The *statsmodels* library in Python provides statistical models suitable for time series analysis and forecasting. These software solutions offer a range of capabilities, from basic statistical analysis to advanced ML models, providing transportation planners with valuable insights for forecasting intercity passenger flow.

**Intercity passenger flow forecasting using LSTM neural network.** To forecast time series data on passenger flow between Chernihiv and Kyiv cities of Ukraine, we first process the passenger data stored on a secure cloud service. The synchronized data is then formatted into a .xls file. Research experiment uses time series data from 2011 to 2015 (data about passenger flow for every hour). For LSTM-based passenger flow prediction, we follow next steps.

1. Collect training data.
2. Prepare and organize the data (removing outliers, replacing missing values, smoothing noisy data, correcting inconsistent data).
3. Choose the neural network topology (layers and feedback). Analyze the characteristics of passenger flow data. Understand the patterns, trends, and any potential seasonality. Determine the appropriate sequence length for time series data. Experiment with different sequence lengths to find the optimal one. Choose the number of LSTM layers and hidden units in each layer. This depends on the complexity of the data. More complex patterns may require a deeper network with more hidden units.
4. Experimentally select network characteristics.
5. Empirically determine training parameters.
6. Train the neural network.

7. Validate training adequacy.
8. Adjust parameters based on validation.

Python, with the Keras library, is used for forecasting implementation. Passenger data input depends on lot size, time steps, and hidden size (Fig. 5).

The output is directed to a layer *TimeDistributed*. The final layer employs a *Softmax* activation. This result is compared to training data in batches, initiating error computation and backpropagation gradient flow. Training data, represented by inputs  $x$ , are processed one time step at each instance, predicting the subsequent sequence value. This occurs at every step, aligning the output layer with the same number of time steps as the input layer.

To format predictions suitably for an LSTM model, each unique value in the dataset is assigned a distinct integer index. The corpus is then reordered with integer identifiers in place of values using functions such as *read\_appointment*, *build\_appointment*, and *file\_to\_ids*. This assigns a unique integer to each distinct value. Ultimately, the output file is transformed into a list of these unique integers, enabling its utilization in a neural network.

The initial layer in the network, depicted in the architecture diagram, is the embedding layer. This layer transforms integer references (entries) into meaningful contribution vectors. Monitoring the tensor shape in the network is crucial. For the input layer, it's (*batch\_size*, *num\_steps*), and the output is (*batch\_size*, *num\_steps*, *hidden\_size*). In the Sequential model, the batch size is consistently the first dimension. The batch size is obtained from the fitting function (like *fit\_generator*), making it less frequently specified.

The subsequent layer is the first of two LSTM layers. To configure an LSTM layer, we specify the number of nodes in the hidden layers within the LSTM cell (e.g., cells in the forgotten gate step). The code also includes

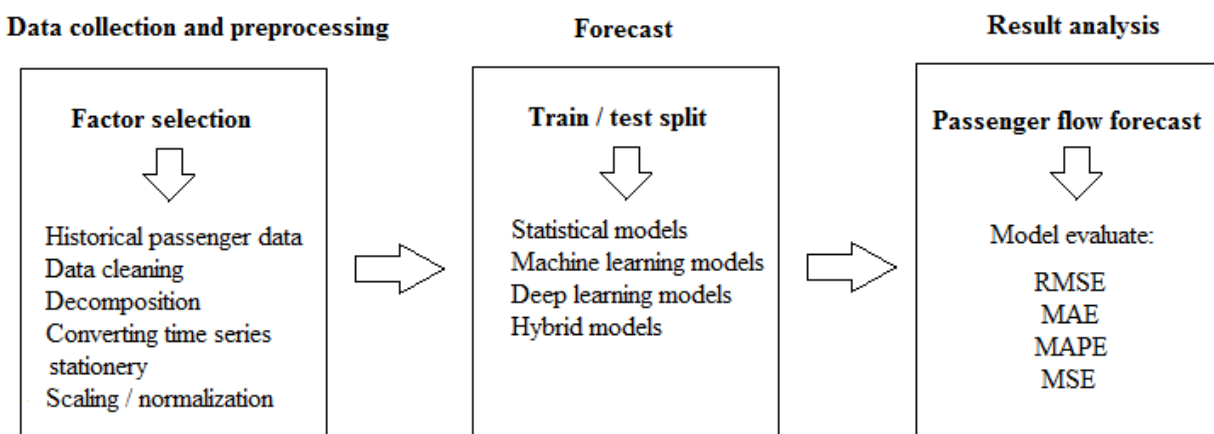


Fig. 4. Passenger flow forecasting process

the *return\_sequences=True* argument, ensuring the LSTM cell produces outputs from all time steps. Without this argument, only the output from the last time step is returned. The LSTM client layer processes input in two layers, and the output is compared to training data in batches. To ensure correct sequencing for predictions, unique whole indices are assigned to each value in the data. The re-indexed output facilitates neural network forecasting. During training, data is fed in small batches using the *fit\_generator* function from Keras. The first network layer converts integer references to weight vectors, taking the number of passengers and resulting vector size as arguments. The subsequent parameter is the number of iterations per training epoch. Setting it as  $len(train\_data) // (batch\_size * num\_steps)$  ensures that the entire dataset is processed through the model during each epoch. Likewise, the generator is invoked for the smaller validation dataset with the same iteration argument.

After each epoch, the model assesses the validation data for accuracy. The previously described checkpoint type callback is then incorporated via the *callbacks* parameter in the *fit\_generator* function.

To achieve satisfactory results, the model should undergo numerous epochs, and it needs to exhibit a considerable level of complexity. Running it on a CPU might take a substantial amount of time, so it is advisable to utilize a machine with a robust GPU. If a GPU-equipped machine is unavailable, an alternative is to create an Amazon EC2 instance.

Prior to making forecasting, it is essential to label the initial time series. The commonly employed approach for this task is the window sliding algorithm. This algorithm operates on the principle of utilizing the data at time step  $(t+1)$  as the label for the data at time step  $t$ , thereby generating a corresponding set of labels.

Following the LSTM layer in neural network, there is a precautionary filter layer. Subsequently, there is a specialized layer for periodic neural networks known as *TimeDistributed*. This layer allocates a distinct layer for each stage in the periodic model. For instance, if the model has 10 time steps, a *TimeDistributed* layer operating on the dense layer will generate 10 separate dense layers, one for each time step. The activation for these dense layers is configured as *Softmax* in the concluding layer of our LSTM model.

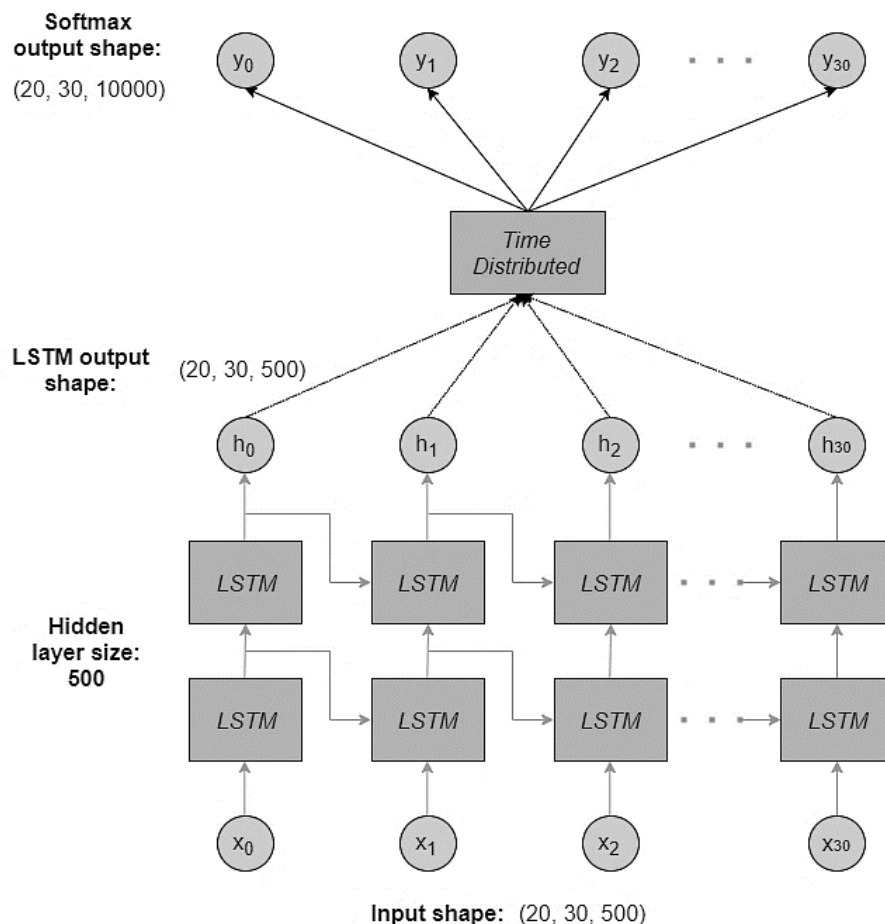


Fig. 5. LSTM neural network model

Ran the model up to 40 epochs and got some initial results. Model parameters for the results below are:

- *num\_steps=30*
- *batch\_size=20*
- *hidden\_size=500*

After 40 epochs, the accuracy of the training dataset was about 98%, and the accuracy of the validation set was about 96%.

To test the LSTM model, we compare projected and actual values in both training and testing sets. The model is reinitialized with trained data, and fictitious data is extracted from the generator to assess predictive accuracy. The relative forecasting error during adaptation is less than 5%, as shown in Table 1 comparing actual and predicted values [9]. The learning algorithm's completion fine-tunes synoptic weighted connections to establish a dependable association between inputs and outputs. During the testing and validation phase, these established connections remain constant, while new inputs are introduced to generate a sequence of outputs. These outputs are then compared with a set of test data representing the actual results.

Table 1

**Results of forecasting**

| Actually values | Predicted values (100 epochs) | Predicted values (400 epochs) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 20              | 20                            | 20                            |
| 32              | 28                            | 32                            |
| 50              | 46                            | 48                            |
| 60              | 62                            | 60                            |
| 100             | 100                           | 100                           |
| 34              | 70                            | 32                            |
| 38              | 38                            | 38                            |

If the disparity between the actual output and the test output exceeds a predefined error threshold, it becomes necessary to adjust the training and reconfigure the neural network. We assess the effectiveness of forecasting methods, including linear trend, logarithmic trend, moving average, Holt-Winters exponential smoothing, and LSTM, in predicting passenger flow. Table 2 illustrates the forecast accuracy achieved by these methods [9].

Table 2

**Metrics measuring the precision of predictions employing various methods**

| Forecasting method                 | Forecast accuracy |
|------------------------------------|-------------------|
| Moving average                     | 0.961             |
| Holt-Winters Exponential Smoothing | 0.933             |
| Linear trend                       | 0.930             |
| Logarithmic trend                  | 0.901             |
| Long short-term memory (LSTM)      | 0.983             |

**Software method of optimizing buses utilization.** To improve the quality of passenger service and the competitiveness of the MTE, there is a need to create feedback from passengers. In addition to the main goal – the transportation of passengers, ensuring a comfortable trip for passengers is also a key issue of profit for MTE. Providing comfortable transportation and efficient planning of buses is important. Traditional approaches are based on fixed schedules. Using this software method to process real-time intercity passenger flow data will provide new opportunities and data-driven approaches to meet passenger demand.

When developing this software system, it was assumed that the end user (MTE manager) has the following capabilities:

- add, edit and delete trip records;
- add, edit information about drivers;
- view and edit the schedule;
- predict the number of passengers for the required time, date and route;
- to simulate the most convenient and most profitable rolling stock.

Functional requirements of proposed software are next.

1. The software should provide the prediction result in the corresponding window.

2. The software should provide an opportunity to enter the necessary data using the fields in the corresponding window.

3. The user must be able to select the required date, time and route using the selectors in the corresponding window.

4. Training data should be read from a csv file.

5. In the schedule window, the system should show all planned and executed trips.

6. When clicking on an empty window, a trip should be created and the number of passengers can be predicted at the moment.

The architecture of proposed software system is shown in Fig. 6.

The following components can be distinguished in the software architecture:

1) server for working with records, database and neural network;

2) user interface – a component used by the user to create trips and forecast;

3) neural network – a component of the method that is called from the server for predicting passenger flow.

Flask web framework for Python, which is used for software development, offers numerous benefits for web development. Its simplicity and minimalism

make it easy to learn and quick to set up, allowing developers to focus on building features rather than navigating through a complex structure.

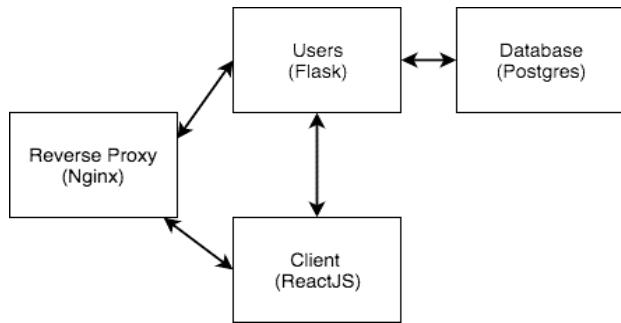


Fig. 6. The architecture of the software system

Flask follows the WSGI standard, ensuring compatibility with various web servers and deployment options. Its modular design encourages the use of extensions, allowing developers to integrate only the components they need for their specific project, promoting scalability and maintainability. Additionally, Flask supports Jinja2 templating, facilitating the creation of dynamic and interactive web applications. Overall, Flask's flexibility, ease of use, and community support make it an excellent choice for developing web applications ranging from small projects to more complex, scalable solutions.

The React JS framework was used to create the client part of the software (Fig. 7). The unidirectional data flow in React simplifies state management, enhancing predictability and maintainability of the codebase. Its extensive ecosystem and a large community contribute to the availability of numerous pre-built components and libraries, streamlining development and reducing the need to build functionalities from scratch. Furthermore, React's ability to seamlessly integrate with other libraries and frameworks and its support for server-side rendering enhance its versatility for building scalable and interactive web applications.

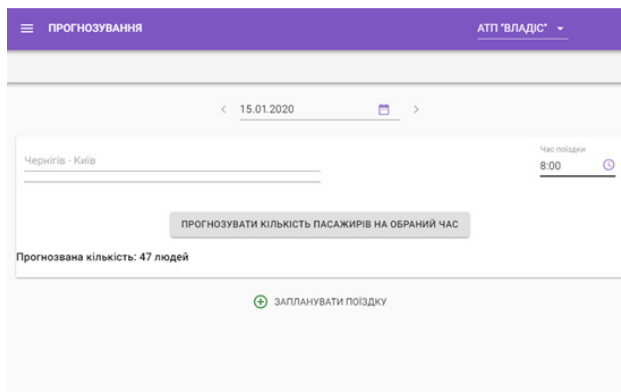


Fig. 7. Forecast window view

PostgreSQL, often referred to as Postgres, is a powerful open-source relational database management system (RDBMS) known for its robust features, extensibility, and adherence to SQL standards. The predicted passenger flow values obtained as a result of using the LSTM model are further used for optimal use of the MTE buses.

The expenses associated with MTE are categorized into two main types: permanent costs, which are fixed and cannot be eliminated (e.g., land lease, taxes), and variable costs linked to the production of goods and services.

The profit of an MTE is calculated as the disparity between total income and the combined expenses of both permanent and variable costs:

$$P = D - V_1 - V_2, \tag{1}$$

where  $D$  is the amount of income related to passenger flow and the cost of tickets,  $V_1$  is the cost of vehicle maintenance (including drivers' salaries), depending on the choice of buses,  $V_2$  is general production costs (the content of the control apparatus, production premises, social deductions, etc. further), which do not depend on the types of buses operating on the route.

Then the task of maximizing profits ( $P \rightarrow \max$ ) is reduced to the problem of minimizing expenses ( $V_1$ ) for maintenance of the buses, which can be represented as:

$$V_1 = \sum_{j=1}^4 \left( \left( \frac{s_0}{\tau_0} \right) \cdot \gamma_j + z \right) \cdot K_{1j} \rightarrow \min \tag{2}$$

and restrictions on the number of transported passengers per hour and the total number of seats in buses:

$$F_1 \leq \sum_{j=1}^4 (K_{1j} \cdot N_j), \tag{3}$$

the average time interval  $\bar{\tau}_1$  for buses shall not be greater than the specified  $\tau_1^+$ :

$$\bar{\tau}_1 = \frac{1}{K_1} \leq \tau_1^+, \tag{4}$$

where  $\gamma_j$  is the direct material costs (UAH/km),  $z$  is the drivers salary (UAH/hour),  $K_{1j}$  and  $N_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) – accordingly, the number of buses and seats in them,  $K_1 = \sum (K_{1j})$  – the types of buses,  $\tau_0$  and  $s_0$  are hours and the length of the route.

The act of inputting symbols into the system  $a_j = \frac{s_0}{\tau_0} + z$ ,  $x_j = K_{1j}$ , signifies the initiation of a linear programming problem. In this context, the task can be formulated with a specific target function:

$$V_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \rightarrow \min, \tag{5}$$

with the limitations:

$$\begin{cases} c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 \geq F_1, \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq \frac{1}{\tau_1^+}, \\ 0 \leq x_j \leq \mu_j, j = 1, 2, 3, 4, \end{cases} \tag{6}$$

where  $\mu_j$  – restriction on the availability of the relevant type of buses.

The average bus occupancy rate is determined by the ratios  $\bar{\varepsilon}_1$ :



$$F_1 = \sum_{j=1}^4 (\varepsilon_{1j} \cdot K_{1j} \cdot N_j), \quad \bar{\varepsilon}_1 = \frac{F_1}{\sum_{j=1}^4 (K_{1j} \cdot N_j)} \quad (0 < \bar{\varepsilon}_1 \leq 1) \quad (7)$$

where  $\varepsilon_{1j}$  – fillfactor for  $j$ -th bus. To incorporate this model seamlessly into information technology for the purpose of establishing the most efficient arrangement of buses in MTE, the following scheme is suggested (Fig. 8) [10].

The software employs an LSTM model to predict passenger flow for a chosen route on a given day and recommends an optimal vehicle schedule for the specified hour (Fig. 9).

**Conclusions and future work.** This research proposes a software method for data collection and forecasting of passenger flow on intercity routes of Ukraine using the LSTM neural network. Studies have shown the effectiveness of using the LSTM neural network in comparison with known statistical forecasting methods. The proposed software system allows to create an optimal plan for the use of the car fleet based on the forecast value of the passenger flow. The LSTM model can be effective for medium-term passenger flow forecasting on long-distance routes because it can take into account long-term dependencies in time series, such as seasonality and trends. However, it is important to note that LSTM can have a tendency to overtrain on small amounts of data, and it can be computationally expensive, especially with large data sizes. In addition, it may not work effectively under unstable or changing conditions that may occur in the field of transportation forecasting.

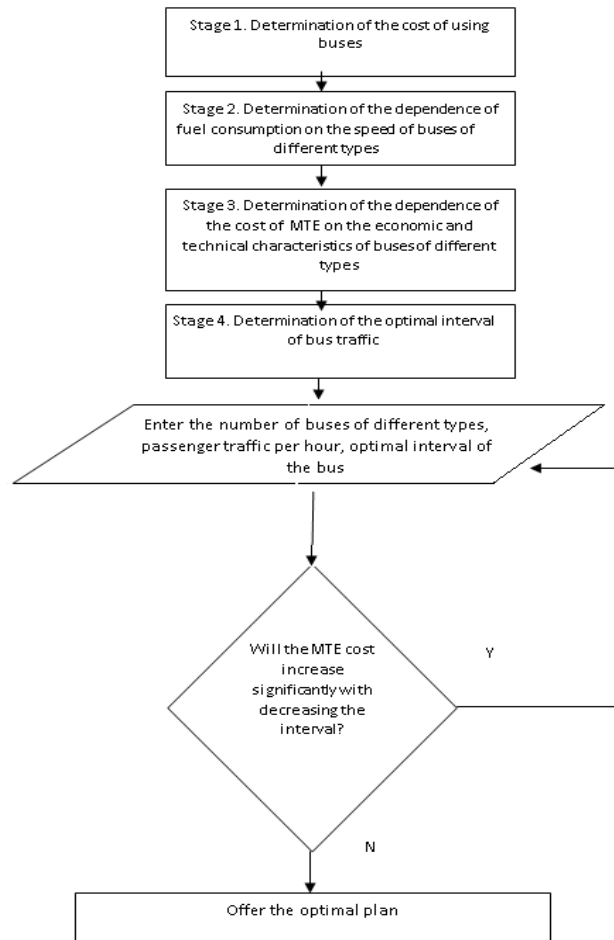


Fig. 8. Scheme of information technology offering the optimal structure of vehicles

Date

Forecast

| Час | Прогноз |
|-----|---------|
| 5-6 | 30      |
| 6-7 | 40      |
| 7-8 | 60      |
| 8-9 | 100     |

Optimal plan of vehicles

| Час | № ТЗ      | Тел. водія |
|-----|-----------|------------|
| 5-6 | CB 453 88 | 063697575  |
| 6-7 | CB 785 88 | 067867878  |
| 7-8 | CB 365 88 | 077867456  |
| 8-9 |           |            |

Save Schedule

Confirm

Remove

Fig. 9. Finding the forecast value of the passenger flow on the selected date and selecting the optimal vehicle plan for the selected hour

**Bibliography:**

- Bandara K., Bergmeir C., Smyl S. Forecasting across time series databases using recurrent neural networks on groups of similar series: a clustering approach. *Expert Syst Appl.* 2020. Vol. 140, № 3. P. 112896. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112896>.
- Banerjee N., Morton A., Akartunalı K. Passenger demand forecasting in scheduled transportation. *European Journal of Operational Research.* 2020. Vol. 286, № 3. P. 797–810. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2019.10.032>.

3. Bontempi G., Ben Taieb S., Le Borgne Y.A. Machine learning strategies for time series forecasting. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2013. Vol. 138. P. 62–77. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36318-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36318-4_3).
4. Chen J.H., Wei H.Y.H., Chen C.L., Wei H.Y.H., Chen Y.P., Ye Z. A practical approach to determining critical macroeconomic factors in air-traffic volume based on K-means clustering and decision-tree classification. *Air Transp. Manag.* 2020. № 82. P. 101743. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101743>.
5. Gunter U., Zekan B. Forecasting air passenger numbers with a GVAR model. *Annals of Tourism Research*. 2021. № 89. P. 103252. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2021.103252>.
6. Kim S. Forecasting short-term air passenger demand using big data from search engine queries. *Autom Constr.* 2016. Vol. 70. P. 98–108. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2016.06.009>.
7. Milenkovic M., Švadlenka L., Melichar V., Bojovic N., Avramovic Z. SARIMA modelling approach for railway passenger flow forecasting. *Transport*. 2016. Vol. 33. P.1113–1120. <https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1139623>.
8. Zaynab Qasim, Abdul-Razzak Ziboon and Khaldoon Falih. TransCad analysis and GIS techniques to evaluate transportation network in Nasiriyah city. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 162, Article 03029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816203029>.
9. Hu Z., Dychka I., Oleshchenko L., Kukharyev S. Applying Recurrent Neural Network for Passenger Traffic Forecasting. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 938. P. 68–77. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_7).
10. Medvedev M.G., Oleschenko L.M. The optimal control models of interurban bus transport. *Electronics and control systems*. 2014. Vol. 1 (39). P. 85-90.

### **Олещенко Л.М. ПРОГНОЗУВАННЯ МІЖМІСЬКОГО ПАСАЖИРОПОТОКУ ТА ОПТИМАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ АВТОБУСІВ АТП ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ LSTM**

У статті представлено аналіз наявного програмного забезпечення та програмних платформ інтелектуального аналізу даних, які використовуються для прогнозування пасажиропотоку між містами. Наведено основні статистичні методи, які використовуються для прогнозування пасажиропотоку між містами.

У цьому дослідженні запропоновано програмний метод збору даних та прогнозування пасажиропотоку на міжміських маршрутах України з використанням нейронної мережі LSTM. Для навчання та тренування нейронної мережі використано дані про пасажиропотоки між містами Чернігів та Київ з 2011 по 2015 роки. Для розроблення програмного забезпечення, зокрема, модуля прогнозування, використано мову програмування Python та вебфреймворк Flask. Дослідження показали ефективність використання нейронної мережі LSTM у порівнянні з такими статистичними методами прогнозування як лінійний тренд, логарифмічний тренд, ковзне середнє, експоненціальне згладжування Холта-Вінтерса. Запропоноване програмне забезпечення дозволяє скласти оптимальний план використання автопарку на основі прогнозного значення пасажиропотоку та моделі математичного програмування для заданої структури рухомого складу АТП. Модель LSTM може бути ефективною для середньострокового прогнозування пасажиропотоку на міжміських маршрутах, оскільки вона може враховувати довгострокові залежності часових рядів, такі як сезонність і тенденції. Однак важливо зазначити, що LSTM може мати тенденцію до перенавчання на малих обсягах даних, що може бути дорогим з точки зору обчислень, особливо з великими розмірами даних. Крім того, LSTM може працювати не ефективно за нестабільних або мінливих умов, які можуть мати місце у сфері прогнозування пасажирських перевезень.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, мова програмування Python, машинне навчання, нейронна мережа LSTM, прогнозування, програмні платформи інтелектуального аналізу даних, пасажиропотік, оброблення даних, міжміські пасажирські перевезення, АТП, оптимізація, автобуси, математичне програмування.

**Омецинська Н.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Боженко М.І.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЗАПИТІВ КОРИСТУВАЧІВ

*У статті розглянуто підвищення ефективності пошуків сучасних інформаційно-пошуковою системою (ІПС). На сьогоднішній день (ІПС) є основним інструментом для пошуку інформації у Всесвітньому павутинні. Тому поняття релевантності має важливе значення для підвищення якості пошуку інформації в ІПС.*

*В статті визначено, що персоналізація пошуку та інтелектуалізація персоналізації неухильно зростають. З цією метою основні гравці сучасного ринку пошукових систем Інтернету активно впроваджують різноманітні сервіси та інструменти для персоналізації та інтелектуалізації пошуку. Ці пошукові механізми покликані усунути основні недоліки традиційного контекстного пошуку за ключовими словами.*

*З'ясовано, що в розробці персоналізованих інтелектуальних пошукових систем ІПС є ще багато невирішених питань, розвиток цих систем має багато переваг, механізми інтелектуального пошуку та персоналізації пошуку повинні використовуватися у поєднанні з традиційними засобами пошуку.*

*Зрозуміло, що в способах створення персоналізованих інтелектуальних ІПС існує безліч невирішених проблем. Розробка ІПС систем дуже важлива. Це пов'язано з тим, що така система має багато переваг, але найголовніше – вона наближає нас до вирішення проблеми відбору релевантної інформації.*

*Було встановлено, що такі системи наближають нас до вирішення проблеми відбору відповідної інформації; слід підкреслити, що для підвищення ефективності ІПС інтелектуальні та персоналізовані механізми пошуку повинні застосовуватися в інтегрованому вигляді спільно з традиційними засобами пошуку.*

**Ключові слова:** інформаційно-пошукова система (ІПС) штучний інтелект (ШІ), база даних (БД), бібліотека прецедентів (БП), пошукова система (ПС), інформаційний пошук (ІП, розподілений штучний інтелект (DAI), штучне життя (AL).

**Постановка проблеми.** Останніми роками неухильно зростає інтелектуалізація та персоналізація пошуку в ІПС Інтернету. Ці пошукові механізми покликані усунути основні недоліки традиційного контекстного пошуку за ключовими словами. Для забезпечення персоналізації та інтелектуалізації пошуку пропонується використовувати методи штучного інтелекту, зокрема мульти-агентні підходи, а також методи та інструменти обґрунтування правдоподібності на основі прецедентів (CBR-Case-Based Reasoning).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформаційно-пошукова система (ІПС) – це система пошуку та відбору необхідних даних зі спеціальної бази даних, що описує джерела інформації (індекси) на основі інформаційно-пошукової мови та відповідних правил пошуку [1, 2]. Пошук здійснюється відповідно до інформаційних потреб користувача, сформованими у вигляді запиту. Дуже важливо, щоб в результаті пошуку нічого не було втрачено, тобто, що в індексі були знайдені всі документи, відповідні запиту (повнота

пошуку), і щоб не було видано нічого зайвого (точність пошуку).

**Метою статті** є дослідження методу інформаційного пошуку та програмного засобу для ІПС на основі прецедентів. У статті розглядалися такі завдання:

- вивчення основних особливостей характеристик ІПС, а також різних методів пошуку інформації в ІПС;
- аналіз проблем побудови ІПС Інтернету та можливих шляхів їх вирішення.

**Виклад основного матеріалу.** Пошукові системи є найбільш поширеними доступним ресурсом для пошуку інформації в Інтернеті. І сьогодні всі сучасні ІПС представляють собою мульти-агентні (багатоагентні) системи (МАС).

МАС – це технологія, що сформувалася на стику штучного інтелекту (ШІ), загальної теорії систем, інформаційних технологій і комунікаційних технологій.

При поповненні бази даних пошукові системи використовують програмних агентів (мобільних

агентів) павуків, які представляють собою мережевих роботів. Павуки переміщуються від сайту до сайту в Інтернеті, які продовжують його індексувати.

Основними характеристиками пошукових систем є обсяг індексування, мова запитів користувача, подання вихідних та вхідних документів, час індексування та пошуку.

Як правило, пошукові системи надають інтерфейс типу «текстовий скринька-кнопка», який дозволяє користувачам створювати інформаційно-пошукові запити з використанням ключових словичних зв'язок. Більшість машин знаходять величезну кількість «пов'язаних» із запитом користувача сторінок, за допомогою різних методів, включаючи частоту зустрічальності пошукових термінів на сторінці, «відстань» між пошуковими термінами, зміст META-тегів, просторовий і тимчасовий контекст документа, популярність ресурсу в оцінці та використання індексації цитування.

Типову конфігурацію пошукової системи можна побачити на прикладі машини WebCrawler, розробленої у Вашингтонському університеті (Сіетл, США).

Машина WebCrawler починає процес пошуку нових сайтів з відомих документів і переходить за посиланнями на інші сторінки. Він розглядає мережевий простір як спрямований граф, використовує алгоритм обходу графіка і працює наступного циклу:

- знайти нові документи;
- позначити витягнутий документ;
- декодувати посилання з цього документа;
- індексувати вміст документа.

Пошукова система працює у двох режимах: пошук документів у реальному часі і індексування документів. У режимі індексування система створює індекс інформації з витягнутих документів; в режимі пошуку-знаходить документи, що найбільш повно відповідають запиту користувача.

Агент системи WebCrawler відповідає за пошук документів з мережі. Для виконання цієї задачі пошукова система знаходить вільного агента і передає йому завдання на пошук. Агент починає роботу і повертає або вміст документа, або пояснення, чому документ не може бути доставлений. Агенти працюють як окремі процеси, тому основний процес системи ізольований від помилок і проблем з пам'яттю. Одночасно використовуються до 15 агентів.

У базі даних зберігаються метадані документів, посилання між ними повнотекстовий індекс. База даних оновлюється при кожному надходженні нового документа. Для відсікання семан-

тично неважливих слів є стоп-словник. Словом у документі присвоюється вага, що дорівнює частоті їх зустрічальності в даному тексті, поділеної на частоту їх зустрічальності в посиланнях на інші документи. Такий індекс дозволяє користувачеві швидко знаходити посилання на документи, що містять це слово.

Аналогічним чином структуровані та інші пошукові системи. Мережевим роботам стає все важче справлятися з постійним збільшенням ресурсів Інтернету, так як коні не може до оптуватися до уподобань користувачів і не мають достатніх засобів для аналізу інформації. Основним завданням пошукових систем є індексування ресурсів глобальної мережі. Дійсно, в базах даних пошукових систем зберігається інформація про те, що можна знайти в Інтернеті.

Основними напрямками розвитку MAC (рис. 1) є розподілений штучний інтелект (DAI) і штучне життя (AL). Ядром РІІ є вивчення взаємодії і координації невеликого числа інтелектуальних агентів, як, наприклад, в класичних інтелектуальних системах, що включають бази знань і вирішувачі; тут інтелектуальна поведінка групи формується на основі інтелектуальної поведінки індивідумів. Це включає в себе узгодження цілей, інтересів і стратегій різних агентів, координацію їх дій і вирішення конфліктів шляхом переговорів. Теоретичною основою тут є результати психології малих груп і організаційної соціології.

Важливим розділом РІІ є кооперативне розподілене розв'язання задач (CDPS).

Вони вирішують проблеми, які виходять за межі їх індивідуальних можливостей. Різні вузли такої мережі зазвичай мають різну експертизу (знання, погляди) і різні ресурси. Кожен вузол повинен вміти змінювати свою поведінку в залежності від ситуації і планувати стратегії комунікації та співпраці з іншими вузлами. Тут показниками рівня кооперації є характер розподілу завдань, інтеграція різних точок зору і, звичайно, можливість вирішення загальної проблеми за заданий час.

Розподілене рішення задач декількома агентами можна розділити на наступні етапи.

- 1) менеджер агента (центральний орган) декомпозує вихідну проблему на окремі завдання;
- 2) завдання розподіляються між агентами-виконавцями;
- 3) кожен агент-виконавець вирішує своє завдання і, можливо, розбиває її на під завдання
- 4) здійснюється композиція приватних результатів, відповідних поставленим завданням, для отримання загального результату.



Рис. 1. Класифікація мультіагентних систем

Другий напрямок – «Штучне життя» – більшою мірою пов'язане з трактуванням розумної поведінки в контексті виживання, адаптації і самоорганізації в динамічній і ворожій середовищі сходиться до робіт Ж. Піаже [40]. В контексті ІЖ глобальне розумне поведінка всієї системи спирається на ряд простих, не обов'язково розумних альних агентів. Тут також використовуються терміни «колективний інтелект» та «роєвий інтелект». Прибічники цього напрямку, в частности Р. Брукс, Л. Стілс, Дж. Денебергі інші, спираються на такі положення:

- 1) МАС являє собою взаємозалежну групу агентів;
- 2) кожен агент самостійно визначає свої реакції на події в локальному оточенні і взаємодія з іншими агентами;
- 3) зв'язки між агентами горизонтальні, інтагента-куратора, що контролює взаємодію інших агентів;
- 4) не існує точних правил, що визначають глобальну поведінку агентів;
- 5) поведінка, властивості і структури на колективному рівні формуються тільки результатів телокальних взаємодій між агентами.

Реакції на навколишнє середовище і механізми локальної взаємодії, як правило, не включають в себе такі аспекти, як прогнозування, планування пізнання, хоча вони можуть бути здатні вирішувати складні проблеми.

Часто проводиться принципова відмінність між розподіленим і децентралізованим ІІІ.

У цьому випадку вихідним об'єктом дослідження є загальна складна проблема, для її вирішення формується група агентів, будується загальна концептуальна модель і вводяться глобальні критерії досягнення мети.

Основним об'єктом дослідження тут є вже не розподілене рішення загальних завдань, а діяльність автономних агентів (і координація діяльності різних агентів) в динамічному багато агентному світі. Наряду з розподіленими знаннями і ресурсами описуються локальні завдання окремих агентів, які вирішуються на базі локальних концептуальних моделей і локальних критеріїв.

Інтелектуальний агент – це програма, яка автономно виконує завдання, задані користувачем комп'ютера, через певні проміжки часу. Інтелектуальні агенти використовуються для допомоги операторам збору інформації. Прикладом завдання, що виконується агентом, є завдання постійного пошуку і збору необхідної інформації в Інтернеті. та навчання.

Агенти в розподіленому штучному інтелекті можуть розглядатися без урахування характеристик інших агентів, і проблема узгодженості знань поступається місцем проблемі забезпечення співпраці та комунікації між агентами. У багатьох випадках необхідний також фізичний розподіл завдань, наприклад, при використанні груп проботів.

Типова схема розподіленого розв'язання задач декількома агентами включає наступні кроки:

- Підлеглий агент (агент-менеджер) (супервізор, центральний орган) декомпозує вихідну проблему на окремі завдання.

– Ці завдання розподіляються між агентами-виконавцями.

– Кожен агент-виконавець вирішує своє завдання, іноді розбиваючи її на підзавдання.

– Для отримання загального результату проводиться синтез інтеграція окремих результатів, відповідних поставленим перед ними завданням. За синтез і інтеграцію загального результату відповідає агент-інтегратор (агент-інтегратор) результатів відповідає агент-інтегратор (у більшості випадків той же агент-субкоординатор (агент-менеджер)).

Два, найбільш важливі аспекти розподіленого штучного інтелекту – це розподіл завдань між агентами і інтеграція результатів. Після отримання приватних результатів виникає проблема їх узгодження та інтеграції.

Тут основними критеріями ефективності розподіленого розв'язання завдань є час, що витрачається на рішення, і сумісність під завдань з можливостями конкретного агента-виконавця.

У разі розподіленого рішення завдань залежний агент (агент-менеджер) може дотримуватися двох протилежних стратегій:

– вибір кращого агента-виконавця для вирішення конкретної підзадачі (вибора агентів для вирішення підзавдань);

– вибір підзавдання, найбільш підходящою для даного агента-виконавця (вибір підзавдання агентів).

Отже, основними характеристиками соціальної групи у розподіленому штучному інтелекті, тобто. групи, що складається з штучних агентів, що працюють спільно для досягнення загальної мети, є соціальна структура і розподіл ролей між агентами. У даному випадку соціальна структура формується в результаті розподілу ролей. «повноваження» та «відповідальність». Відповідно до цього підходу, організації створюються і розвиваються «зсередини» системи.

До основних теоретичних питань розподіленого штучного інтелекту ставляться такі:

– Опис, декомпозиція та розподіл завдань між агентами в багатоагентних системах. Синтез (композиція) рішень;

– Забезпечення взаємодії та комунікації агентів у багатоагентних системах. Побудова комунікаційних мов і протоколів;

– Координація прийняття рішень та координація поведінки агентів. Планування в багатоагентних системах. Вирішення конфліктів між агентами з приводу ресурсів;

– Представлення внутрішніх станів агентів і виведення знань, планів і дій інших агентів;

– Представлення різних перспектив, цілей і переваг агентів в багатоагентній системі.

Залежно від концепцій, обраних для організації МАС, зазвичай виділяють три основні класи архітектур:

– Архітектури, засновані на принципах та методах штучного інтелекту;

– Архітектури, засновані на поведінкових моделях з можливістю реагування на зовнішні події;

– Гібридні ієрархічні архітектури на основі поведінкових моделей методів ШІ.

Існує кілька причин, яким програмні агенти, мультиагентні системи (МАС) і технології на основі агентів є необхідними і корисними. Основною ідеєю програмних агентів є делегування повноважень. Для реалізації цієї ідеї агент повинен вміти взаємодіяти з власником або користувачем, отримувати відповідні завдання і повертати результати, орієнтуватися в середовищі виконання і приймати рішення, необхідні для виконання завдання.

Оскільки онтологія є точним представленням описуваної предметної області, агенти, які використовують онтології у своїй роботі, класифікуються як *deliberative*.

У динамічному підході МАС-додатки використовують парадигму мобільних агентів.

Мобільний агент – це програма, здатна переміщатися по мережі, наприклад по World Wide Web. Мобільний агент покидає комп'ютер клієнта і відправляється на віддалений сервер для виконання будь-якої дії, а потім повертається назад.

Існуючі МАС також можна розділити на централізовані, коли обробка даних здійснюється централізовано на одному вузлі, і розподілені, коли дані обробляються на різних вузлах залежно від характеру обробки інформації. Наприклад, первинна обробка відбувається на різних вузлах системи, після чого отримані дані відправляються на вузол.

До недоліків централізованих систем пошуку інформації в Інтернеті належать:

1) усі дані повинні бути повністю зібрані на якомусь вузлі системи для подальшої обробки, що призводить до пересилання по мережі великих обсягів даних;

2) обробка і зберігання великих обсягів даних на одному вузлі системи пов'язані з додатковими труднощами;

3) необхідність у потужних обчислювальних ресурсах;

4) проблеми узгодження даних;

5) виходу з ладу центрального вузла системи перешкоджатиме роботі всієї системи.

До недоліків розподілених систем можна віднести необхідність введення додаткових коштів, що гарантують взаємодію та координацію роботи кожного вузла системи.

Враховуючи перелічені переваги та недоліки різних типів архітектур мультиагентних систем, була обрана розподілена система, що складається з кількох серверів і клієнтів, що взаємодіють за допомогою передачі повідомлень. В якості агентної структури були обрані мобільні агенти, які «переміщуються» по мережі до серверів системи і виконують певні завдання. Такий вибір був зумовлений наступними міркуваннями:

1) процес обробки даних може бути прискорений за рахунок розподілу обчислювального навантаження за різними вузлами системи;

2) усі дані обробляються на одному злі, клієнтам мережі передаються лише результати

обробки, що виключає необхідність пересилання великих обсягів даних мережі;

3) висока надійність – при виході з ладу одного або декількох вузлів системи інші продовжують функціонувати, тому працездатність всієї системи не знижується.

При розробці МАС необхідно враховувати кілька принципів, які застосовувалися при побудові МАС для отримання файлів по локальній мережі. Перерахуємо ці принципи:

1) Розподілена структура МАС.

2) Механізм взаємодії компонентів МАС за допомогою повідомлень.

3) Механізми передачі агентів по мережі.

**Висновки.** У проведеному дослідженні розглянуто основних особливостей характеристик ІПС, а також різних методів пошуку інформації в ІПС та проаналізовано проблеми побудови ІПС Інтернету та можливих шляхів їх вирішення.

#### Список літератури:

1. Zong Woo Geem. Recent Advances in Harmony Search Algorithm. *Studies in Computation Intelligence*. 2016. P. 51–75.
2. Автоматизовані інформаційно-пошукові мови URL: <http://ubooks.com.ua/books/00092/inx13.php>.
3. Sergey Brin, Lawrence Page. The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine. Computer Science Department, Stanford University, Stanfor. 1998. P. 45–48.
4. Google PageRank. URL: <https://ahrefs.com/blog/google-pagerank/>.
5. Page, Larry: PageRank: Bringing Order to the Web. Stanford Digital Library Project. 2002. P. 47–52.
6. Taher Haveliwala & Sepandar Kamvar: The Second Eigenvalue of the Google Matrix. Stanford University Technical Report. 2008. P. 20–34.
7. Омечинська Н. В., Гуйда О. Г., Прокопенко І. Ю. «Дослідження технологій інформаційного пошуку для використання в семантичній мережі», The 4th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education” (December 11-13, 2023) MDPC Publishing, Berlin, Germany.
8. Омечинська Н.В., Дичко А.О1., Мінаєва Ю.Ю. «Проектування пошукового сервісу». URL: <https://www.calameo.com/books/003168372749b97cf65cb>

#### **Ometsynska N.V., Bozhenko M.I. PERSONALIZATION OF SEARCH BASED ON ANALYSIS USER REQUESTS**

*The article examines the improvement of the search efficiency of modern information and search systems (IPS). Today (IPS) is the main tool for finding information on the World Wide Web. Therefore, the concept of relevance is important for improving the quality of information search in the IPS.*

*The article determined that the personalization of search and the intellectualization of personalization are steadily growing. For this purpose, the main players of the modern Internet search engine market are actively implementing various services and tools for personalization and intellectualization of search. These search engines are designed to eliminate the main disadvantages of traditional contextual keyword searches.*

*It has been found that there are still many unsolved issues in the development of personalized intelligent IPS search systems, the development of these systems has many advantages, the mechanisms of intelligent search and search personalization should be used in combination with traditional search tools.*

*It is clear that there are many unsolved problems in the ways of creating personalized intelligent IPS. Development of PS systems is very important. This is due to the fact that such a system has many advantages, but the most important thing is that it brings us closer to solving the problem of selecting relevant information.*

*It was established that such systems bring us closer to solving the problem of selecting relevant information; it should be emphasized that in order to increase the effectiveness of the IPS, intelligent and personalized search mechanisms should be used in an integrated form together with traditional search tools.*

**Key words:** information search system (IPS), artificial intelligence (AI), database (DB), library of precedents (BP), search engine (PS), information search (IS), distributed artificial intelligence (DAI), artificial life (AL).

**Положаєнко С.А.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Прокоф'єв А.Ю.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯКИХ ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ РЕЖИМОМ ПРОФІЛАКТИКИ

*У роботі досліджуються питання прогнозу надійності динамічних систем для випадків, коли їх функціонування передбачає профілактичне обслуговування. Прогноз ґрунтується на застосуванні математичних методів та відповідних моделей.*

*При реальній експлуатації технічних систем (переважно більшість яких можна розглядати як динамічні системи) виникають певні труднощі в підтримці заданого рівня їх працездатності, що може бути компенсовано обґрунтованими режимами обслуговування, наприклад, профілактикою – з одночасною оцінкою надійності динамічної системи, яка зазнала відновлювальних (суть – профілактичних) робіт. Разом з тим, проведення для динамічної системи певних видів профілактик, визначення їх тривалості та часу між-профілактичної експлуатації, потребує раціонального планування, яке може бути забезпечено, зокрема, прогнозним моделюванням. У той же час, в практиці формування режимів профілактики динамічних систем, постає ціле коло задач, вирішення яких передбачає наявність неповної інформації про надійність. Така ситуація виникає упродовж всього терміну експлуатації динамічних систем, що нагально вимагає розробки прикладних математичних методів дослідження. Їх використання дозволяє простежити за якісною зміною показників надійності та завчасно планувати необхідні профілактичні заходи.*

*При організації профілактичних робіт перед обслуговуючим персоналом виникають протиріччя: з одного боку, необхідно підвищувати надійність обладнання (яке також може розглядатися як динамічні системи з точки зору теорії систем) за рахунок проведення профілактичних заходів, що потребує значних витрат часу та матеріальних ресурсів; з іншого боку – економічно не вигідно на тривалий час виводити з виробничого циклу обладнання на профілактику. Тому існують оптимальні умови проведення профілактичного обслуговування обладнання (динамічних систем), при яких забезпечується достатньо висока надійність цих систем за умови мінімізації часу виведення з виробничого циклу останніх. Таким чином, науково обґрунтований комплекс профілактичного обслуговування дозволяє підтримувати рівень надійності динамічної системи, який закладено в неї на стадіях проектування та виробництва.*

**Ключові слова:** динамічна система, надійність, профілактика, коефіцієнт використання, модель, ланцюг Маркова.

**Постановка проблеми.** Профілактичне обслуговування являє собою комплекс заходів, спрямованих на запобігання відмов динамічної системи та продовження терміну її служби [1].

До теперішнього часу опубліковано значну кількість робіт, присвячених віднаходженню оптимальних режимів профілактики [2]. Перші роботи у цьому напрямку, зокрема, почали з'являтися ще на межі 60-х та 70-х років минулого сторіччя, коли надійності і резервуванню динамічних систем надали значної уваги.

Класифікацію задач з оптимальної профілактики зручно провести з точки зору системи управління, яка використовується. Існує два типи систем управління процесом проведення профілактики [3].

До першого типу відносяться системи управління, в яких управляючий вплив (суть – профілактика) здійснюється у фіксовані проміжки часу [3–5]. Оптимальна періодичність профілактики в цьому випадку визначається на основі функції розподілу часу безвідмовної роботи системи та витрат, пов'язаних з проведенням профілактики, з одного боку, та викликаних відмовою системи, з іншого боку [4].

Вказаний метод, завдяки легкості свого застосування, має широке розповсюдження. Цей тип управління відноситься до класу систем управління з відкритим контуром [4, 5] та характеризується тим, що управляючий вплив не залежить від вихідних параметрів процесу (станів працездатності динамічної системи).



При другому типі систем управління процесом профілактики рішення щодо прийняття або не прийняття управляючого впливу ґрунтується на результатах *вимірювання параметрів на виході процесу*. В цьому випадку періодичність та тривалість профілактичних заходів залежить від стану динамічної системи на момент перевірки, а саме: якщо на момент перевірки динамічна система перебуває у такому стані, коли ризик відмови на найближчий час незначний, то ніяких відновлювальних робіт не проводиться, у іншому випадку – приймається рішення щодо проведення профілактики, причому обсяг профілактичних робіт також може визначатися на основі аналізу вимірних параметрів на виході процесу. Цей тип управління процесом профілактики відноситься до класу систем управління *із замкнутим контуром* (або – *зі зворотним зв'язком*) [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інтуїтивно зрозуміло, що використання інформації про стан динамічної системи (іншими словами – про процес накопичення несправностей) при однакових витратах повинно привести до більшого ефекту у порівнянні з випадком, коли профілактику призначають лише на підставі відомостей, які є до початку експлуатації динамічної системи. Це показано у роботах, наприклад [6–9], а також у роботах [10–12], в яких розглядаються питання технічного діагностування, дотичні до проблеми надійності динамічних систем. Зокрема, зауважується, що можна не здійснювати «зайві» профілактики у тих випадках, коли ризик відмови на найближчий час незначний.

У переважній більшості робіт, присвячених проблемі визначення надійності динамічних систем в умовах запровадження профілактичних заходів, увагу приділяють якійсь оцінці надійності на основі *коефіцієнту використання* досліджуваних систем *при оптимальній періодичності профілактики* і визначення термінів профілактики при її змінній періодичності (також на основі *коефіцієнту використання*).

Необхідність розв'язування такої задачі пояснюється тим, що при визначенні оптимальної періодичності профілактик, які враховують стан динамічної системи, слід виходити з мінімуму *умовної періодичності* математичних очікувань простоїв динамічної системи з моменту перевірки до моменту виявлення відмови [13]. При цьому стратегія обслуговування, тобто *вибору станів*, виявлення яких викликає по собі профілактику, вважається заданою. Однак, на основі умовних математичних очікувань неможливо порівнювати

обраних стратегій профілактики, оскільки їх число (умовно середніх простоїв) для кожної стратегії різне. Оптимальну послідовність профілактики можна визначити, виходячи з максимуму *узагальненого показника надійності*  $K_{rel}$  [3]. Нажаль методи обчислення  $K_{rel}$ , розроблені для динамічних систем з профілактикою по функції розподілу часу безвідмовної роботи [3, 6], у даному випадку не можуть бути застосовані, внаслідок того, що періодичність та тривалість профілактики є змінною величиною, яка залежить від стану динамічної системи на час перевірки.

Нижче запропоновано математичні моделі (ММ) щодо визначення надійності динамічних систем, для яких режим профілактики зумовлюється *контролем станів працездатності*.

**Мета роботи** полягає у розробці моделей та реалізуючих їх підходів до обчислення узагальненого показника надійності (або, інакше – *коефіцієнта використання*) для стратегій профілактики, виходячи з *мінімуму математичного очікування питомих втрат* динамічної системи.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо динамічну систему, яка в процесі функціонування може перебувати у множині станів  $E = \{E_i\}$ , ( $i = \overline{0, v}$ ). Стан динамічної системи у будь-який момент часу  $t$  визначається кількістю елементів, які відмовили, наприклад, стан  $E_0$  відповідає повністю справній динамічній системі, стан  $E_v$  – відмові, а стани  $E_1 \dots E_{v-1}$  – являють собою проміжні стани. Переходи динамічної системи зі стану  $E_k$ ,  $0 \leq k \leq v$  у стан  $E_j$ ,  $0 \leq j \leq v$ ;  $k \neq j$  відбувається у відповідності з марковським однородним процесом  $x(t)$ . Нехай задано інтенсивності переходів  $\lambda_{kj}$ ,  $k \neq j$ :

$$P \left\{ x(t + \Delta t) = E_j \mid x(t) = E_k \right\} = \begin{cases} \lambda_{kj}(\Delta t) + O(\Delta t); & E_k, E_j \in E = \{E_i\}, k \neq j; \\ 1 - \sum_{k \neq j} [\lambda_{kj}(\Delta t) + O(\Delta t)]; & E_k, E_j \in E = \{E_i\}, k = j. \end{cases} \quad (1)$$

Із стану  $E_v$  динамічна система не може перейти у інший стан без стороннього втручання, наприклад, ремонту. Потрапивши у цей стан, динамічна система перебуває у ньому скільки завгодно довго, тобто стан  $E_v$  для процесу  $x(t)$  є *поглинаючим*. Формально для всіх  $\tau > 0$

$$P \left\{ x(t + \Delta t) = E_v \mid x(t) = E_v \right\} = 1.$$

**Зауваження.** Завдання процесу  $x(t)$  утворюючою матрицею  $\Lambda = \{\lambda_{kj}; E_k, E_j \in E = \{E_i\}, k \neq j\}$  описує еволюцію процесу тільки «локально», на безкінечно малому інтервалі  $(t, t + \Delta t)$ . Однак, якщо додатково вказати вихідний стан  $E_k$  на момент

часу  $t = 0$ , то можна отримати повний опис процесу у часі, наприклад, віднайти перехідні ймовірності  $P(k, j, t) \in E = \{E_i\}$ ,  $k \neq j$ . Це вдається зробити за допомогою системи диференціальних рівнянь для  $P(k, j, t)$ , для складання якої достатньо мати  $\lambda_{kj}(\Delta t) + O(\Delta t)$ ;  $E_k, E_j \in E = \{E_i\}$ ,  $k \neq j$ . Тому, при подальшому розгляді, завдання процесу  $\Lambda = \{\lambda_{kj}; E_k, E_j \in E = \{E_i\}, k \neq j\}$  або  $P(t) = \{P(k, j, t)\}$ ;  $E_k, E_j \in E = \{E_i\}, k \neq j$  будемо вважати еквівалентними.

Для досягнення впевненості про те, що динамічна система виконує свої функції, остання піддається перевірці. Тривалість перевірки, на протязі якої визначається стан динамічної системи, являє собою випадкову величину  $L(t)$  з довільним законом розподілу  $\Pi(t)$ .

Якщо на момент перевірки динамічна система перебуває у стані  $E_L \in E' = \{E_i'\} (i = \bar{0}, \bar{v}', v' < v)$ , то ніяких профілактичних робіт не проводиться, а призначається термін наступної перевірки через час  $T_i (i = \bar{0}, \bar{v}', v' < v)$ . У випадку, якщо динамічна система опинилася у стані  $E_m = E|_{E'}$ , то відбувається профілактика останньої, тобто динамічна система примусово переводиться у стан  $E_L(E_m)$ ,  $E_L \in E'$  та призначається термін наступної перевірки через час  $T_i (i = \bar{0}, \bar{v}'', v'' < v)$ . Час відновлення динамічної системи залежить від початкового  $E_m$  та кінцевого  $E_L$  її станів, а також кількості обслуговуючого персоналу та являє собою випадкову величину  $\phi_m$  з довільним розподілом  $F_m(t)$ .

Без втрати загальності, у подальшому, будемо вважати, що при проведенні профілактики динамічна система відновлюється повністю, тобто завжди  $E_L(E_m) = E_0$ .

Поставлена задача призводить до моделі, яка дає змогу визначити оптимальні параметри профілактики за обраної стратегії (тобто, як зазначалося вище, управління процесом проведення профілактики).

**Підхід до визначення траєкторії надійності динамічної системи.** Для опису траєкторії надійності динамічної системи, з урахуванням проведення перевірок та профілактик, можна скористатись методом марковських процесів з вкладеним марковським ланцюгом [14]. Вкладеним ланцюгом Маркова у випадку, що розглядається, є процес функціонування між двома перевірками, при яких було виявлено стан  $E_v$  (у прийнятих позначеннях – стан відмови динамічної системи). Очевидно, що характеристики надійності динамічної системи, отримані для вкладеного ланцюга Маркова, чинні і при  $t \rightarrow \infty$ .

Визначимо спочатку оптимальні періодичності перевірок. Для цього складемо систему рівнянь

$$M_{lv} = \min_{0 \leq T_l < \infty} \left\{ M_l + \int_0^{T_l} P(l, v, t) dt + \sum_{E_i' \in E'} P(l, v'', T_l) M_{v''} + \sum_{E_m \in E_L} P(l, m, T_l) (M_{m0} + M_{0v}) + \sum_{E_i' \in E'} P(l, v'', T_l) M_{v0} \right\}, \quad (2)$$

де

$M_{lv}$  – математичне очікування простоїв динамічної системи до моменту виявлення її відмови за умови, що у момент перевірки динамічна система перебуває у стані  $E_l$ ;

$M_l$  – математичне очікування часу перевірки динамічної системи;

$T_l$  – час наступної перевірки, що визначається станом  $E_l$ ;

$M_{m0}$  – математичне очікування часу профілактики динамічної системи, зумовлене її переведенням зі стану  $E_l$  в стан  $E_0$ .

Розв'язавши систему (2) ітераційним методом, можна визначити оптимальні значення величин  $\bar{T}_l$ , що мінімізують  $M_{lv}$ , ( $E_l \in E'; l = \bar{0}, \bar{v}'', v'' < v$ ).

Уведемо до розгляду випадковий процес  $\xi_t$ , який назвемо процесом, що спостерігається, та визначимо його наступним чином. Нехай чергова перевірка динамічної системи відбувається у певний момент часу  $t$ , причому виявляється стан  $E_i (i = \bar{0}, \bar{v})$ . Тоді приймаємо  $\xi_{tT} = E_i$  для таких значень  $t$ , що  $t_i \leq t < t_i + T_i (i = \bar{0}, \bar{v})$ . Тобто вважаємо, що динамічна система для процесу  $\xi_t$  перебуває у стані  $E_i (i = \bar{0}, \bar{v})$  до моменту наступної перевірки. Якщо  $\xi_{t_i+T_i} = E_j$  (в даному випадку не виключено, що  $j = i$ ).

Будемо називати інтервал часу між сусідніми переходами – кроком. Тоді, використовуючи  $P(t)$  та віднайдені з (2) значення  $\bar{T}_l (E_l \in E')$ , можна записати матрицю переходів процесу  $\xi_t$  за один крок:

$$Q_{ij} = \begin{cases} P(i, j, T_i); E_i \in E'; E_j \in E, \\ P(0, j, T_0); E_i \in E_0; E_j \in E, \\ 0; i = v; E_j \in E, \\ 1; i = v; E_j \in E_v. \end{cases} \quad (3)$$

В (3) стан  $E_v$  є поглинаючим, що впливає з визначення ланцюга Маркова.

Кількість перевірок між моментами відмов динамічної системи можна представити як кількість кроків процесу  $\xi_t$  до потрапляння у стан  $E_v$ . Математичне очікування числа перевірок (представлене у вигляді деякої матриці) можна визначити на підставі наступної утвореної матриці виду:

$$M = Q(0)[I - C]^{-1}, \quad (4)$$

де

$Q(0)$  – початковий вектор ймовірностей, що визначає стан динамічної системи після профілактики, яку було проведено внаслідок відмови;

$I$  – одинична матриця;

$S$  – матриця, яка отримується з матриці  $Q_{ij}$  викреслюванням  $v$ -го рядка та  $v$ -го стовпчика.

У випадку, який розглядається,  $Q(0) = \|1, 0, 0, \dots, 0\|$ , а тому матриця  $M$ , що визначається виразом (4), перероджується у вектор-рядок, який набуває вигляду

$$M = \|M_1, M_2, \dots, M_{v-1}\|, \quad (5)$$

де  $M_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) – являє собою середнє число потраплянь процесу  $\xi_t$  в стан  $E_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) до поглинань за умови, що процес  $\xi_t$  почався в стані  $E_0$ .

Тоді математичне очікування числа перевірок

$$M_{n \text{ ch}} = \sum_{i=0}^{v-1} M_i. \quad (6)$$

Нехай  $\theta$  є математичне очікування часу тривалості еволюції вкладеного ланцюга Маркова. Можна стверджувати, що за час  $\theta$  випадковий процес  $\xi_t$  здійснить  $M_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) переходів у стан  $E_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) та один перехід у стан  $E_v$ . Процес  $\xi_t$  у стані  $E_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) перебуває в середньому час

$$\tau_i = \begin{cases} T_i + M_i; E_i \in E', \\ T_{i0} + T_0 + M_i; E_i \in E_{v-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді час  $\theta$  представиться у вигляді наступної суми:

$$\theta = \sum_{i=0}^{v-1} M_i \tau_i + T_{v0}. \quad (8)$$

З іншого боку, після кожного потрапляння процесу  $\xi_t$  у стан  $E_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ), динамічна система стає до роботи за призначенням на час

$$\tilde{\tau} = \begin{cases} T_i; E_i \in E', \\ T_0; E_i \in E_{v-1}. \end{cases} \quad (9)$$

Математичне очікування часу простою, викликане відмовою динамічної системи до моменту виявлення відмови, усереднене по всіх станах  $E_i$  ( $i = \overline{1, v-1}$ ) процесу  $\xi_t$ , з котрих можливий перехід у стан  $E_v$ , запишеться у вигляді:

$$M_{\text{idl}} = \frac{1}{M_{n \text{ ch}}} \left[ \sum_{E_i \in E'} M_i \int_0^{T_i} P(i, v, t) dt + \sum_{E_i \in E_v} M_i \int_0^{T_0} P(0, v, t) dt \right]. \quad (10)$$

Сумарний час використання динамічної системи за призначенням за проміжок часу  $\theta$  складає:

$$\hat{\tau} = \sum_{i=0}^{v-1} M_i \tilde{\tau}_i - M_{\text{idl}}. \quad (11)$$

Таким чином, шуканий *узгаальнений показник надійності* для стратегій профілактики, виходячи з мінімуму математичного очікування питомих втрат динамічної системи, можна обчислити як:

$$K_{\text{rel}} = \frac{\hat{\tau}}{\theta} = \frac{\sum_{i=0}^{v-1} M_i \tilde{\tau}_i - M_{\text{idl}}}{\sum_{i=0}^{v-1} M_i \tau_i + T_{v0}}. \quad (12)$$

Розглянемо тестовий приклад щодо відшукування  $K_{\text{rel}}$ .

**Приклад 1.** Виконаємо кількісну оцінку коефіцієнта  $K_{\text{rel}}$  динамічної системи, складеної з одного основного та двох навантажених резервних елементів. Всі елементи мають однакову інтенсивність відмов  $\lambda$ . Якщо в момент перевірки динамічна система перебуває у станах  $E_0$  або  $E_1$ , то ніяких профілактичних робіт не виконується та призначається час наступних перевірок через проміжки  $T_0$  та  $T_1$ , відповідно. Якщо в момент перевірки виявляються стани  $E_2$  або  $E_3$ , то динамічна система переводиться у стан  $E_0$ , а також призначається час наступної перевірки через проміжок  $T_0$ .

Прийmemo, що для випадку, який розглядається, матриця ймовірностей переходів має вигляд:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} e^{-\lambda t} & 3(e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}) & 3(e^{-3\lambda t} - 2e^{-2\lambda t} + e^{-\lambda t}) & 1 - e^{-3\lambda t} + 3e^{-2\lambda t} - 3e^{-\lambda t} \\ 0 & e^{-\lambda t} & 2(e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) & 1 - 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-\lambda t} \\ 0 & 0 & e^{-\lambda t} & 1 - e^{-\lambda t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Відповідно (2) запишемо систему рівнянь:

$$M_{03} = \min_{0 \leq T_0 < \infty} \left\{ M_1 + \int_0^{T_0} P(0, 3, t) dt + P(0, 0, T_0) M_{03} + P(0, 1, T_0) M_{13} + P(0, 2, T_0) (M_{03} + M_{20}) + P(0, 3, T_0) M_{30} \right\},$$

$$M_{13} = \min_{0 \leq T_1 < \infty} \left\{ M_1 + \int_0^{T_1} P(1, 3, t) dt + P(1, 1, T_1) M_{13} + P(1, 2, T_1) (M_{03} + M_{20}) + P(1, 3, T_1) M_{30} \right\}.$$

Визначимо оптимальні значення  $\bar{T}_0$  та  $\bar{T}_1$  при наступних значеннях:  $M_1 = 1$  год.;  $\lambda = 0,02$  год.<sup>-1</sup>;  $M_{20} = 2$  год.;  $M_{30} = 2$  год.

Розв'язуючи системи рівнянь, записаних щодо оптимальних періодичностей перевірок, отримуємо:  $\bar{T}_0 = 40$  год.,  $\bar{T}_1 = 30$  год. (відповідно:  $\min(M_{03}) = 11$  год.,  $\min(M_{13}) = 4$  год.).

Підставляючи  $\bar{T}_0$  та  $\bar{T}_1$  в матрицю  $Q(t)$ , отримуємо:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 0,090 & 0,336 & 0,408 & 0,166 \\ 0 & 0,302 & 0,495 & 0,203 \\ 0 & 0 & 0,408 & 0,166 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

По формулах (4) та (5) обчислюємо вектор-рядок  $M$ :

$$M = \|1, 34 \quad 1,82 \quad 2,45\|,$$

звідки

$$M_{n \text{ ch}} = \sum_{i=0}^2 M_i = 5,61.$$

На підставі (7) та (9) маємо:

$$\tau = \|41 \quad 31 \quad 43\|,$$

$$\tilde{\tau} = \|40 \quad 30 \quad 40\|.$$

Обчислюємо  $M_{id1}$  по формулі (10)

$$M_{id1} = \frac{1}{M_{n\ ch}} (1,34 \cdot 2,5 + 1,82 \cdot 2,3 + 2,45 \cdot 2,5) = 2,43 \text{ год.}$$

Відповідно (8) та (11) визначаємо  $\theta$  та  $\hat{t}$ :

$$\theta = 1,34 \cdot 41 + 1,82 \cdot 31 + 2,45 \cdot 43 + 3 = 219,4 ;$$

$$\hat{t} = 1,34 \cdot 40 + 1,82 \cdot 30 + 2,45 \cdot 40 - 2,43 = 203,8.$$

На підставі (12) визначаємо узагальнений показник надійності для стратегій профілактики

$$K_{rel} = \frac{203,8}{219,4} = 0,929,$$

який може бути використаний для прогнозування профілактичних заходів.

Варіантним випадком розглянутої вище задачі може представлятися визначення показників надійності динамічної системи за умови *обмеженої тривалості* профілактики. Необхідність такого формулювання задачі полягає в тому, що внаслідок випадкового характеру процесу профілактики (відновлення), час переведення динамічної системи у стан повної справності може «неприпустимо» затягнутися. Тому представляється доцільним *завчасно (попередньо) обмежити* тривалість проведення профілактики і, у подальшому, розглядати таким чином відновлену динамічну систему як «цілком працездатну».

**Постановка задачі.** Для динамічної системи, яка внаслідок випадкового характеру несправності (перебуваючи при цьому у поточному стані  $E_{ter} \in E_j$ ;  $j = \overline{1, v}$ , тобто у стані, який відмінний від справного стану  $E_0$ , а динамічна система потребує профілактики), переводиться в режим профілактики, причому тривалість цієї профілактики обмежується часом  $T_{ter}$ . По завершенню часу  $T_{ter}$  динамічна система переводиться у стан  $E_i \in E'$ ;  $i = \overline{0, v}$  – тобто вважається справною та такою, що здатна функціонувати у робочому режимі. У іншому випадку, якщо стан відновленої динамічної системи  $E_k$  не задовольняє умові  $E_k \in E_i$ ;  $i = \overline{0, v}$  – призначається нова профілактика. Після кожної профілактики динамічна система перевіряється у відповідності до умови  $E_k \in E' = \{E_i\}$  ( $i = \overline{0, v}$ ,  $v' < v$ ), де  $E_k$  – стан відновленої динамічної системи після профілактики.

Нехай процес відновлення динамічної системи описується стохастичним процесом  $Y(t)$ , який визначено на множині станів  $E = \{E_i\}$ , ( $i = \overline{0, v}$ ). Причому перехід процесу  $Y(t)$  зі стану  $E_i$  у стан  $E_j$  ( $i \neq j$ ,  $i > j$ ) за час  $t$  відбувається у відповідності до матриці

$$M(t) = \{M(i, j, t)\} \quad (E_i \in E, E_j \in E \setminus \{E_1, \dots, E_v\}).$$

Таким чином, якщо в момент початку профілактики динамічна система перебувала у стані  $E_i$ , то за час  $T_i$  вона може бути переведена у стан  $E_j$  із ймовірністю  $M(i, j, T_i)$ .

**Підхід до визначення траєкторії надійності динамічної системи за умови обмеженої тривалості профілактики.** У випадку, який розглядається, немає можливості скористатися методом марковських процесів з вкладеним ланцюгом внаслідок того, що стан  $E_v$  не є регенеративною точкою. Тоді, як і у попередньому випадку, розглянемо процес  $\xi_t$ , що спостерігається, і який описує переходи динамічної системи у моменти перевірок. Для процесу  $\xi_t$  елементи матриці переходів за один крок

$$Q_{ij} = \begin{cases} P(i, j, T_i); E_i \in E'; E_j \in E, \\ M(i, j, T_i); E_i \in E_{ter}; E_j \in E. \end{cases} \quad (13)$$

Кожний рядок  $i$  матриці  $Q_{ij}$  в (13) відповідає або рядку матриці  $P(t)$  при  $t = T_i$ , якщо  $E_i \in E'$ , або рядку  $i$  матриці  $M(t)$ , якщо  $E_i \in E_{ter}$ .

Для віднаходження вектору стаціонарного розподілу  $S$  матриці  $Q_{ij}$  складемо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$S = SQ_{ij} \quad (14)$$

за умови

$$\sum_{E_i \in E} S_i = 1. \quad (15)$$

Час перебування процесу  $\xi_t$  у стані  $E_i$  являє собою фіксовану величину  $\tau_i = T_i + P$  і за цей час динамічна система може бути використана за призначенням із середнім

$$\hat{\tau}_i(T_i) = \begin{cases} T_i - \int_0^{T_i} P(i, v, t) dt; E_i \in E', \\ 0, E_i \in E_{ter}. \end{cases} \quad (16)$$

Звідси легко встановити, що

$$K_{rel}(T) = \frac{\sum_{E_i \in E'} S_i(T) \hat{\tau}_i(T_i)}{\sum_{E_j \in E} S_j(T) \hat{\tau}_j(T_j)}. \quad (17)$$

Розглянемо тестовий приклад.

**Приклад 2.** Розглянемо динамічну систему, яка складається з трьох елементів: один основний та двох резервних. Резерв навантажений. Інтенсивності відмов та відновлювань кожного елементу дорівнюють відповідно  $\lambda = 0,02 \text{ час}^{-1}$ ,  $\mu = 0,05 \text{ час}^{-1}$ .

Профілактичне обслуговування здійснюється двома ремонтними бригадами, які працюють незалежно одна від одної, коли число елементів, які відмовили більше, ніж один. В іншому випадку вони працюють спільно. Інтенсивність відновлення одного елементу двома ремонтними

бригадами приймається однаковою та такою, що складає 1,5μ. Стратегії обслуговування обираються такими, як було прийнято для прикладу 1. Також приймається, що вектор-рядок  $T = \|75 \ 55 \ 11,7 \ 16,8\|$  год.

Необхідно обчислити  $K_{rel}(T)$  динамічної системи.

Визначимо для випадку, що розглядається, елементи  $M_i(t)$  матриці  $Q_{ij}$  (елементи  $P_i(t)$  можна взяти з прикладу 1):

$$M(1, 0, t) = 1 - e^{-1,5\mu t};$$

$$M(1, 1, t) = e^{-1,5\mu t};$$

$$M(2, 0, t) = 1 + 3e^{-2\mu t} - 4e^{-1,5\mu t};$$

$$M(2, 1, t) = 4(e^{-1,5\mu t} - e^{-2\mu t});$$

$$M(2, 2, t) = e^{-2\mu t};$$

$$M(1, 2, t) = 1.$$

Інші елементи дорівнюють 0.

Далі, підставляємо значення вектор-рядка  $T$  в матрицю  $Q(t)$ , отримуємо:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0,011 & 0,117 & 0,402 & 0,470 \\ 0 & 0,111 & 0,447 & 0,4653 \\ 0,608 & 0,296 & 0,096 & 0 \\ 0,577 & 0,271 & 0,117 & 0,035 \end{bmatrix}.$$

Розв'язуючи систему рівнянь виду (14), маємо

$$S = \|0,303 \ 0,200 \ 0,261 \ 0,236\|.$$

Перевіряється виконання умови (15):

$$\sum_{i=1}^4 S_i = 0,303 + 0,200 + 0,261 + 0,236 = 1,$$

тобто умова (15) – виконується.

З урахуванням (16) по формулі (17) обчислюється значення  $K_{rel}(T)$ :

$$K_{rel}(T) = \frac{0,303 \cdot 57,8 + 0,200 \cdot 44,5}{0,303 \cdot 76 + 0,200 \cdot 56 + 0,221 \cdot 12,17 + 0,236 \cdot 17,7} = 0,714.$$

Таким чином показано практичне застосування запропонованих підходів до визначення показників надійності динамічних систем, функціонування котрих характеризується режимом профілактики, в основу яких (підходів) покладено відповідні математичні моделі.

**Висновки.** Запропоновано підходи до визначення узагальненого показника надійності динамічних систем, функціонування яких характеризується режимом профілактики. Підходи ґрунтуються на застосуванні моделей, побудованих на вкладених ланцюгах Маркова. Відмінною особливістю запропонованих підходів є можливість прогнозу періодичності профілактик по реальному стану динамічних систем, а також за умови обмеження терміну профілактичних робіт. Виконано тестові дослідження запропонованих підходів, які показали їх дієвість та прикладну спроможність. Подальшим розвитком запропонованих підходів щодо забезпечення надійності динамічних систем доцільно розглядати випадки прогнозу, коли динамічні системи складаються з елементів, які мають суттєво відмінну складність (що зумовлює різну тривалість та періодичність профілактик для окремих елементів динамічної системи), а також, якщо метою профілактики є забезпечення необхідного рівня надійності динамічної системи у продовж часу, необхідного для виконання останньою поставленої задачі.

### Список літератури:

1. Sunday A. Adedigba, Faisal Khan, and Ming Yang. Dynamic Failure Analysis of Process Systems Using Principal Component Analysis and Bayesian Network. In: Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017. 56 (8). PP. 2094-2106. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b03356.
2. Xiaohui Y., Wuzhi Z., Xinli S., Guoyang W., Tao L. and Zhida S. Review on power system cascading failure theories and studies: proceedings of the International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2016. PP. 1-6. DOI: 10.1109/PMAPS.2016.7764167.
3. Zheng Z., Liu M., Zhang Z., Dong J. and Xie M. Distance-Based Distributionally Robust Optimization for a Preventive Maintenance Schedule in Hydrothermal Power Systems. In: IEEE Systems Journal. 2023. Vol. 17. No. 4. PP. 5487-5498. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3324647.
4. Wang H., Jiang T., Xu S. and Xie Y. On the robust outer loop control of robotic systems: proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017. PP. 1260-1264. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8027523.
5. Ma Q., Zhu Y., Liu M., Chang D., Pu Q. and Li C. Closed-loop Simulation Method of Stability Control System Based on Virtual Component Technology. In: IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2022. PP. 1561-1564. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10116748.
6. Song J., Cotilla-Sanchez E., Ghanavati G. and Hines P. D. H. Dynamic Modeling of Cascading Failure in Power Systems. In: IEEE Transactions on Power Systems, 2016. Vol. 31. No. 3. PP. 2085-2095. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2439237.
7. Ji J., Guo S. and Xi F. J. Dynamic Modeling and Optimization of a Fall Prevention Device Using Genetic Algorithm. In: 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2018. PP. 66-71. DOI: 10.1109/ICARM.2018.8610783.

8. Креденцер, Б.П., Ленков С. В., Міночкін А. І., Могилевич Д. І., Резніков М. І Технічне обслуговування систем з почасовою надмірністю. Київ, 2009. 172 с.
9. Мандзій Б. А., Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д., Змисний М. М., Кулик І. В. Оцінювання показників надійності відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури з врахуванням параметрів стратегії аварійного відновлення. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації*. 2011. №705. С. 216–224.
10. Положаєнко, С. А., Прокоф'єва Л. Л. Планування діагностичного експерименту при локалізації несправностей підсхем безінерційних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2018. Т. 8. № 1. С. 5–16. DOI: 10.15276/imms.v8.no1.5.
11. Verlan, A., Polozhaenko, S. Formalization of Representation of Sequence of Test Hypotheses in Diagnosing Electronic Schemes: proceedings of the IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO, 2018. PP. 548–551. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8477496>.
12. Verlan A., Polozhaenko S. Diagnostics of Linear Systems in the State Space. *Problemele Energeticii Regionale*. 2019. Т. 41. №. 1-2. PP. 25-35. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239162>.
13. Shen J., Ma X., He P., Zhang J., Yang Q. and Wei K. A Methodology to Evaluate the Safety Prevention and Control System Effectiveness for a Ship Underway. In: 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2021. PP. 721-725. DOI: 10.1109/ICTIS54573.2021.9798554.
14. S. -n. Zhang et al. A Markov Chain Model with High-Order Hidden Process and Mixture Transition Distribution. In: International Conference on Cloud Computing and Big Data, 2013. PP. 509-514. DOI: 10.1109/CLOUDCOM-ASIA.2013.23.

**Polozhaenko S.A., Prokofiev A.Ju. MODELS FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF DYNAMIC SYSTEMS, THE FUNCTIONING OF WHICH IS CHARACTERIZED BY THE MODE OF PREVENTION**

*The work examines the issues of forecasting the reliability of dynamic systems for cases when their operation involves preventive maintenance. The forecast is based on the application of mathematical methods and relevant models.*

*During the actual operation of technical systems (the vast majority of which can be considered as dynamic systems), certain difficulties arise in maintaining a given level of their performance, which can be compensated by justified maintenance regimes, for example, prevention - with a simultaneous assessment of the reliability of a dynamic system that has undergone restorative (the essence - preventive) works. At the same time, carrying out certain types of preventive measures for a dynamic system, determining their duration and the time of inter-preventive operation, requires rational planning, which can be provided, in particular, by predictive modeling. At the same time, in the practice of forming prevention regimes of dynamic systems, a whole range of problems appears, the solution of which requires the presence of incomplete information about reliability. Such a situation occurs throughout the life of dynamic systems, which urgently requires the development of applied mathematical research methods. Their use allows you to monitor the qualitative change in reliability indicators and to plan the necessary preventive measures in advance.*

*Contradictions arise in the organization of preventive work for service personnel: on the one hand, it is necessary to increase the reliability of equipment (which can also be considered as dynamic systems from the point of view of systems theory) due to the implementation of preventive measures, which requires significant expenditure of time and material resources; on the other hand, it is economically unprofitable to remove equipment from the production cycle for preventive purposes for a long time. Therefore, there are optimal conditions for conducting preventive maintenance of equipment (dynamic systems), under which sufficiently high reliability of these systems is ensured, provided that the time of removal from the production cycle of the latter is minimized. Thus, a scientifically based complex of preventive maintenance allows you to maintain the level of reliability of the dynamic system, which is built into it at the stages of design and production.*

**Key words:** dynamic system, reliability, prevention, utilization ratio, model, Markov chain.

**Пфайфер В.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Бешлей М.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Селюченко М.О.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Брич М.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Климаш М.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ОНОВЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У межах даної роботи увагу сфокусовано навколо питання оновлення ПЗ, зокрема таких компонентів, як бібліотеки, модулі, та фреймворки, оскільки їх використання при написанні коду стало загальною практикою в сучасній розробці завдяки таким перевагам як повторне використання коду, модульність, стандартизація коду, та підвищення швидкості розробки. Проте, попри переваги, використання залежностей має й свої ризики – конфлікти версій, проблеми сумісності при оновленні, залежність від сторонніх сервісів, прогалини в безпеці.

У роботі проведено аналітичний огляд ключових аспектів життєвого циклу розробки програмного забезпечення (SDLC) та методології безперервної інтеграції та розгортання змін (CI/CD), проаналізовано ключові аспекти тестування продуктивності програмних інтерфейсів (API), та досліджено концепцію залежностей від коду (Code Dependencies) і процес їх оновлення загальноприйнятим методом. Удосконалено метод оновлення компонентів ПЗ, шляхом повної автоматизації кроків, та розроблено відповідний сценарій для автоматизації процесу в середовищі GitHub Actions, і досліджено виконання удосконаленого методу. Проведено порівняльний аналіз ефективності ручного, напівавтоматизованого та повністю автоматизованого методів. Експериментальні результати підтверджують, що розроблений повністю автоматизований метод оновлення залежностей ПЗ в контексті розробленого тестового середовища є на 36% ефективнішим від напівавтоматичного методу та виключає активну участь розробника, що зменшує його витрати часу на більше ніж 90%. Повна автоматизація в свою чергу виключає помилку внаслідок людського фактору, що гарантує стабільну продуктивність та безпеку функціонування розподілених інформаційно комунікаційних систем.

**Ключові слова:** CI/CD, Залежності, Автоматизація розгортання ПЗ, Оновлення ПЗ.

**Постановка проблеми.** Оновлення програмного забезпечення це невід’ємна і надзвичайно важлива складова його життєвого циклу, оскільки забезпечує виправлення помилок, вдосконалення безпеки та впровадження нових функцій. Особливо це важливо для програмного забезпечення, яке відповідає за функціонування та управління складними розподіленими системами які повсюдно використовуються, зокрема, програмні маршрутизатори чи комутатори, контролери мереж, шлюзи, фаєрволи, сервери, елементи ядра мобільних систем, такі як реєстри, пакетні комутатори, білінг системи і т.д. Процес

розробки і оновлення ПЗ неможливий без його розгортання, який базується на методах безперервної інтеграції та безперервного розгортання, або CI/CD (Continuous Integration & Continuous Delivery). Звичною практикою в сучасній розробці програмного забезпечення стало використання залежностей – сторонніх бібліотек, які є по суті окремим ПЗ, яке також повинно постійно розвиватися, щоб відповідати стандартам безпеки і залишатися актуальним. Одним з недоліків поширеного в ІТ галузі методу CI/CD є неможливість визначити які саме оновлення спричинили раптове зниження продуктивності розподіленої

системи. Для критичних систем управління, така ситуація неприпустима, адже одразу призведе до збільшення часу прийняття рішень та погіршення продуктивності, доступності та якості обслуговування користувачів. У випадках коли критичне ПЗ потребує термінового оновлення через те, що необхідно виправити критичну несправність чи виявлену прогалину в безпеці, тривалість розробки, тестування та розгортання повинні бути мінімізовані, для того, щоб гарантувати стабільну, надійну та безпечну роботу всієї розподіленої системи. В цьому полягає ще один суттєвий недолік існуючого методу CI/CD, оскільки у випадку погіршення продуктивності ПЗ після оновлення, тривалість пошуку та виправлення причини, яка призвела до уповільнення роботи розподіленої системи, залежить від ручного процесу який покладається на розробників системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У великих та складних проєктах правильне керування залежностями є важливим завданням, що вимагає системного підходу до планування, вибору та підтримки залежностей для забезпечення надійності та ефективності програмного забезпечення [1]. Використання інструменту керування залежностями заощаджує час і ресурси, а також робить код більш портативним і відтворюваним [3]. Деякі приклади інструментів керування залежностями: npm для JavaScript, pip для Python, Maven для Java та Bundler для Ruby. Використання зовнішніх залежностей в програмному забезпеченні несе ризики, особливо у випадку оновлення цих залежностей у застарілих проєктах. У такому випадку може виникнути ефект доміно через проблеми сумісності, коли оновлення однієї бібліотеки може вимагати оновлення інших, через помилки або проблеми з безпекою. У разі зміни API цих залежностей, це може вимагати повного переписування програмного коду. У великих корпоративних програмах часто залишаються невикористані залежності у файлі маніфесту, навіть якщо вони більше не використовуються у коді. Це може призвести до збільшення розміру двійкових файлів, займати більше ресурсів та часу при запуску програми. Також можливі конфлікти між бібліотеками при додаванні нових залежностей, а також використання застарілих бібліотек, які містять помилки або проблеми з безпекою. Проблеми сумісності при оновленні бібліотек та вплив на продуктивність через збільшений обсяг коду можуть стати суттєвими [2]. Попередні дослідження проведені на аналізі 2700 бібліотек для Java у 4600 проєктах

на платформі GitHub показало, що 81,5% залишаються застарілими, і містять проблеми пов'язані з безпекою [4]. Інше з досліджень виявило, що такі фактори, як невизначеність при оцінці зусиль для рефакторингу, інші пріоритети завдань, та відповідальність за ризики, служать причинами, з яких розробники не оновлюють залежності [5].

**Метою роботи** є забезпечити надійну, стабільну та безпечну роботу розподілених інформаційно-комунікаційних систем шляхом автоматизації процесу оновлень компонентів програмного забезпечення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Перш за все необхідно дослідити, як здійснюється метод оновлення залежностей програмного забезпечення вручну та яка його ефективність. Для цього здійснено наступні кроки:

- Розроблено веб застосунок для оплати послуг онлайн, побудований на базі фреймворку Express для Node.js.
- Налаштовано Azure WebApps як платформу для розгортання та виконання розробленого веб застосунку.
- За допомогою Cypress розроблено комплекс автоматизованих тестів, що охоплює три рівні тестування: модульні тести (unit tests / component tests); тести користувацького інтерфейсу (e2e tests); тести продуктивності (performance tests).
- Для проведення тестів продуктивності додатку налаштовано інструмент тестування якості веб-сайтів Lighthouse.
- Створено репозиторій з кодом веб застосунку та всіма розробленими автоматизованими тестами на платформі GitHub.

В процесі аналізу та декомпозиції виокремлено 9 основних етапів методу оновлення залежностей програмного забезпечення, а також поставлено у відповідність кроки, які необхідно здійснити в контексті розробленого нами веб застосунку для оновлення його залежностей з використанням налаштованих інструментів (табл. 1).

В ході проведеного експерименту з використанням ручного методу всі кроки здійснено вручну, а саме аналіз поточного стану бібліотек ПЗ та їх вразливостей. Далі здійснено оновлення компонента ejs, що містить критичну вразливість. Після цього проведено розгортання коду у віддаленому середовищі, та ряд тестів, результати яких є вдалими. На останньому кроці було синхронізовано локальні зміни із віддаленим середовищем та злито зміни в гілку розробки. Увесь процес оновлення ручним методом триває 47 хвилин і потребує стільки ж часу розробника (табл. 2).



Таблиця 1  
Послідовність кроків виконання експерименту

| Крок                                                        | Команда                                    |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Перевірка актуального стану бібліотек                       | npm outdated                               |
| Аналіз наявних вразливостей                                 | npm audit                                  |
| Оновлення бібліотеки до нової версії                        | npm install                                |
| Розгортання коду у віддаленому середовищі                   | -                                          |
| Виконання автоматизованих модульних тестів                  | cypress run --component                    |
| Виконання автоматизованих тестів користувацького інтерфейсу | cypress run --e2e --spec 'unitTests.cy.js' |
| Виконання автоматизованих тестів швидкодії                  | cypress run --e2e --spec 'perfTests.cy.js' |
| Аналіз результатів тестування                               | -                                          |
| Злиття змін з гілкою розробки                               | git add git push                           |

Таблиця 2  
Затрати часу на виконання кроків поточним методом

| Крок                                                        | Час, хв     |           |
|-------------------------------------------------------------|-------------|-----------|
|                                                             | Розробників | Загальний |
| Перевірка актуального стану бібліотек                       | 5           | 5         |
| Аналіз наявних вразливостей                                 | 5           | 5         |
| Оновлення бібліотеки до нової версії                        | 1           | 1         |
| Розгортання коду у віддаленому середовищі                   | 5           | 5         |
| Виконання автоматизованих модульних тестів                  | 10          | 10        |
| Виконання автоматизованих тестів користувацького інтерфейсу | 10          | 10        |
| Виконання автоматизованих тестів швидкодії                  | 5           | 5         |
| Аналіз результатів тестування                               | 5           | 5         |
| Злиття змін з гілкою розробки                               | 1           | 1         |

На рисунку 1 зображено діаграму, яка висвітлює послідовність процесів напівавтоматизованого методу, який виконується за методологією CI/CD.

У напівавтоматизованій версії методу ручного оновлення чотири кроки виконуються автоматично (етап тестування), а два перших – напівавтоматично (етап аналізу), інші три кроки: оновлення бібліотеки, аналіз результатів, злиття – виконуються вручну. Загальний час на оновлення залишився незмінним 47 хв., проте затрати часу розробника зменшилися до 19 хв. (табл. 3) завдяки частковій автоматизації процесів з вико-

ристанням інструментів CI/CD. З практичної точки зору, затрати часу працівника на ініціалізацію й виконання автоматизованих кроків є рівними нулю, проте з ціллю коректної візуалізації отриманих результатів на графіках, приймемо, що кожен автоматизований крок займає 0.5 хв. часу розробника. Цей час відведено для періодичного моніторингу успішності ходу виконання процесів.

У даній роботі удосконалено метод оновлення залежностей шляхом повної автоматизації всіх кроків ручного методу. Зокрема, використано ширший спектр функцій CI/CD, що дозволяють автоматизувати ручні дії: оновлення версії бібліотеки, аналіз результатів тестування, злиття гілок. Діаграму запропонованого рішення зображено на рисунку 2.

Таблиця 3  
Затрати часу на виконання кроків напівавтоматизованим методом

| Крок                                                        | Час розробників, хв | Час виконання, хв |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Перевірка актуального стану бібліотек                       | 5                   | 5                 |
| Аналіз наявних вразливостей                                 | 5                   | 5                 |
| Оновлення бібліотеки до нової версії                        | 1                   | 1                 |
| Розгортання коду у віддаленому середовищі                   | 0.5                 | 5                 |
| Виконання автоматизованих модульних тестів                  | 0.5                 | 10                |
| Виконання автоматизованих тестів користувацького інтерфейсу | 0.5                 | 10                |
| Виконання автоматизованих тестів швидкодії                  | 0.5                 | 5                 |
| Аналіз результатів тестування                               | 5                   | 5                 |
| Злиття змін з гілкою розробки                               | 1                   | 1                 |

У порівнянні з розглянутими ручним та напівавтоматизованими методом (рис. 1), розроблений варіант дозволяє повністю автоматизувати кроки перевірки актуальності залежностей, вразливостей, та оновлення їх версій завдяки використанню відповідних сторонніх сервісів. У ролі такого сервісу використовується Dependabot, який містить набір необхідних функцій, а також є вбудованим у платформу GitHub.

Наступним покращенням є автоматизація аналізу результатів тестування, та ініціалізації злиття гілок. Це здійснюється шляхом модифікації наявного сценарію конвеєру, у який додається додаткова дія з використання функцій загальнодоступного розширення github-action-merge-dependabot.

Розглянемо хід виконання автоматизованих процесів реалізованого конвеєру. Спершу бот здій-

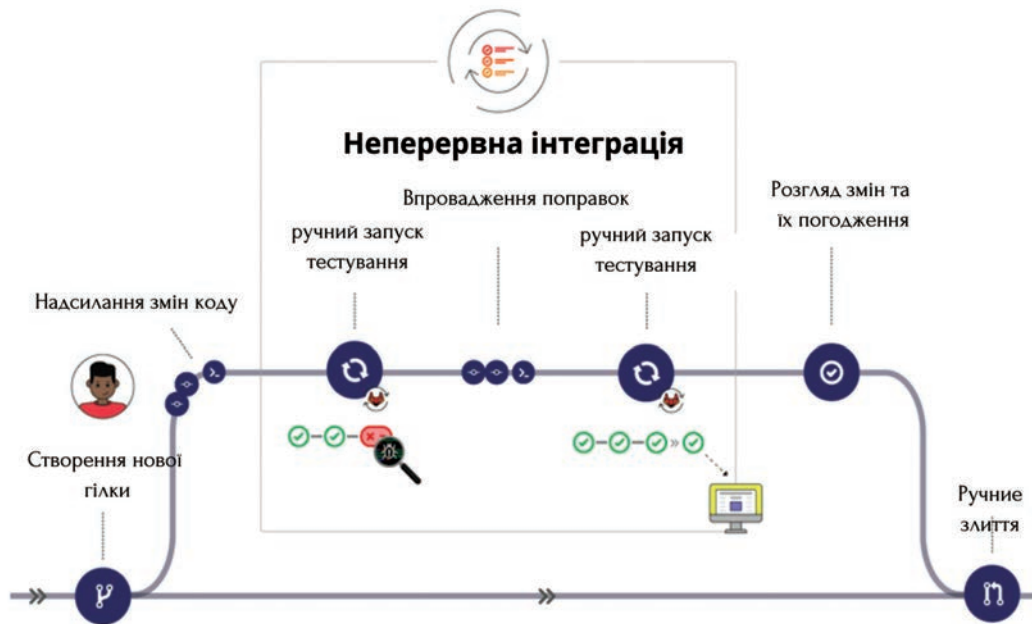


Рис. 1. Діаграма процесів напівавтоматизованого методу оновлення залежностей

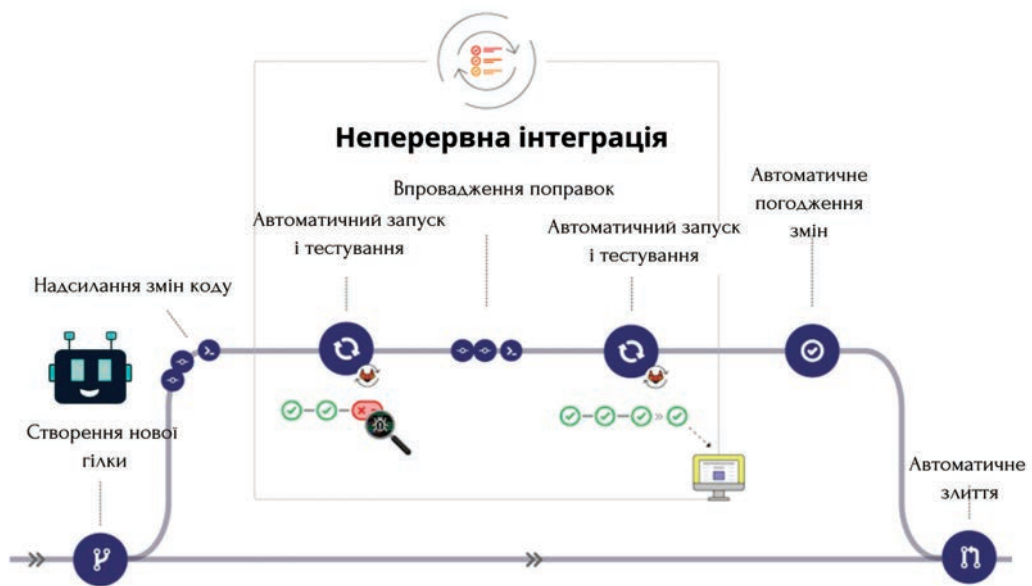


Рис. 2. Діаграма розробленого методу оновлення залежностей

снює аналіз версій бібліотек додатку, і відкриває пул-запити на оновлення тих, версії яких є застарілими (рис. 3). Конвеєр знаходиться в сплячому режимі, доки Dependabot не ініціалізує новий пул-запит. Після відкриття пул-запитів розпочинається почергове виконання конвеєрів на відповідних гілках розробки (кожна з яких містить оновлення окремої бібліотеки), оскільки спрацює подія (on: pull-request).

Далі здійснюється виконання всіх вищезгаданих кроків. З рисунку 4 слідує, що розпочалося

оновлення бібліотеки ejs (версія 2.6.2) до актуальної версії 3.1.9. Результати проходження модульних тестів є вдалими, генерується архів з оновленим кодом. Після чого оновлена версія застосунку розгортається у сервісі Azure WebApp (доступ за посиланням <https://payment-form-test-0101.azurewebsites.net>), і починається наступний етап – тестування користувацького інтерфейсу та продуктивності додатку. Оскільки результати тестів є також вдалими, ініціалізується автоматичне об’єднання змін з гілкою development.

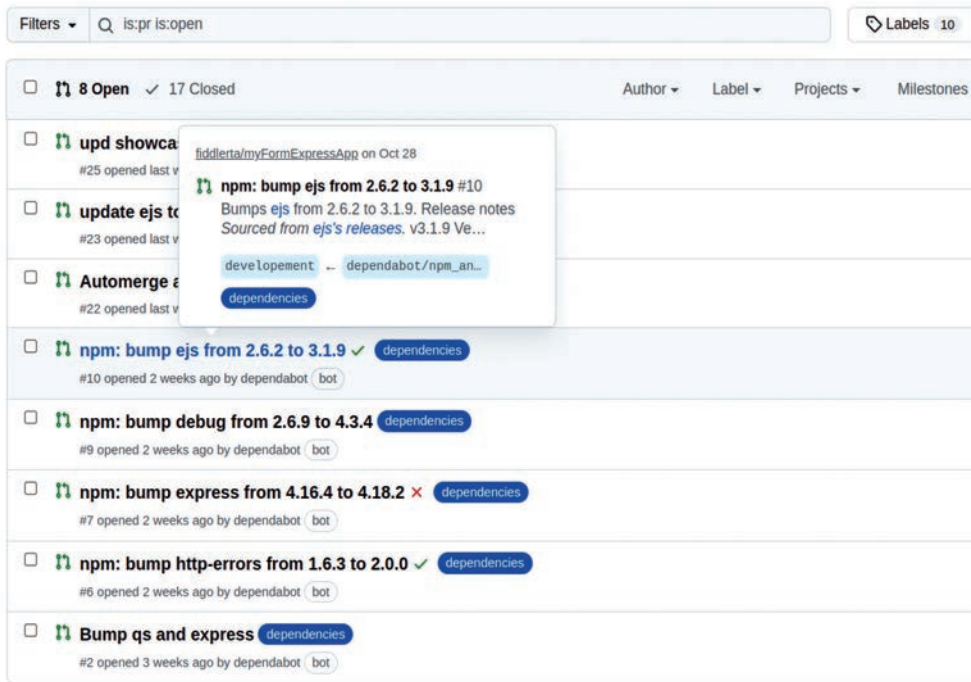


Рис. 3. Перелік пул-запитів відкритих ботом Dependabot

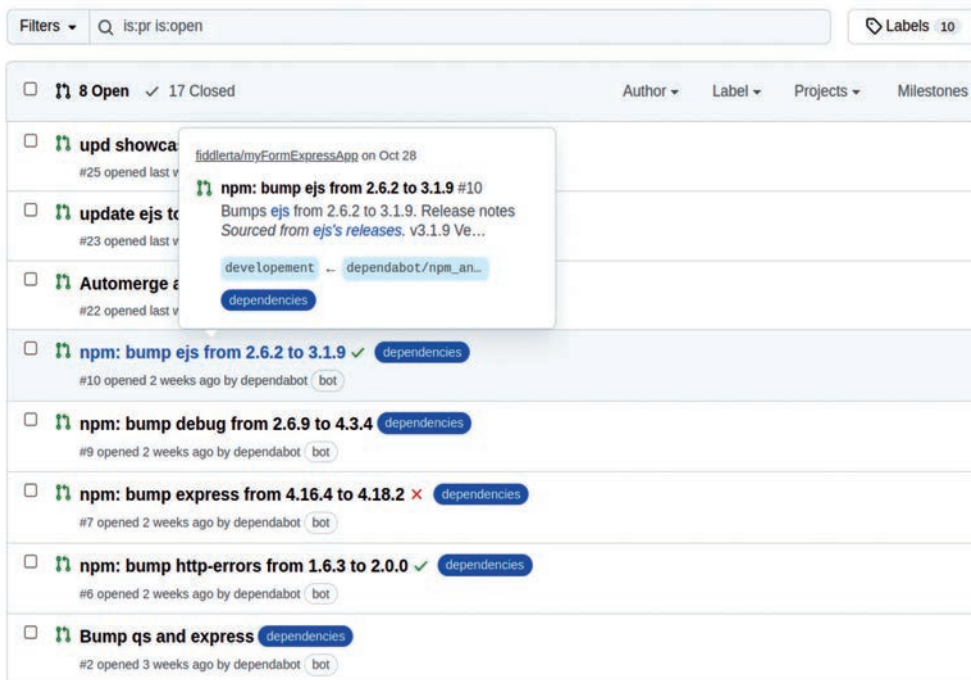


Рис. 4. Хід виконання процесів конвеєру для оновлення бібліотеки ejs

У ході успішного завершення всіх процесів, відбулося автоматичне об'єднання змін з гілки ejs із головною – development. Щоб переконатися в цьому відкриємо пул-запит гілки ejs (рис. 5) – як бачимо наразі запит об'єднано і закрито.

З результатів слідує, що побудований конвеєр на основі інтеграції з ботом Dependabot, сервісом Azure WebApp, та використанням можливос-

тей GitHub Actions на платформі GitHub виконує поставлену ціль автоматичного аналізу та оновлення застарілих версій бібліотек програмного забезпечення.

В ході проведеного експерименту з використанням удосконаленого автоматизованого методу перші три етапи експерименту, а саме перевірка актуального стану бібліотек, аналіз існуючих

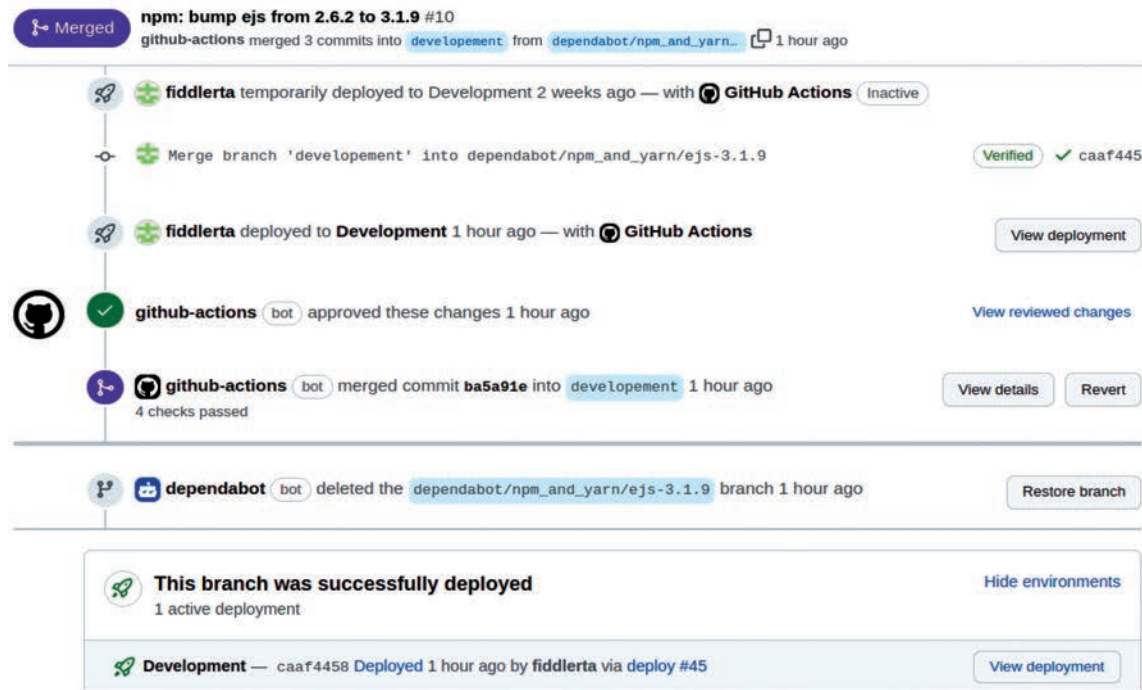


Рис. 5. Вікно пул-запиту для гілки з оновленням бібліотеки ejs

вразливостей та оновлення бібліотеки, виконуються автоматично за допомогою вбудованого сервісу Dependabot. Це дозволяє значно зекономити час розробника та забезпечити швидке реагування на зміни в екосистемі використовуваних бібліотек.

Кроки 4, 5, 6 та 7, які включають розгортання коду та виконання автоматизованих тестів, також виконуються автоматично, надаючи додаткову автоматизацію та покращення швидкості виконання цих етапів (таблиця 4).

Таблиця 4

**Затрати часу на виконання кроків автоматизованим методом**

| Крок                                                        | Час розробників, хв | Час виконання, хв |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Перевірка актуального стану бібліотек                       | 0.5                 | 0                 |
| Аналіз наявних вразливостей                                 | 0.5                 | 0                 |
| Оновлення бібліотеки до нової версії                        | 0.5                 | 0                 |
| Розгортання коду у віддаленому середовищі                   | 0.5                 | 3                 |
| Виконання автоматизованих модульних тестів                  | 0.5                 | 10                |
| Виконання автоматизованих тестів користувачького інтерфейсу | 0.5                 | 10                |
| Виконання автоматизованих тестів швидкодії                  | 0.5                 | 5                 |
| Аналіз результатів тестування                               | 0.5                 | 0                 |
| Злиття змін з гілкою розробки                               | 0.5                 | 0.1               |

Останні два кроки, 8 та 9, що передбачають аналіз результатів тестування та злиття змін з гілкою розробки, тепер виконуються завдяки функціональності CI/CD платформи GitHub Actions. Ця дія автоматично перевіряє успішність пройдених тестів та, у випадку їх успішного виконання, ініціює автоматичне об'єднання гілки, створеної Dependabot, з головною гілкою розробки (development). Такий механізм значно збільшує ефективність та автоматизує фінальні кроки процесу розробки та тестування.

У цьому експерименті виконання дев'яти послідовних кроків для оновлення однієї залежності тривало близько 30 хв, що на 17 хв. хвилин менше ніж у двох попередніх експериментах, завдяки тому, що всі інші етапи крім тестування займають в середньому 3 хв., а середня тривалість проходження тестів 25–27 хв., проте повна автоматизація процесу зводить до нуля затрати часу розробника.

*Порівняння ефективності розглянутих методів.*

Порівнюючи результати проведених експериментів, можна визначити вагомі покращення у виконанні процесу оновлення залежностей у програмному забезпеченні при використанні автоматизації (табл. 5).

У першому експерименті, коли весь процес оновлення виконувався вручну, затрати часу розробника становили приблизно 47 хвилин.

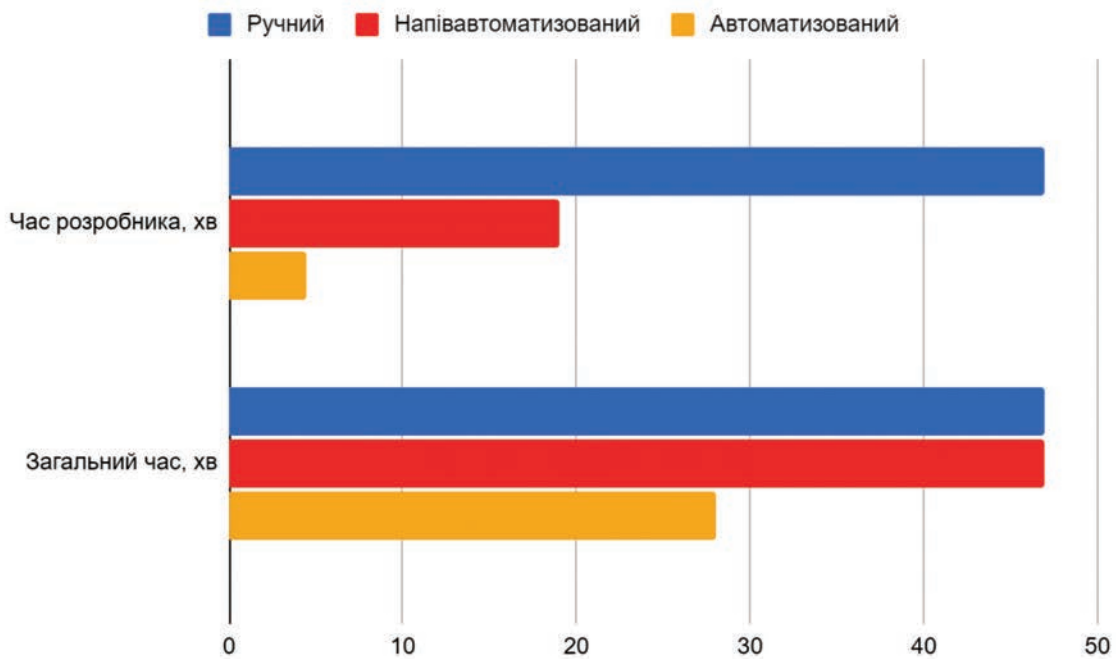


Рис. 6. Порівняльна діаграма витрат часу розробника в залежності від обраного методу

Таблиця 5

Порівняльна таблиця витрат часу розробників на виконання кроків розглянутими методами

| Крок / Метод                                                | Час розробника, хв |     |     | Загальний час, хв |    |     |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|-----|-----|-------------------|----|-----|
|                                                             | Р                  | Н   | А   | Р                 | Н  | А   |
| Перевірка актуального стану бібліотек                       | 5                  | 5   | 0,5 | 5                 | 5  | 0   |
| Аналіз наявних вразливостей                                 | 5                  | 5   | 0,5 | 5                 | 5  | 0   |
| Оновлення бібліотеки до нової версії                        | 1                  | 1   | 0,5 | 1                 | 1  | 0   |
| Розгорання коду у віддаленому середовищі                    | 5                  | 0,5 | 0,5 | 5                 | 5  | 3   |
| Виконання автоматизованих модульних тестів                  | 10                 | 0,5 | 0,5 | 10                | 10 | 10  |
| Виконання автоматизованих тестів користувацького інтерфейсу | 10                 | 0,5 | 0,5 | 10                | 10 | 10  |
| Виконання автоматизованих тестів швидкодії                  | 5                  | 0,5 | 0,5 | 5                 | 5  | 5   |
| Аналіз результатів тестування                               | 5                  | 5   | 0,5 | 5                 | 5  | 0   |
| Злиття змін з гілкою розробки                               | 1                  | 1   | 0,5 | 1                 | 1  | 0,1 |
| Сума                                                        | 47                 | 19  | 4,5 | 47                | 47 | 28  |

У другому експерименті, з використанням елементів автоматизації, час виконання всього процесу залишився на однаковому рівні, склавши також 47 хвилин. Однак важливо відзначити, що використання автоматизації знизило затрати часу розробника до 19 хвилин, що становить трохи більше ніж дві третини загального часу виконання процесу.

У третьому експерименті, де було впроваджено повністю автоматизований метод, виділяється радикальне покращення. Затрати часу розробника стали нульовими, оскільки усі кроки автоматизовано. Важливо врахувати, що для візуалізації результатів на графіку прийнято, що кожен крок займає 0.5 хвилини, а отже, сумарні витрати складають лише 4.5 хвилин.

На рис. 6 показано, що впровадження повністю автоматизованого методу призвело до значного зменшення часових затрат розробника, підвищивши ефективність та швидкість виконання процесу оновлення залежностей у програмному забезпеченні.

**Висновки.** Розроблений автоматизований метод оновлення програмного забезпечення на 36% зменшує загальну тривалість оновлення програмних компонентів та на 90% зменшує залучення розробника в процес оновлення. В контексті інфокомунікаційних систем та мереж розроблений метод дозволяє оперативно реагувати на випуск нових версій бібліотек та швидко впроваджувати їх у систему. Це сприяє підтримці безпеки мережевого обладнання та забезпеченню відповідності

останнім стандартам безпеки. Автоматичне впровадження змін також допомагає зменшити кількість рутинної роботи та ризик помилок, що можуть виникнути при ручному оновленні. За рахунок автоматизованого процесу досягається

підвищення ефективності та зниження часових витрат. Ці фактори стають важливими в контексті інфо-комунікаційних систем, де оперативність та надійність є ключовими вимогами для забезпечення безперебійного функціонування системи.

#### Список літератури:

1. Sonatype: What Are Software Dependencies? // електрон. текст. дані URL: <https://www.sonatype.com/launchpad/what-are-software-dependencies>
2. Snyk.io: Best practices for managing Java dependencies // електрон. текст. дані URL: <https://snyk.io/blog/best-practices-for-managing-java-dependencies/>
3. LinkedIn.com: How do you handle complex and interdependent software components and dependencies? // електрон. текст. дані URL: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-handle-complex-interdependent-software-components>
4. Do developers update their library dependencies? / R. G. Kula et al. Empirical Software Engineering. 2017. Vol. 23, no. 1. P. 384–417. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-017-9521-5>
5. Hejderup J., Gousios G. Can we trust tests to automate dependency updates? A case study of java projects. Journal of Systems and Software. 2021. P. 111097. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111097>.

#### **Pfaifer V.M., Beshley M.I., Seliuchenko M.O., Brych M.V., Klymash M.M. AUTOMATION OF THE SOFTWARE UPDATE OF DISTRIBUTED INFOCOMMUNICATION SYSTEMS**

*Within the framework of this work, attention is focused around the issue of updating software, in particular such components as libraries, modules, and frameworks, since their use when writing code has become a common practice in modern development due to such advantages as code reuse, modularity, code standardization, and improvement speed of development. However, despite the advantages, the use of dependencies has its own risks – version conflicts, compatibility problems during updating, dependence on third-party services, security gaps.*

*The paper provides an analytical review of key aspects of the software development life cycle (SDLC) and continuous integration and change deployment (CI/CD) methodology, analyzes key aspects of API performance testing, and explores the concept of code dependencies (Code Dependencies) and the process of updating them by a generally accepted method.*

*The method of updating software components has been improved by fully automating the steps, and a corresponding script has been developed to automate the process in the GitHub Actions environment, and the implementation of the improved method has been investigated. A comparative analysis of the effectiveness of manual, semi-automated and fully automated methods was carried out. Experimental results confirm that the developed fully automated method of updating software dependencies in the context of the developed test environment is 36% more efficient than the semi-automatic method and excludes the active participation of the developer, which reduces his time consumption by more than 90%. Full automation, in turn, excludes errors due to the human factor, which guarantees stable performance and safety of distributed information and communication systems.*

**Key words:** *CI/CD, Dependencies, Software Deployment Automation, Software Update.*

УДК 004.054

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/44>**Тарновецька О.Ю.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Газдюк К.П.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Бален С.М.**

SoftServe

**Дмитрашук К.М.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ІНТЕРНЕТ СИСТЕМИ ДО МОНІТОРИНГУ, ВИКОРИСТОВУЮЧИ СУЧАСНІ DEVOPS ТЕХНОЛОГІЇ

У роботі було проведено аналіз сучасних DevOps технологій, зроблено дослідження існуючих систем моніторингу та розроблено власну систему моніторингу. Під час виконання дослідження та удосконалення методів швидкого підключення інтернет-систем до системи моніторингу з використанням сучасних технологій DevOps у розробці програмного забезпечення був проведений аналіз схожих проєктів, таких як UptimeRobot, Secom, site24x7. Це дозволило визначити, що ключовими функціями таких систем є можливість швидкого підключення, мінімальний моніторинг системи, цілодобова підтримка та додаткові опції.

Для ефективної реалізації моніторингової системи була виявлена потреба у розширенні спектру доступних метрик, що стосуються стану віртуальної машини, на якій розташована інтернет-система. Для реалізації системи моніторингу було обрано платформу хмарних обчислень AWS, використано інструмент інфраструктури як коду Terraform, інструмент для налаштування систем та розгортання програмного забезпечення Ansible, інструмент моніторингу та оповіщення систем Prometheus, інструмент аналітики та інтерактивної візуалізації Grafana, інструмент автоматизації Jenkins, а також сервіс для збору показників продуктивності системи та програми collectd.

Були розроблені алгоритми для етапів розгортання та налаштування систем, і виявлено необхідні конфігураційні файли. Процес розгортання моніторингової системи було автоматизовано за допомогою інструмента для автоматизації Jenkins. Розроблений алгоритм готовий до промислового використання та може бути використаний для автоматизації підключення моніторингу до інтернет-системи.

У перспективі ця система може бути покращена за допомогою оптимізації через використання Docker контейнера. Крім того, її функціональність може бути розширена шляхом надання можливості підключення до моніторингу різноманітних систем. Це дозволить системі моніторингу бути більш гнучкою та адаптованою до різних вимог і інфраструктурних особливостей, що можуть виникнути в процесі розвитку та експлуатації. Такі розширення і оптимізації сприятимуть підвищенню ефективності та готовності системи до змін у майбутньому.

**Ключові слова:** моніторинг, інтернет система, налаштування, хмарні технології, автоматизація підключення.

**Постановка проблеми.** При створенні інтернет-системи розробники передбачають певне навантаження та безперервну ефективність роботи [1]. Однак заздалегідь визначити, яке саме буде це навантаження і коли можуть виникнути проблеми, є вкрай важким завданням. У зв'язку з цим часто використовується спеціальні інструменти, які підключають систему до моніторингу та відстежують її стан [2].

Робота присвячена аналізу та дослідженню автоматизації процесу підключення моніторингу

до системи за допомогою сучасних технологій DevOps, що здатні значно спростити та прискорити цей процес. Це дозволить використовувати моніторинг для більшої кількості систем із меншими витратами. У свою чергу, система моніторингу забезпечить швидку реакцію на можливі проблеми до того, як вони стануть очевидними для користувача. Вона також дозволить контролювати потребу у підвищенні потужності інтернет-систем та вивчати можливі проблеми в системах.

**Метою роботи** є дослідження та вдосконалення способів надання можливості швидкого підключення інтернет системи до моніторингу використовуючи сучасні DevOps технології в розробці ПЗ.

Встановлена мета обумовлює наступні завдання: дослідити існуючі системи моніторингу та доступні технології для створення моніторингу; обрати технології що будуть використовуватись для системи; визначити необхідні для моніторингу метрики [3]; розробити методології підключення системи; описати процес інтеграції та впровадження розроблених методів.

Об'єктом дослідження є технології, які дозволяють здійснювати моніторинг систем.

Предметом дослідження є використання хмарних технологій та програмного забезпечення для розгортання та підключення інтернет систем до моніторингових систем.

### Виклад основного матеріалу

#### Аналіз напрямків використання та аналогів моніторингових систем

Метою використання моніторингових систем є:

1. Отримання сповіщення про те, що веб-сайт перейшов у режим офлайн, важливо для того, щоб бути в курсі подій, що можуть призвести до недоступності сайту. Існує ряд причин, таких як проблеми з хостингом, несподівані зростання трафіку, вразливість перед шкідливим програмним забезпеченням або несправність плагінів, які можуть викликати виходження з ладу. Отже, отримавши таке сповіщення, ви можете швидко втрутитися та вжити заходів для відновлення роботи сайту в інтернеті, мінімізуючи можливі фінансові збитки.

2. Відслідковування стабільності сайту у зазначений період часу. Якщо є розуміння, що саме та коли несправно працює та відома можлива причина виникнення проблем, можна розробити відповідне рішення та гарантувати, що веб-сайт залишатиметься доступним в мережі якнайбільше часу.

3. Покращення ефективності веб-сайту [4], оскільки є можливість реагувати на проблеми негайно, що дозволяє уникнути отримання неприємних повідомлень від користувачів чи клієнтів, адже заходи приймаються при їх виникненні.

Підключення інтернет-системи до моніторингу є важливим та раціональним рішенням, оскільки воно забезпечує отримання інформації щодо стану роботи конкретної системи та можливість отримання сповіщень у випадку виникнення проблем. Такий підхід дозволяє вчасно реагувати на проблеми до того, як вони вплинуть на користувачів, а також тримати своїх клієнтів проінфор-

мованими про останні зміни. Це економить час і надає спокій. Більше того, можна отримати цінні дані для вирішення будь-яких проблем та планування стратегії вирішення перебоїв. На ринку моніторингових систем доступний широкий вибір інструментів та технологій, які сприяють вирішенню завдань, пов'язаних з моніторингом.

Для дослідження аналогів було обрано доступні програми [5–7], що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

#### Перелік аналогів системи моніторингу інтернет системи

| Назва                                                             | Розробник   | Умови ліцензії                                           |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------|
| <a href="https://uptimerobot.com/">https://uptimerobot.com/</a>   | UptimeRobot | \$15 в місяць                                            |
| <a href="https://secom.com.ua/">https://secom.com.ua/</a>         | Secom       | Від \$10 до \$20 + доплата за додаткові функції в місяць |
| <a href="https://www.site24x7.com/">https://www.site24x7.com/</a> | Zoho        | Від \$9 до \$449 в місяць                                |

Опишемо кожен із розглянутих програмних систем.

**UptimeRobot** має численні переваги, включаючи здатність швидкого підключення, надійну цілодобову підтримку та різноманітні способи отримання повідомлень, такі як електронна пошта, SMS, телефонні дзвінки, Twitter, Slack, Zapier, Telegram, Webhooks, Discord. Додатково, вона забезпечує можливість перевірки SSL сертифікатів, що підвищує рівень безпеки. Проте важливо відзначити, що існують певні недоліки, зокрема, обмежена доступність інформації про інтернет-систему може ускладнити виявлення проблем та прийняття рішень.

Перевагами **Site24x7** є великий вибір послуг, а саме: моніторинг сайту, швидкість веб-сторінки (браузер), моніторинг DNS-сервера, 110+ глобальних локацій моніторингу, моніторинг доступності веб-сайту (HTTP / HTTPS), моніторинг пошкодження веб-сайту, моніторинг передачі FTP, моніторинг REST API, моніторинг сертифікатів SSL/TLS, моніторинг веб-транзакцій (браузер), моніторинг реальних користувачів (веб), моніторинг роботи кінцевих користувачів, контролюйте свою внутрішню мережу, моніторинг доставки пошти, моніторинг веб-служби SOAP, моніторинг сервера Ping, порту (користувацький протокол), сервера POP, сервера IMAP і сервера SMTP.

**Secom** надає можливість швидкого підключення, цілодобова підтримка гнучкі умови,



можливість встановлення SSL, підтримка WHMCS, перенесення сайтів і даних, налаштування KVS, аудит сайту, аудит серверів. Недоліками програми є мала кількість доступної інформації про інтернет систему.

Аналізуючи перелік аналогів, можна зробити висновок, що більшість з них обмежуються базовим рівнем інформації про стан віртуальної машини, на якій розміщена інтернет-система. Брак деталізації у забезпеченні метрик та параметрів віртуальної машини може обмежувати користувача у вивченні та ефективному вирішенні можливих проблем.

Отже, для розробленої системи моніторингу важливими характеристиками обрано:

1. Швидкість підключення системи: Миттєвий доступ та спроможність оперативно реагувати на будь-які події або відхилення у роботі інтернет-системи.

2. Широкий спектр доступних метрик про стан віртуальної машини: Можливість отримання докладних та розширених метрик, що дозволяють глибоко аналізувати та відслідковувати різні аспекти роботи віртуальної машини, такі як ресурси, навантаження, мережева активність та інші параметри.

Ці характеристики допоможуть не тільки ефективно моніторити роботу інтернет-системи, але й нададуть користувачеві повний контроль та розуміння стану віртуальної машини, що є ключовим для вчасного виявлення, аналізу та усунення будь-яких можливих неполадок чи проблем.

### Обґрунтування вибору інструментальних засобів та вимоги до апаратного забезпечення

Для реалізації поставленого завдання, основними етапами є:

1. Створення акаунту на AWS.
2. Написати Terraform plan для двох віртуальних машин.
  - 2.1. Terraform plan для Інтернет системи:
  - 2.2. Terraform plan для моніторингу.
3. Написати Ansible Playbook:
  - 3.1. Ansible Playbook для налаштування віртуальної машини під роботу з Apache Maven та встановлення collectd.
  - 3.2. Ansible Playbook для налаштування віртуальної машини під роботу з Prometheus та Grafana.
  - 3.3. Ansible Playbook для підключення collectd до Prometheus.
4. Вивести метрики на панель.
5. Автоматизувати процес за допомогою Jenkins.
6. Протестувати систему.

Результатом реалізації поставленого завдання є розроблений план по реалізації CI pipeline (конвеєр Continuous Integration) [8] який розгортає інтернет сторінку та її моніторинг у AWS та надає можливість слідкувати за інтернет сторінкою, її станом та ресурсами в реальному часі для своєчасного реагування на проблеми.

Вибір платформи хмарних обчислень AWS для створення системи є раціональним рішенням [9], оскільки AWS надає широкий спектр послуг та інфраструктури для ефективного розгортання та управління системою. При цьому також розглядалися найбільш популярні альтернативи AWS, такі як Microsoft Azure, Google Cloud Platform, IBM Cloud, Alibaba Cloud, Oracle Cloud, DigitalOcean, встановлено їхні переваги та недоліки.

Використання Terraform для створення віртуальних машин на AWS дозволяє декларативно визначити інфраструктуру, що полегшує її керування та масштабування. Terraform є інструментом інфраструктури як коду (IaC), що надає можливість створення, зміни та версіонування інфраструктури безпечно та ефективно. Від низькорівневих компонентів, таких як обчислювальні екземпляри, сховище та мережа, до високорівневих компонентів, таких як записи DNS та функції SaaS.

Ansible в свою чергу є потужним інструментом для налаштування цих віртуальних машин, забезпечуючи консистентність та автоматизацію завдань адміністрування. Ansible призначений для налаштування систем, розгортання програмного забезпечення та виконання складних ІТ-завдань, таких як безперервне розгортання або безперервні оновлення.

Зібрання метрик за допомогою Prometheus та collectd дозволить ефективно моніторити роботу системи, отримуючи детальну інформацію про різні параметри та показники. Цей інструмент збирає та зберігає метрики у формі часових рядів, що означає, що дані про метрики фіксуються з позначкою часу, в яку вони були зафіксовані, разом із необов'язковими парами ключ-значення, що називаються мітками.

Використання Grafana для відображення цих метрик створить зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для моніторингу та аналізу стану системи. **Grafana** є універсальним інструментом для аналізу та взаємодії з даними. З його допомогою ви можете запитувати, візуалізувати, налаштувати сповіщення та отримувати зрозумілі показники незалежно від місця їх зберігання. Для коректної роботи необхідно правильно визначити джерело даних. В нашому випадку:

```
Datasource
grafana_datasource_name: Prometheus
grafana_datasource_type: prometheus
grafana_datasource_url_protocol: http
grafana_datasource_url: "{{ ansible_nodename }}:{{
prometheus_port }}"
grafana_datasource_basicauth: "false"
grafana_datasource_basicauth_user:
grafana_datasource_basicauth_password:
grafana_datasource_default: "true"
```

Вибір інструмента автоматизації процесів Jenkins [10] допомагає підвищити швидкість розробки програмного забезпечення через автоматизацію всіх етапів життєвого циклу розробки. Jenkins інтегрує всі необхідні процеси, такі як збірка, документація, тестування, пакування, стадії, розгортання, статичний аналіз та інші.

Безперервну інтеграцію у Jenkins забезпечують плагіни, що дозволяють інтегрувати різноманітні етапи DevOps. Якщо необхідно інтегрувати конкретний інструмент, достатньо встановити відповідні плагіни, такі як Git, проект Maven 2, Amazon EC2, HTML publisher та інші.

#### **Проектування системи моніторингу Розгортання віртуальних машин**

Процес розгортання віртуальних машин за допомогою Terraform включає в себе кілька етапів:

1. Ініціалізація робочого простору (Workspace Initialization):

Після створення конфігураційного файлу Terraform (зазвичай з розширенням .tf), використовуючи команду terraform init, відбувається ініціалізація робочого простору. Під час цього етапу Terraform завантажує необхідні плагіни та інші ресурси, необхідні для розгортання інфраструктури.

2. Планування (Planning):

Команда terraform plan дозволяє зрозуміти, які зміни буде вносити Terraform у розгорнуту інфраструктуру. Під час планування виводиться список ресурсів, які будуть створені, змінені чи видалені.

3. Застосування (Applying):

Після успішного планування можна використовувати команду terraform apply, яка вносить зміни в інфраструктуру відповідно до зазначеного плану. Terraform буде запитувати підтвердження перед виконанням змін.

4. Перевірка результатів:

Після виконання команди terraform apply можна перевірити стан інфраструктури, використовуючи команду terraform show або переглядаючи консольний вивід. Також рекомендується перевірити стан інфраструктури відповідно до

існуючих потреб, наприклад, з'єднання з віртуальною машиною через SSH або перегляд даних управління хмарним провайдером.

5. Знищення (Destroy):

Для видалення створених ресурсів можна використовувати команду terraform destroy. Це може бути корисним, наприклад, після завершення тестування або в разі потреби звільнення ресурсів.

AWS пропонує різні типи інстанцій, кожен з яких призначений для різних завдань та має власні характеристики. Ось кілька основних типів інстанцій, які варто враховувати:

1. General Purpose (загального призначення) – t3, t4g: призначені для загальних завдань, включаючи різноманітні застосування та веб-сервери. Вони забезпечують збалансовані обчислювальні та мережеві можливості.

2. Compute Optimized (оптимізовані під обчислення) – c5: підходить для обчислювально-інтенсивних завдань, таких як наукові обчислення та обробка даних.

3. Memory Optimized (оптимізовані під пам'ять) – r5: забезпечують великі обсяги оперативної пам'яті та призначені для застосувань, які вимагають великої кількості RAM, наприклад, бази даних та аналіз даних.

4. Storage Optimized (оптимізовані під зберігання) – i3: призначені для високопродуктивних додатків з великим обсягом введення/виведення (I/O), таких як бази даних з великим обсягом даних.

5. Accelerated Computing (прискорені обчислення) – p4, inf1, f1: забезпечують прискорене обчислення за допомогою графічних процесорів (GPU) або програмованих гейтових матриць (FPGA).

При виборі типу інстанції слід враховувати такі фактори:

1. обчислювальні потреби;
2. пам'ять;
3. зберігання;
4. бюджет.

Для нашого завдання підійде General Purpose тип, тож порівняємо їх підтипи:

Для розробленої системи обрано тип віртуальної машини t3.micro в регіоні Стокгольм та операційною системою Ubuntu, 22.04 LTS та створено дві такі віртуальні машини.

Для налаштування роботи тестової інтернет системи було виконано наступні кроки:

1. Встановлено останню версію java.
2. Створено групу tomcat.
3. Створено користувача tomcat.
4. Встановлено Tomcat.

Порівняння ресурсів віртуальних машин

| Віртуальна машина | Віртуальні ЦП | Кредитів ЦП на годину | Пам'ять (ГіБ) | Сховище    | Продуктивність мережі (Гбіт/с) |
|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|------------|--------------------------------|
| t3.nano           | 2             | 6                     | 0,5           | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.micro          | 2             | 12                    | 1             | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.small          | 2             | 24                    | 2             | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.medium         | 2             | 24                    | 4             | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.large          | 2             | 36                    | 8             | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.xlarge         | 4             | 96                    | 16            | Тільки EBS | До 5                           |
| t3.2xlarge        | 8             | 192                   | 32            | Тільки EBS | До 5                           |

5. Створено символічне посилання на `apache-tomcat`.

6. Завантажено конфігураційний файл.

7. Завантажено зібраний проєкт.

8. Запущено сервіс Tomcat.

Налаштування віртуальної машини для моніторингу включає декілька етапів.

1. Встановлення Prometheus.

2. Встановлення Grafana.

Для компонування яких необхідним інструментом є Ansible. Основні компоненти Ansible включають в себе:

1. Інвентар (Inventory) – це файл або група файлів, які визначають інформацію про машини, з якими Ansible буде взаємодіяти. Містить групи машин, змінні груп, та додаткові параметри, такі як IP-адреси та інші з'єднання.

2. Playbook – це YAML-файл, який містить набір задач, які Ansible повинен виконати на вказаних машинах. Playbook складається з певної кількості plays, де кожен play визначає конкретну роль і викликає задачу.

3. Задача (Task) – це одна конкретна дія, яку Ansible повинен виконати на машинах. Задачі визначаються для кожного play в playbook і виконують конкретні дії, такі як встановлення пакетів, налаштування служб тощо.

4. Роль (Role) – це організаційний одиниця, яка визначає, які задачі слід виконувати на машинах. Ролі дозволяють структурувати playbooks та використовувати їх у різних проєктах.

5. Модулі (Modules) – це виконавчі блоки, які використовуються задачами для виконання конкретних дій на машинах. Ansible постачається з багатьма вбудованими модулями, такими як `art`, `yum`, `copy`, `file`, `service`, тощо.

6. Плагіни (Plugins) дозволяють розширювати можливості Ansible за допомогою власних розширень та використовувати власні модулі, інвентар та інше. Ansible підтримує плагіни для різних аспектів свого функціоналу.

7. Facts автоматично зібрана інформація про систему, така як IP-адреси, характеристики системи, розташування тощо. Ansible facts можна використовувати в playbooks для прийняття рішень на основі поточного стану системи.

Підключення інтернет системи до моніторингу. Для підключення інтернет системи до моніторингу необхідно:

1. Встановити `collectd` на віртуальну машину з інтернет системою.

2. Скопіювати конфігураційний файл для `collectd`.

Конфігурація плагіна:

```
LoadPlugin write_prometheus
<Plugin "write_prometheus">
 Port "9103"
</Plugin>
```

Система моніторингу виконує розгортання та конфігурацію інтернет-системи, встановлення сервісу для збирання показників продуктивності системи та програми, а також розгортання та налаштування системи для збирання та відображення показників продуктивності.

Було розглянуто алгоритми для розгортання та налаштування систем, і виявлено необхідні конфігураційні файли. У заключному пункті наведена частина конфігураційного файлу сервісу для збирання показників. Ця частина відповідає за підключення до системи моніторингу та передачу показників.

Автоматизація процесу розгортання моніторингової системи передбачає використання менеджера пакетів для встановлення Jenkins на машині, з якої буде запускатися весь процес. Для цього необхідно завантажити ключ для доступу до облікового запису AWS та GitHub, встановити та налаштувати необхідні плагіни, зокрема: Terraform, Ansible, Maven, AWS credentials, GitHub credentials.

Наступним кроком є написання пайплайнів для Jenkins робіт, а саме для запуску Terraform та Ansible.

Для доступу до AWS використано наступну команду у pipeline:

```
withAWS(credentials: 'aws_key')
```

Де 'aws\_key' – заздалегідь вказані у Jenkins логін та пароль до AWS.

Для підвищення ефективності, після успішного завершення кожної роботи Jenkins наступну роботу слід викликати за допомогою конструкції:

```
post {
 success {
 build job: '*назва наступної роботи'
 }
}
```

Фінальне представлення проекту зображено на діаграмі (Рис. 1).

Користувач DevOps взаємодіє з інфраструктурою, використовуючи послуги AWS, що включають такі компоненти:

I. DevOps: Користувач, відповідальний за розробку та операції, взаємодія з AWS інфраструктурою.

II. AWS Cluster:

1. Master Cluster: Jenkins – інструмент автоматизації для безперервної інтеграції та доставки, що взаємодіє з Agents Cluster (Terraform) та Nodes Cluster. Terraform – Інструмент для створення та управління інфраструктурою як коду. Взаємодіє з Nodes Cluster.

2. Nodes Cluster: Ubuntu та CentOS – віртуальні машини, які використовуються для різних потреб проекту.



Рис. 1. Діаграма віртуальних машин

На рис. 2 представлено деталізовану структуру проекту.

Розглянемо компоненти та їх взаємодії:

**1. Клієнт (Client):**

- Роль: Представник зовнішнього середовища, який взаємодіє з системою.

**2. Terraform:**

- Роль: Інструмент для створення та управління інфраструктурою як коду.

**3. AWS Cluster:**

**• Nodes Cluster:**

**• Ubuntu Node:**

**• Ubuntu:**

- Роль: Віртуальна машина з операційною системою Ubuntu.

**• Applications Cluster:**

**• PostgreSQL:**

Роль: База даних PostgreSQL.

**• CentOS Node:**

**• CentOS:**

- Роль: Віртуальна машина з операційною системою CentOS.

**• Applications Cluster:**

**• Maven 3.6, npm, Geocitizen, Tomcat 9, Java 1.8:**

- Роль: Різні компоненти додатків та середовище для їх запуску.

- Взаємодія: Maven, npm, та інші компоненти використовуються для збірки та розгортання Geocitizen.

**• Master Cluster:**

**• Jenkins:**

- Роль: Інструмент для безперервної інтеграції та доставки.

**• Agent Cluster:**

**• Ansible:**

- Роль: Інструмент для автоматизації конфігурації та управління системами.

**4. Взаємодії та зв'язки:**

- Terraform >> Jenkins: Terraform використовується для автоматизованого розгортання інфраструктури, його виведено в Jenkins.

**• Geocitizen Website >> PostgreSQL:**

З'єднання між веб-додатком Geocitizen і базою даних PostgreSQL.

**• Geocitizen Website >> Route53 >> Client:**

Маршрутизація домену за допомогою AWS Route53, яка взаємодіє з клієнтом.

**Висновки.** Під час реалізації дослідження та вдосконалення способів надання можливості швидкого підключення інтернет системи до моні-

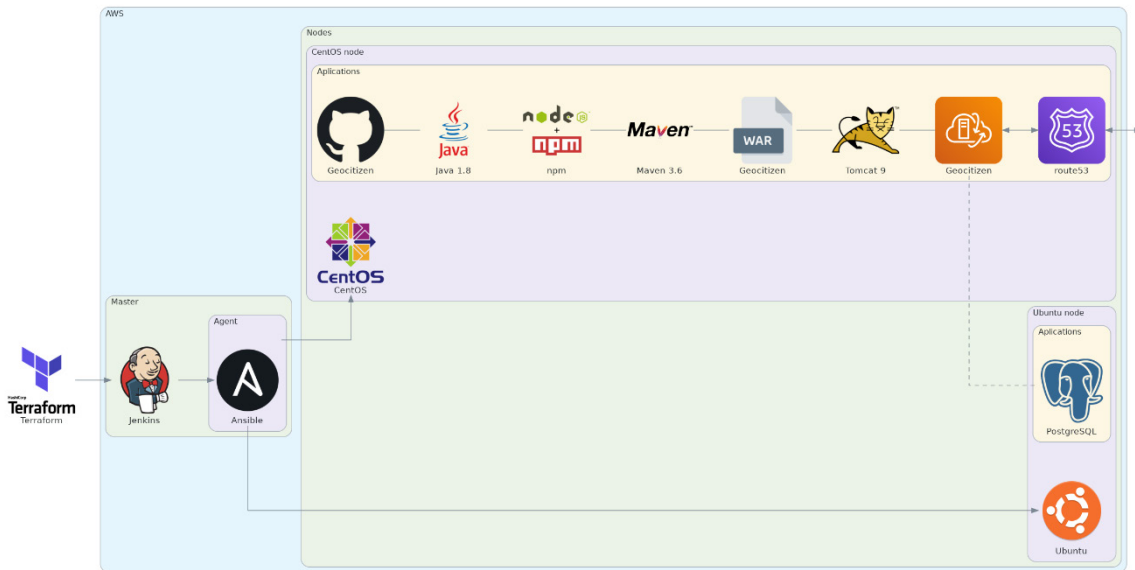


Рис. 2. Діаграма налаштування та роботи

торингу використовуючи сучасні DevOps технології в розробці ПЗ було проведено аналіз аналогічних розробок, таких як UptimeRobot, Secom, site24x7, що дозволило визначити, що основними функціями подібних систем є можливість швидкого підключення, мінімальний моніторинг системи, цілодобова підтримка та додаткові опції. Однак для ефективної реалізації даної моніторингової системи було визначено необхідність розширення спектру доступних метрик, що стосуються стану віртуальної машини, на якій розташована інтернет-система.

Для реалізації системи було обрано платформу хмарних обчислень AWS, інструмент інфраструктури як коду Terraform, інструмент для налаштування систем та розгортання програмного забезпечення Ansible, інструмент моніторингу та

оповіщення систем Prometheus, інструмент аналітики та інтерактивної візуалізації Grafana, інструмент автоматизації Jenkins, а також сервіс для збирання показників продуктивності системи та програми collectd.

Розроблено алгоритми для етапів розгортання та налаштування систем, і виявлено необхідні конфігураційні файли. Процес розгортання моніторингової системи було автоматизовано за допомогою інструмента для автоматизації Jenkins. Розроблений алгоритм готовий до промислового використання та може бути використаний для автоматизації підключення моніторингу до інтернет-системи.

У майбутньому ця система може бути вдосконалена через оптимізацію за допомогою Docker контейнера, а також розширена можливістю підключення різноманітних систем до моніторингу.

### Список літератури:

1. Кодола Г. М., Волинець Н. С., Сербулова І. В. Автоматизоване тестування веб-додатків з різнорівневою архітектурою. Вісник НТУ «ХПІ» № 5 (1330), серія «Нові рішення в сучасних технологіях», С. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.12>
2. Theo Schlossnagle Monitoring in a DevOps world, February. 2018. Communications of the ACM 61(3): P. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.1145/3168505>
3. Sukumar Mandal Site Metrics Study of Koha OPAC through Open Web Analytics and Piwik Tools. Library Philosophy and Practice (e-journal) 2835. July. 2019.
4. Shyamala K., Kalaivani S., Murugan A. A Framework to improve the Web Performance using Reorganization, Optimized Prediction and Prefetching International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration 8(3):2277-3878. September. 2019. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.C6332.098319>
5. Провідна служба моніторингу безвідмовної роботи. URL: <https://uptimerobot.com/>
6. Комплексні серверні рішення. URL: <https://secom.com.ua/>
7. Моніторинг на основі AI для сучасних IT. URL: <https://www.site24x7.com/>
8. Nikhil Singh, Durgesh Patel, Ankit Raj, Shubham, Ms. Sukhmeet Kour CI/CD Pipeline for Web Applications International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology

(IJRASET) ISSN: 2321-9653; IC Value: 45.98; SJ Impact Factor: 7.538 Volume 11 Issue V May 2023.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.22214/ijraset.2023.52867>

9. Faizan Qaisar, Hammad Shahab, Muhammad Iqbal , Hussain Mahmood Sargana, , Muhammad Aqeel, Muhammad Arslan Qayyum Recent Trends in Cloud Computing and IoT Platforms for IT Management and Development. Pakistan Journal of Engineering and Technology. Vol. 6 No. 1 (2023). DOI: <http://dx.doi.org/10.51846/vol6iss1pp98-105>

10. Kusumadewi R., Adrian R. Performance analysis of devops practice implementation of ci/cd using jenkins Journal of computer science and information technology, Vol 15, No 2 (2023) .pp. 90-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.18860/mat.v15i2.17091>

### **Tarnovetska O.Yu., Hazdiuk K.P., Balen S.M., Dmytrashchuk K.M. STUDY OF INTERNET SYSTEM CONNECTION TO MONITORING USING MODERN DEVOPS TECHNOLOGIES**

*In this work, an analysis of modern DevOps technologies was conducted, research on existing monitoring systems was carried out, and a proprietary monitoring system was developed. During the research and improvement of methods for quickly connecting internet systems to the monitoring system using modern DevOps technologies in software development, an analysis of similar projects such as UptimeRobot, Secom, and site24x7 was conducted. This allowed identifying that key features of such systems include quick connectivity, minimal system monitoring, 24/7 support, and additional options.*

*For the effective implementation of the monitoring system, there was a need to expand the range of available metrics related to the state of the virtual machine hosting the internet system. To implement the monitoring system, the AWS cloud computing platform was chosen, Terraform was used as an infrastructure as code tool, Ansible for system configuration and software deployment, Prometheus for monitoring and alerting, Grafana for analytics and interactive visualization, Jenkins for automation, and collectd for collecting system performance metrics.*

*Algorithms were developed for deployment and configuration stages, and necessary configuration files were identified. The deployment process of the monitoring system was automated using the Jenkins automation tool. The developed algorithm is ready for industrial use and can be used to automate the connection of monitoring to the internet system.*

*In the future, this system can be improved through optimization using Docker containers. Additionally, its functionality can be expanded by allowing the connection of various systems to monitoring. This will make the monitoring system more flexible and adaptable to different requirements and infrastructure peculiarities that may arise in the process of development and operation. Such expansions and optimizations will contribute to increasing the efficiency and readiness of the system for future changes.*

**Key words:** monitoring, Internet system, configuration, cloud technologies, automation of connection.

**Хорошевська І.О.**

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

**Хорошевський О.І.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ WEB-TO-PRINT

У даній статті пропонується дослідження можливостей та особливостей програмних продуктів та систем, побудованих на основі реалізації принципу Web-to-Print. Для кращого розуміння що таке Web-to-Print, визначається сутність принципу, як перспективного напрямку розвитку поліграфічної галузі. В статті наведено коло функціональних можливостей, притаманних програмним рішенням та системам, побудованим на основі Web-to-Print. Визначені основні завдання, які дозволяє вирішити система з описаними функціональними можливостями. Далі, визначені чинники, що гальмують процес впровадження систем на основі Web-to-Print на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах, друкарнях. Для цього розглянуто стан та реалії використання систем Web-to-Print на закордонному та вітчизняному ринках надання поліграфічних послуг. На основі аналізу потужних представників ринку, а саме технологічних рішень та систем Online Print Solutions, PrintNow, Pressero визначено чинники, що стримують впровадження даних систем на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах. Визначено підходи, що можуть бути застосовано для розроблення Web-to-print системи із можливістю онлайн роботи із замовленнями (від створення персоналізованого унікального дизайну макету у вікні браузера та оформлення замовлення до його передачі у виробництво й доставки, як готової продукції). Обґрунтована доцільність для малих та середніх підприємств застосування другого підходу, який є більш доступним з позиції економії коштів та реалізації потрібного в системі функціоналу під конкретне підприємство. Визначено інструментальну базу для практичної реалізації системи Web-to-Print у вигляді веб-сайту. У якості прикладу, наведено опис змісту базової послідовності кроків процесу прикладного розроблення Web-to-Print системи на основі застосування CMS Joomla, що є безкоштовною системою з відкритим вихідним кодом, яка надає можливість для гнучкого налаштування системи під завдання та процеси поліграфічного підприємства. Так, за рахунок використання під час розроблення Web-to-Print системи додаткових розширень (модулів, плагінів тощо), можна реалізувати всі процеси роботи із замовленням: від формування дизайну макета у вікні браузера до передавання у виробництво, відслідковування стану процесу виробництва замовлення та ін.

**Ключові слова:** Web-to-Print, система, можливості, макет, замовник.

**Постановка проблеми.** Одним з перспективних напрямів розвитку поліграфічної галузі є застосування поліграфічними підприємствами та друкарнями програмних продуктів і систем, побудованих на основі реалізації принципу Web-to-Print (або Web2Print, W2P). Його сутність полягає в тому, що поліграфічне підприємство приймає замовлення за допомогою віддаленої взаємодії із замовником через веб-сайт, надаючи замовнику можливість або обирати макет із запропонованого каталогу продукції (при необхідності, відкоригувавши відповідні параметри) або створити макет самостійно (задав відповідні параметри), затвердити макет та надати його до виконання поліграфічному підприємству. Тобто, реалізується певне самообслуговування замовників [1] на веб-сайті підприємства, що дозволяє замовникам пер-

соналізувати замовлення відповідно до власних вимог і потреб, скоротити час та спростити процес прийому поліграфічних замовлень.

Отже, постає питання, якщо подібні продукти та системи, побудовані на основі Web-to-Print, надають стільки переваг, чому їх впровадження на вітчизняних підприємствах досі не набуло широкого розповсюдження. Ця стаття спрямована на висвітлення цієї проблеми та надання комплексного погляду на сутність та особливості систем на основі Web-to-Print.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій,** присвячених програмним продуктам та системам, реалізованим на основі Web-to-Print, показав, що в існуючих працях визначено сутність Web-to-Print [1], зазначено перспективи розвитку даного підходу, як тренду 2024 року, що надає

можливість підвищити конкурентоспроможність малим та середнім підприємствам в процесі продажу своїх продуктів і послуг [2, 3, 5, 6], наведено опис та функціонал конкретних систем [7–11], зазначена необхідність здійснення розрахунку ризиків, які можуть виникнути під час і після впровадження технології Web-to-Print [12]. В наведених працях автори розглядали широке коло питань, однак вони носили більш описово-обґрунтовувальний характер. Тому питання комплексного аналізу із визначенням можливостей та особливостей Web-to-Print систем та кола чинників, що негативно впливають на динаміку впровадження таких систем на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах лишається відкритим і потребує подальшого дослідження.

**Мета статті** полягає у дослідженні можливостей та особливостей систем, побудованих на основі Web-to-Print, а також, визначенні чинників, що стримують впровадження даних систем на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації наведеної мети необхідно розкрити особливості, притаманні Web-to-Print системам, на основі дослідження їх сутності, функціональних можливостей, завдань та чинників, що стримують впровадження даних систем на вітчизняних підприємствах.

У праці [3] зазначається, що «Сучасний веб-друк – це набагато більше, ніж просто автоматизована передача або виробництво друкованої продукції через Інтернет». Він дозволяє скоротити час та витрати, підвищити продуктивність, збільшити прибуток, забезпечити прозорість та оптимізувати процеси формування, прийому та опрацювання поліграфічних замовлень через Інтернет, поліпшити відносини з замовниками, постачальниками тощо, забезпечити економію часу та коштів для відділів маркетингу, логістики та ін.

Варто зазначити, що при реалізації принципу Web-to-Print в програмних рішеннях та системах автоматизації, найчастіше надаються такі основні можливості, що визначають функціонал подібних систем:

1) фіксований набір типів поліграфічної продукції із визначеними цінами. Тобто, користувач може обрати тип продукції, який він хоче замовити (наприклад, візитка, флаєр, плакат, конверт, листівка, буклет тощо). Також, за принципом Web-to-Print можна замовляти хенгери, поштівки, продукцію широкоформатного друку (наприклад, ролл-апи, штендери тощо), робити замовлення рекламно-сувенірної продукції (наприклад, флешки, запальнички тощо) або замовляти друк

на одязі (наприклад, на футболці, блайзері тощо). Як зазначається в праці [1]: «Окремі друкарні за принципом Web-to-Print залучають замовлення й на виготовлення багатосторінкової продукції, яка «складається» з «деталей» продуктів акцидентного друку. Так, наприклад, брошура на скобу формату А5 – це «похідний» продукт від листівки формату А4»;

2) набір стандартизованих шаблонів за типами поліграфічної продукції підприємства з можливістю введення власних даних. Тобто, користувач може скористатися шаблоном з готовим дизайном, який він змінює шляхом завантаження заздалегідь підготовленого контенту (наприклад, зображень, тексту) відповідно до власних потреб;

3) вбудовані інструменти для онлайн створення та редагування дизайну макета поліграфічної продукції у вікні браузера. Це надає можливість замовнику створити персоналізований дизайн для обраного типу друкованої продукції. За допомогою вбудованого до системи редактору типу «конструктор», замовник має можливість виготовити макет онлайн, реалізуючи власний дизайн продукції, що замовляє. При цьому, при завантаженні макета, замовнику на вибір може бути запропоновано автоматичну або ручну перевірку розробленого макету;

4) можливість завантаження (прикріплення) файлів, як, наприклад, файлу із готовим макетом, файлу з поясненнями та уточненнями (це може бути опис бажаної колірної схеми, зазначення потрібних для використання шрифтів, наведення прикладів того, що подобається та ін.) тощо;

5) попередній перегляд, який надає користувачу можливість побачити створений ним дизайн продукції перед безпосереднім здійсненням процесу оформлення замовлення. Такий підхід надає можливість замовнику переконатися у відповідності отриманого результату вихідним вимогам;

6) оформлення, прийом та розрахунок вартості замовлення. Після завершення процесу розроблення дизайну макета продукції, користувач може оформити замовлення із зазначенням необхідних йому параметрів (наприклад, кількість, тип паперу, покриття тощо);

7) інтеграція з платіжними сервісами з можливістю обрання різних способів оплати;

8) інтеграція з автоматизованою системою керування поліграфічним виробництвом та поліграфічним обладнанням для передавання замовлення із розробленим дизайном безпосередньо у виробництво (планування його виконання, постановку у виробничий план тощо);



9) керування замовленнями, що дозволяє здійснити відстеження виконання замовлення із зазначенням стану, в якому воно перебуває на даний час. Як зазначено у [4]: «забезпечує видимість процесу виконання замовлення, щоб зменшити кількість запитів від клієнта». Керування замовленнями охоплює весь ланцюжок роботи із замовленням: від його оформлення до виробництва і доставки замовнику;

10) взаємодія та зворотній зв'язок, дозволяють охопити широкий спектр процесів: від короткострокової взаємодії у вигляді, наприклад, чатів «питання-відповідь», до довгострокових на весь період роботи із замовленням у вигляді систематичних сповіщень замовника про поточний статус замовлення, уточнення певних параметрів замовлення, даних для доставки та ін.;

11) доступність системи для роботи з різних пристроїв (тобто, комп'ютера, планшета, смартфона).

Завдяки реалізації функціональних можливостей, притаманних Web-to-Print, в програмних рішеннях та системах можна вирішити такі основні завдання [1, 3, 4, 12]:

1) автоматизація прийому замовлень поліграфічної продукції у будь-який час без безпосереднього знаходження замовника на поліграфічному підприємстві, друкарні. Користувач може працювати зі своїм замовленням з персонального комп'ютера, планшета або смартфона;

2) надання каталогу шаблонів типової продукції підприємства;

3) створення макету продукції онлайн на веб-сайті підприємства;

4) підключення до процесу створення макета фахівця, наприклад, дизайнера (з відділу підприємства або дизайнера-фрілансера);

5) надання замовнику можливості редагування раніше створених макетів під час повторного замовлення;

6) забезпечення підтримки поширених форматів файлів та інтеграцію з програмами оброблення текстової і графічної інформації;

7) поліпшення обслуговування замовників за рахунок включення можливості зворотного зв'язку з поліграфічним підприємством для забезпечення підтримки можливостей корегування параметрів замовлення, зміни макету замовлення, надання інформації про стан готовності замовлення й ін.;

8) скорочення витрат часу на попередню калькуляцію замовлення;

9) інтеграція з автоматизованою системою керування поліграфічним підприємством. Напри-

клад, при передачі даних про завдання та рахунки-фактури до систем MIS/ERP;

10) організація нових каналів збуту виконуваних послуг. Наприклад, за рахунок інтеграції системи Web-to-Print з маркетплейсом [3] за допомогою API Amazon та Google Merchant Center. Також, за рахунок створення «онлайн-вітрини» [4], де перебуває продукція і послуги, що впливає на збільшення кількості продажів;

11) укріплення взаємовідносини з постачальниками матеріалів, паперу, напівфабрикатів;

12) отримання оперативної звітної документації у різних форматах тощо.

Маючи такий потужний потенціал, виникають резонні запитання: Чому ж впровадження подібних Web-to-Print систем на вітчизняних поліграфічних підприємствах досі не має широкого розповсюдження? Що є тими чинниками, які гальмують процес впровадження цих систем? Для відповіді на ці питання, розглянемо стан та реалії використання систем Web-to-Print на світовому ринку надання поліграфічних послуг.

У праці [5] «Прогноз глобального ринку Web-to-Print за основними компаніями, регіонами, типами, програмами та сегментами, 2015–2032 pp.» зазначається, що ринок Web-to-Print досить активно розвивається завдяки таким потужним представникам, як Online Print Solutions, Design n buy, EFI, AmazingPrint, PrintNow, Flexiweb2print, Rocket Print Software, Presscentric, Pressero, B2CPrint. В статті [6] відмічаються у якості найкращих рішень для веб-друку в США ще такі системи, як MyPrintCloud, printQ, Pixopa, Vpress, PageFlex та ін. Це говорить про загальну позитивну тенденцію у світі до застосування систем на основі Web-to-Print.

Проведений аналіз джерел [7–9], що містять опис програмних рішень та систем на основі Web-to-Print, дозволив дослідити їх можливості. Наприклад, Online Print Solutions [7] є модульним рішенням, що надає можливості для веб-друку, допомагаючи просувати друкарський бізнес і продавати дизайнерські та друкарські послуги в мережі. Таке рішення дозволяє створювати макети на основі шаблонів у вікні браузера, задавати налаштування відповідно до потреб замовника, здійснювати прийом та оформлення замовлень, надавати підтвердження технологічного процесу, експортувати звітну документацію в різні формати, підтримувати інтеграцію з платіжними системами та ін. PrintNow [8] є системою, яка побудована на основі ідеології Software as a Service. Вона надається у вигляді корпоративної платформи для друку з Інтернету, сприяє

збільшенню кількості клієнтів та обсягів друку, зменшують витрати та сприяє розвитку бізнесу поліграфічного підприємства на ринках B2C і B2B. В системі Pressero [9] основна увага приділяється питанням реалізації елемента електронної комерції. Наявний друк через Інтернет, однак, замало інструментів для надання замовнику можливості роботи з макетом на додрукарському етапі. Система Pressero є хмарним рішенням для онлайн-вітрин B2B або B2C, яке налаштується під потреби поліграфічного підприємства і клієнтів. Підтримуються онлайн-дизайн, ціноутворення, повторне замовлення, використання запасів, доставка та оплата кредитною картою, а також адаптивний дизайн веб-сайтів на різних пристроях. Дана система орієнтована на великі поліграфічні підприємства та друкарні з розподіленою структурою виробництва.

Підсумовуючи вищевикладене, варто відмітити, що розглянутим системам притаманні наступні загальні недоліки:

1) залежність від наявного (закладеного в системі) функціоналу, який може бути надлишковим для певного малого/середнього підприємства;

2) складність інтеграції в існуючу на поліграфічному підприємстві автоматизовану систему керування поліграфічним виробництвом;

3) висока вартість тарифів для малих підприємств, друкарень, типографій. Так, наприклад, у PrintNow за «Starter» треба сплатити 545\$ на місяць [8].

Це є вагомими чинниками, що стримують впровадження даних систем на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах. А це готує про необхідність пошуку нових рішень, що дозволять реалізувати системи із налаштуваннями під завдання і процеси вітчизняних підприємств малого/середнього секторів поліграфічного бізнесу та, водночас, будуть доступні ним за ціновим чинником.

При розробленні нової системи доцільно враховувати набутий досвід вітчизняних підприємств в розрізі надання можливості замовнику, при роботі з системою, розробити власний макет та запропонувати його дизайн. Серед таких систем веб-сайти друкарні «Вольф» [10] та компанії «ЕкваторПринт» [11]. Вони пропонують замовнику цікаву та корисну можливість самостійного розроблення дизайну макету або за допомогою онлайн конструктора макетів, як у [10], або за допомогою вбудованого онлайн фоторедактора, як у [11]. Дані системи мають чітку орієнтацію на бізнес-процеси своїх підприємств, що говорить

про складність їх адаптації та налаштування під інші підприємства з їх особливостями ведення бізнесу та поліграфічного виробництва.

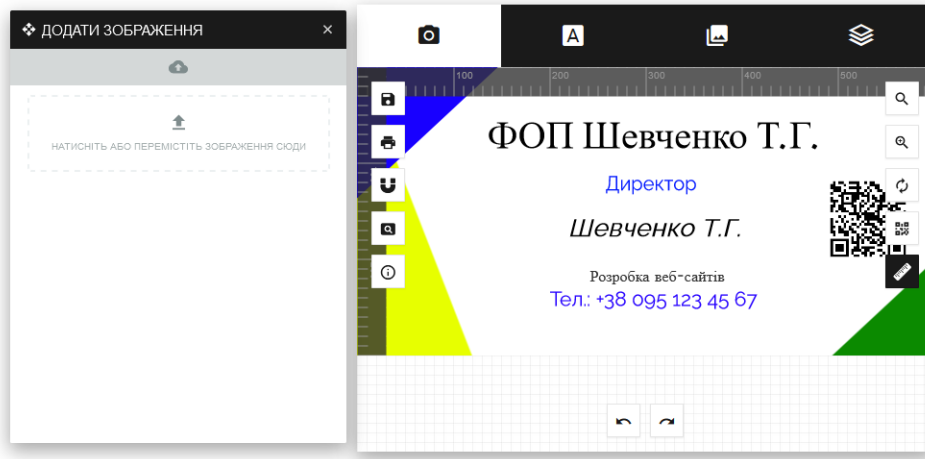
Для розроблення Web-to-print системи із можливістю онлайн роботи із замовленнями (від формування макету та оформлення замовлення до його передачі у виробництво і доставку готової продукції) можна використовувати один з наступних підходів:

підхід 1: провести детальний аналіз потреб та наявних можливостей (технічних, технологічних, фінансових тощо) конкретного поліграфічного підприємства в розрізі питання «Що треба зробити для збільшення ефективності бізнесу та розширення ринку за допомогою переведення процесів формування, прийому та опрацювання поліграфічних замовлень через Інтернет?». Це надасть змогу визначити оптимальний рівень функціоналу та підтримки, яку треба реалізувати в Web-to-print системі, а також, розробити індивідуальний план впровадження та оцінити повну вартість проекту розроблення такої системи під конкретне підприємство. Однак, такий підхід для малих та середніх поліграфічних підприємств часто є дуже дорогим. Вони мають бажання перейти до повноцінної онлайн поліграфії, однак часто не мають таких коштів для фінансування масштабного дослідження та розроблення системи під себе, а застосування готового рішення з оплатою за місяць/рік може містити більше половину пропонуваного за замовчуванням в тарифі функціоналу, який не потрібен підприємству, а воно за нього все одно повинно заплатити великі гроші. Певним виходом з цієї ситуації для малих та середніх підприємств є застосування другого підходу, що є більш фінансово прийнятним для них;

підхід 2: провести аналіз потреб та можливостей поліграфічного підприємства з метою розроблення технічного завдання [13] з вимогами на створення системи під наявну ресурсну базу із розрахунком вартості такої системи. Поліграфічне підприємство, друкарня, як замовник такої Web-to-print системи, може оперувати колом своїх вимог до функціоналу системи, що надає можливість визначити оптимальну вартість її розроблення. Як інструментальну базу для практичної реалізації системи Web-to-print у вигляді веб-сайту можна використовувати один зі способів, наведених нижче:

1) розробка у вигляді веб-сайту з використанням HTML, CSS та інших засобів;

2) розробка на основі використання систем керування вмістом (CMS) з відкритим вихідним



**Рис. 1.** Приклад реалізації модуля формування макету візитки онлайн (на основі застосування плагіна vDesigner for Virtuemart)

кодом. Наприклад, обираючи серед таких, як WordPress, Joomla, Drupal тощо. Оптимальним способом розробки з точки зору економії часу, коштів та досягнення бажаного функціоналу, який забезпечує основні функції і можливості Web-to-print систем, є використання безкоштовної CMS;

3) розробка на основі використання фреймворків та бібліотек.

Як приклад, наведемо базову послідовність прикладного розроблення Web-to-print системи на основі застосування CMS Joomla. Для створення такої системи може бути реалізована така послідовність кроків:

1) установка CMS Joomla та налаштування її компонентів:

- установки на сервер та налаштування підключення до бази даних;
- налаштування конфігурації та базових параметрів CMS Joomla;
- налаштування пошти для розсилки повідомлень;
- налаштування реєстрації та особистого кабінету користувача;
- налаштування форми контактів;
- створення меню;
- інші налаштування;

2) налаштування компоненту VirtueMart (для реалізації функцій електронної комерції, таких як керування каталогами, обробка замовлень, реалізації системи оплати, системи знижок, особистого кабінету та ін.), модулю JChatSocialEnterprise (для реалізації елемента «Чат клієнтів») та ін.;

3) налаштування графічного редактору для реалізації процесу формування макету продукції онлайн у вікні браузера. Це може бути реалізовано

за допомогою спеціального плагіна vDesigner for Virtuemart, який є онлайн-редактором макетів на базі HTML5. За допомогою цього інструменту замовник може здійснити формування дизайну макета різної продукції (футболки, толстовки, візитної картки, чашки тощо). Замовник в реальному часі бачити на екрані те, що він проектує. Приклад реалізації даного модуля в системі показаний на рис. 1.

Також vDesigner for Virtuemart дозволяє створити форми для завантаження замовником готових файлів макетів різної продукції (візитки, плакати, футболки тощо).

Процеси з контентного наповнення елементів системи (наприклад, статей за типами продукції тощо) не мають великої відмінності від звичайного процесу створення та наповнення елементів веб-сайту.

Окремо треба зауважити, що для реалізації певних процесів інтеграції, наприклад, інтеграції з автоматизованою системою керування поліграфічним виробництвом та поліграфічним обладнанням додатково залучаються професіонали галузі програмування. Наприкінці процесу розроблення системи відбувається багатоітераційне тестування її працездатності (до та після викладення на обраний хостинг).

**Висновки.** У статті наведено аналіз функціональних можливостей та особливостей систем, побудованих на основі реалізації принципу Web-to-Print, визначені чинники, що стримують впровадження даних систем на вітчизняних малих та середніх поліграфічних підприємствах, та наведено базову послідовність прикладної розробки системи Web-to-print на основі застосування CMS Joomla.

**Список літератури:**

1. Web-to-Print. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Web-to-Print#cite\\_note-1](https://uk.wikipedia.org/wiki/Web-to-Print#cite_note-1) (дата звернення: 10.01.2024).
2. Web-to-Print Industry Trends to Watch in 2024. URL: <https://www.wtpbiz.com/web-to-print-industry-trends-2024/> (дата звернення: 12.01.2024).
3. Стрімкий зліт з web-to-print. URL: <https://www.konicaminolta.ua/uk-ua/ipp-blog/commercial-printing/strimkyi-zlit-z-web-to-print> (дата звернення: 14.01.2024).
4. Інтернет-рішення й рішення для електронного друку, які використовуватимуть ваші клієнти. URL: <https://www.konicaminolta.ua/uk-ua/solutions/professional-printing/web-to-print> (дата звернення: 16.01.2024).
5. Global Web-to-Print Market Outlook-by Major Company, Regions, Type, Application and Segment Forecast, 2015-2026. URL: <https://www.mraccuracyreports.com/reportdetails/reportview/204217> (дата звернення: 16.01.2024).
6. Web2Print. Best web to print solutions in USA. URL: <https://www.web-to-print-blog.com/best-web-print-solution-usa/> (дата звернення: 18.01.2024).
7. Flex4 OPS Web to Print: Web to Print Software Solution. URL: <https://www.onlineprintsolution.co.uk/> (дата звернення: 5.01.2024).
8. PrintNow: PrintNow W2P software for print providers. URL: <https://printnow.com> (дата звернення: 15.01.2024).
9. Print More With Pressero. URL: <https://www.pressero.com/page/web-to-print-storefronts-for-retail-and-b2b> (дата звернення: 17.01.2024).
10. Типографія «Вольф». URL: <https://wolf.ua> (дата звернення: 18.01.2024).
11. ЕкваторПринт. Широкоформатний друк. URL: <https://ekvatorprint.com.ua/uk/fotoredaktor> (дата звернення: 20.01.2024).
12. Abhishek Agarwal, Nidhi Agrawal. Web-to-Print: A step-by-step guide for implementing web-to-print technology. India: Notion Press, 2020. 122 p.
13. Хорошевська І. О. Структура представлення інформації в технічному завданні на створення мультимедійних дидактичних навчальних комплексів // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том. 29 (68), № 5. 2018 р. С. 85–93.

**Khoroshevskaya I.O., Khoroshevskiy O.I. RESEARCH OF THE POSSIBILITIES AND FEATURES OF SYSTEMS BUILT ON THE BASIS OF WEB-TO-PRINT**

*This article explores the capabilities and features of software products and systems built on the implementation of the Web-to-Print principle. To better understand what Web-to-Print is, the essence of the principle is defined as a promising direction in the development of the printing industry. The article outlines a range of functional capabilities inherent in software solutions and systems based on Web-to-Print. The main tasks that the system with described functional capabilities can solve are identified.*

*Furthermore, the factors hindering the implementation of Web-to-Print systems in domestic small and medium-sized printing enterprises are identified. To achieve this, the current state and realities of using Web-to-Print systems in foreign and domestic markets for providing printing services are examined. Based on the analysis of major market players, specifically technological solutions and systems such as Online Print Solutions, PrintNow, and Pressero, factors impeding the implementation of these systems in domestic small and medium-sized printing enterprises are determined. Approaches that can be applied to develop a Web-to-Print system with online order processing capabilities (from creating a personalized unique design layout in a browser window to order placement, production, and delivery of the finished product) are defined. The feasibility of applying the second approach, which is more cost-effective and allows the realization of necessary system functionality for a specific enterprise, is justified for small and medium-sized businesses.*

*The instrumental base for the practical implementation of the Web-to-Print system in the form of a website has been defined. As an example, a description of the content of the basic sequence of steps in the development process of a Web-to-Print system based on the application of the CMS Joomla is provided. Joomla is a free, open-source system that allows flexible customization of the system to the tasks and processes of a printing enterprise. Thus, by utilizing additional extensions (modules, plugins, etc.) during the development of the Web-to-Print system, all order processing processes can be implemented: from creating a design layout in a browser window to transferring it to production, tracking the status of the production process, and more.*

**Key words:** *Web-to-Print, system, capabilities, layout, customer.*

**Чикунів П.О.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

**Нефьодова І.В.**Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут  
Української інженерно-педагогічної академії

## ПІДТРИМКА ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ БАГАТОРІВНЕВИМИ ПЕРЕРОБНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

У статті розглянуто проблему прийняття оптимальних управлінських рішень менеджерами планових служб вітчизняних переробних підприємств з власною сировинною базою. Такі підприємства характеризуються сезонним попитом на продукцію, який ускладнює менеджерам процес складання виробничої програми. Сезонність попиту на продукцію погано впливає на ліквідність підприємства. Логістична система, охоплюючи весь матеріальний потік від джерела сировини до споживача, вимагає інтеграції інформаційних технологій для оптимізації управління виробництвом та постачанням продукції. Математичні моделі та алгоритми планування базуються на аналізі діяльності підприємства. Узагальнені особливості виробничої діяльності підприємства визначають напрями моделювання та вирішення завдань планування. Стратегічне та тактичне планування діяльності фокусується на інформаційній підтримці та числовому рішенні для ефективного вирішення завдань виробництва та планування. Постановка задач стратегічного та тактичного планування обумовлена необхідністю максимізації доходу переробного підприємства при сезонних цінах на продукцію та мінімізації витратного механізму виробництва. Постановки задачі оперативного планування обумовлена необхідністю відпрацювання переробними підрозділами відхилень від завдань стратегічної та тактичної планової програми. Виконана постановка задач стратегічного (на сезон), тактичного (на місяць сезону) та оперативного (на добу) планування обсягів випуску готової продукції. Комплекс завдань планування представлено функціоналами мети, що визначають можливість оптимального планування діяльності підприємства. Для аналізу бізнес-процесів та проектування підсистем планування застосована методологія IDEF0. Ця робота відкриває можливість для покращення процесу прийняття оптимальних рішень менеджерами планових служб вітчизняних переробних багаторівневих підприємств видобувної та переробної галузі.

**Ключові слова:** процес прийняття рішень, переробні підприємства, сезонність попиту, стратегічне, тактичне та оперативне планування, IDEF0-діаграма, інформаційна технологія.

**Постановка проблеми.** В економіці України особливе місце займають переробні підприємства із власною сировинною базою та сезонним характером попиту на продукцію. Їхня діяльність характеризується нерівномірністю надходження замовлень протягом року, що ускладнює процес планування виробничої програми. Технологічний процес переробних підрозділів підприємства відрізняється технологічними циклами переробки сировини, що обумовлює різницю в собівартості продукції.

Для визначення економічно обґрунтованих сезонних планових завдань менеджерам необхідний інструментарій підбору оптимальних показників виробничої програми з оцінкою ефективності управлінських рішень за математичними моделями та критеріями цілей планування.

Діяльність переробних підрозділів супроводжується випадковими відхиленнями від

програми, тому актуальним є включення до інструментарію моделей прогнозу та критеріїв оптимальної оцінки оперативних рішень.

В умовах військового стану та обмеженого експорту української продукції вітчизняні підприємства видобувної та переробної галузі (агропромислові комплекси, розробка та переробка корисних копалин, кам'яної солі, цукру, продуктів хімічної промисловості тощо), стикаються з різними проблемами, які негативно впливають на виробничий процес, управління ланцюгами постачання сировини та готової продукції. Більша частина переробних підприємств Донецької та Луганської областей припинили свою роботу внаслідок окупації, руйнування виробничих ділянок, ускладнення та небезпечності логістичних ланцюжків.

Сказане визначає актуальність дослідження процесів прийняття оптимальних рішень по управлінню багаторівневими переробними

підприємствами в умовах стратегічного (на сезон), тактичного (на місяць) та оперативного (на добу) планування процесів видобутку та переробки сировини, підпорядкованих завданню збільшення доходу підприємства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальною специфікою переробних виробництв є сезонність попиту на продукцію, нерівномірність і інтенсивність обсягів виробництва та перевезень продукції, обмеженість в часі на виконання видобувних/збиральних, переробних, транспортних робіт [1]. Сезонність попиту на продукцію є однією з головних проблем, що виникають перед переробними підприємствами; вона перешкоджає ефективному плануванню виробництва та уповільнює економічний розвиток [2]. В умовах військового стану створення сезонних складів призведе до завищення розміру оборотних коштів та заморожування коштів, тим самим перешкоджаючи вкладенню коштів у розширення виробництва.

Моделі розв'язання задач планування мають враховувати рівні ієрархії об'єкта управління з подальшим аналізом оптимальності управлінських рішень. Функціональна сутність математичних моделей, постановки завдань стратегічного, тактичного та оперативного планування повинні враховувати обмеження технологічного, економічного та організаційного характеру [3–5].

У роботі [6] наведені правила розробки інструментарію підтримки процесів прийняття рішень менеджерів для дворівневих підприємств, що дозволяє прискорити процес розробки оптимальної сезонної виробничої програми з полікритеріальною оцінкою альтернативних варіантів.

Постановка завдань планування дає змогу реалізувати сучасні аспекти вирішення таких завдань [5]. Формалізація завдань планування як математичних моделей розрахунку виробничої програми, визначає можливість аналізу статичних і динамічних характеристик діяльності [7].

Алгоритми стратегічного та тактичного планування [3, 4] розглядаються як завдання менеджменту та ґрунтуються на системному аналізі техніко-економічної діяльності підприємства, що передбачає аналіз внутрішніх та зовнішніх характеристик, що впливають на ефективність прийнятих рішень. До внутрішніх відносяться продуктивність та гнучкість основного обладнання, що забезпечує ліквідність продукції, а до зовнішніх – кон'юнктура ринку, сезонність, конкурентна боротьба.

У сучасній практиці фахівці, які здійснюють розробку техніко-економічних систем, змушені перебирати різноманіття реалізованих у світовій

практиці аналогів. При визначенні оптимальних значень показників розробник стикається з великою кількістю змінних, що характеризують необхідні показники. Розв'язання задачі оперативного розподілу позицій портфеля замовлень, за якої технологічні чинники мають бути узгоджені з всіма рівнями, пов'язане зі значними обчислювальними проблемами, що впливають із великої розмірності задач [8]. Це призводить до ускладнення процедур чисельного розв'язання оптимізаційних завдань.

Відповідно до рішення Кабінету Міністрів України від 10.11.2023 р., уряд України закладає у 2024 р. понад 5 млрд грн на гранти на створення нових або розвиток існуючих переробних підприємств [9]. Наприклад, у Закарпатті розпочата розробка нових родовищ кам'яної солі – Буштинського та Західно-Тереблянського.

**Метою статті** є висвітлення специфіки підсистем планування виробничої діяльності переробного підприємства, виконання аналізу характеристик процесу випуску продукції, здійснення постановки завдань стратегічного, тактичного та оперативного планування обсягів виробництва.

**Виклад основного матеріалу. Аналіз характеристик процесу випуску продукції.** Логістична система видобувного/переробного підприємства характеризується неперервним матеріальним потоком від первинного джерела сировини через всі проміжні процеси переробки до кінцевого споживача [1]. Організаційну структуру підприємства, що має власні запаси сировини, можна представити у вигляді логістичного ланцюга «Видобуток–Переробка–Збут». Технологічний цикл кожного етапу ланцюга складається з ряду стадій. Для підприємства по видобутку кам'яної солі у ланці «Видобуток» такими етапами є видобуток солі в підземних рудниках, транспортування та видача на поверхню. Ланка «Переробка» включає перевантажувальну, класифікаційну, обробну та збагачувальну стадії. Ланка «Збут» складається із стадій надходження продукції з виробництва, фасування, пакування та затарювання, перевірки якості та відвантаження споживачеві або зберігання на складах.

У ході видобутку та переробки продукції отримують різні види продукції, причому ціна збільшується після кожної технологічної операції. Залежно від замовлення, кожен вид продукції може піддаватися додатковій обробці. Укрупнені позиції (готові види продукції) декомпонуються за видами розфасовки, затарювання та технології переробки. Менеджери планових служб формують позиції порт-

феля замовлень (майбутню виробничу програму) саме з укрупнених видів готової продукції. Менеджери переробних підрозділів приймають рішення щодо управління випуском розширеного асортименту продукції таким чином, щоб валовий випуск був не нижчим від планового завдання, отриманого з верхнього рівня, іншими словами, вони можуть змінювати види та обсяги випуску готової продукції. Виробнича програма має містити кількісні показники, що визначають завантаження видобувної та переробної потужності підприємства у сукупності підрозділів.

Сучасні комп'ютерні технології обробки великих обсягів даних у режимі реального часу дозволяють автоматизувати вирішення завдань, таких як вибір виду транспортування продукції, оптимізація розміщення виробничих та складських ділянок, оптимальна маршрутизація потоків продукції, управління всіма фазами руху продукту від видобутку до відвантаження, прогнозування попиту та потреб у ресурсах, оптимізація технічного обслуговування обладнання [8]. Автоматизоване управління дозволяє вирішити завдання планування, обліку та контролю, а також оперативного управління логістичними процесами.

Перелічені особливості виробничої діяльності переробного підприємства та його підрозділів дозволяють здійснити постановку завдань моделювання. Відповідно до методики моделювання техніко-економічних завдань та системного аналізу, для прийняття рішень щодо стратегічного та тактичного планування діяльності підприємства на сезонний період необхідно розробити математичні моделі, що дозволять здійснювати розрахункові показники виробничої програми підприємства та його підрозділів.

Математичні моделі стратегічного (на сезон) та тактичного (на місяць) планування діяльності забезпечують обрахунок найкращого у середньоквадратичному сенсі прогнозу показників діяльності переробного підприємства на рік, сезон, місяць.

**Постановка задач стратегічного планування обсягів випуску готової продукції.**

Формальну постановку задачі стратегічного планування обсягів випуску готових видів продукції переробним підприємством необхідно виконувати окремо для кожного з сезонів та представити у вигляді функціоналів мети. Постановка задачі – визначити такі обсяги випуску готових видів продукції переробним підприємством за сезон, що дозволять підприємству отримати максимальний дохід при затверджених сезонних цінах на продукцію:

$$I^1_{cmp.пл.} = F \left( \sum_{j=1}^n a_j P(A_j) g(A_j) + a_0 \right) \rightarrow \max_{P(A_j)g(A_j)} \quad (1)$$

де  $A_j, j = 1..n$  – асортимент готових видів продукції,  $P(A_j)$  – ціна на готовий вид продукції  $A_j$  у поточному сезоні,

$g(A_j)$  – валовий випуск готовий вид продукції  $A_j$  у поточному сезоні,

$a_j$  – коефіцієнти функціоналу, що обраховуються при навчанні моделі.

При обчисленні сезонної ціни готового виду продукції  $P(A_j)$  необхідно врахувати факт, що у укрупнений вид продукції  $A_j$  входять кілька видів продукції з розширеного асортименту переробного підприємства, кожний з яких має свою сезонну ціну.

Формальну постановку задачі стратегічного планування обсягів випуску продукції необхідно виконувати окремо для кожного з сезонів. За результатами аналізу затратного механізму процесу переробки сировини [7] відомо, що технологічна собівартість продукції визначається характеристиками переробних підрозділів. Саме це впливає на формулювання задачі стратегічного планування обсягів виробництва підрозділами на сезон.

Постановка задачі стратегічного планування обсягів випуску продукції кожним переробним підрозділом – визначити такі обсяги виробничих завдань переробних підрозділів, щоб затратний механізм виробництва продукції підприємством за поточний сезон був мінімальним:

$$I^2_{cmp.пл.} = F \left( \sum_{i=1}^m Z_i G(S_i) \right) \rightarrow \min_{Z_i G(S_i)} \quad (2)$$

де  $G(S_i)$  – валовий випуск  $i$ -го переробного комплексу за поточний сезон,

$Z_i$  – витрати  $i$ -го переробного комплексу на валовий випуск продукції за поточний сезон,

$$Z_i = \sum_j W_i(A_j) S_i(A_j),$$

$S_i(A_j)^{i=1}$  – обсяги виробництва готового виду продукції  $A_j$  на  $i$ -му переробному підрозділі,

$W_i(A_j)$  – технологічна собівартість готового виду продукції  $A_j$  на  $i$ -му переробному комплексі.

Для аналізу бізнес-процесів та проектування підсистем планування діяльності переробного підприємства обрана методологія IDEF0, яка використовує графічний опис структури та функцій системи [10].

**Постановка задач тактичного планування обсягів випуску готової продукції.** Тактичне планування діяльності підприємства є логічним продовженням стратегічного, тому воно вирішує, зазвичай, задачі інформаційної підтримки процесів планування, аналіз сировинної бази щодо

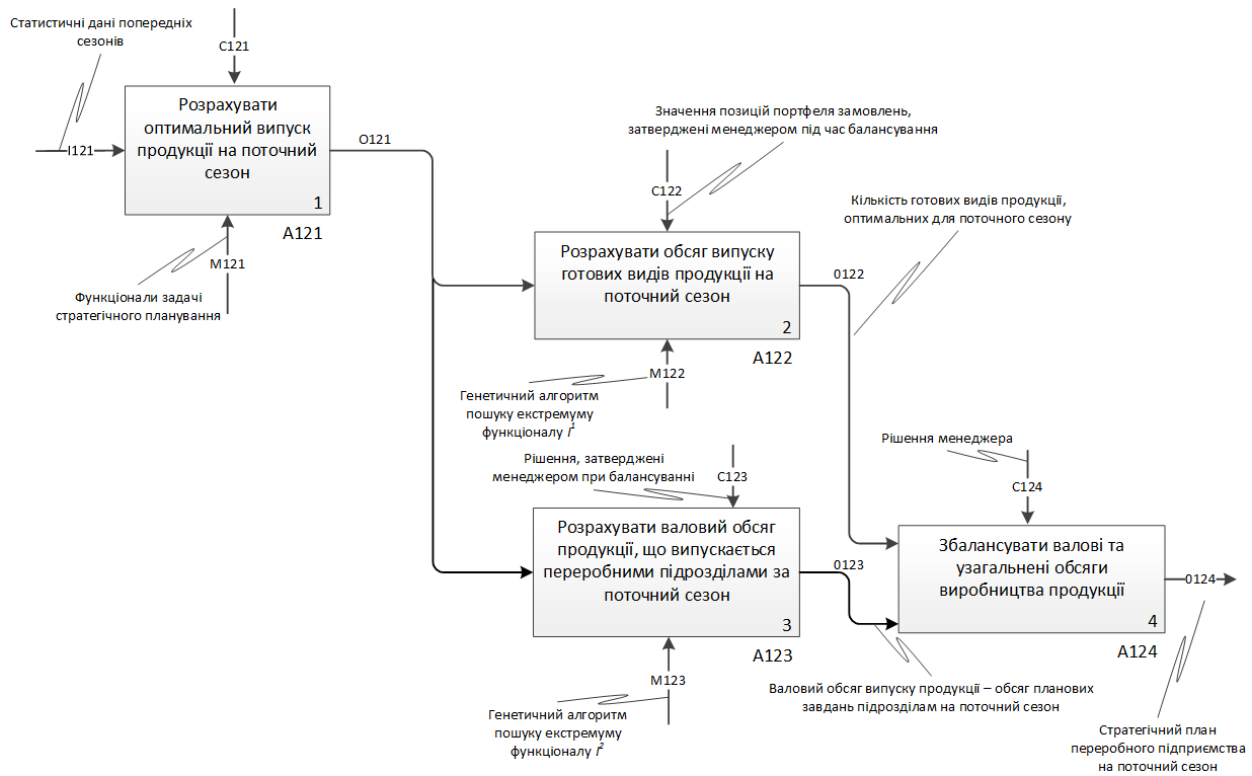


Рис. 1. Контекстна IDEF0-діаграма підсистеми стратегічного планування випуску готових видів продукції за поточний сезон

реалізації виробничої програми, вибір методів і методики планування, числове рішення систем математичних рівнянь [3]. Для прийняття тактичних рішень необхідно поставити та формалізувати завдання планування окремо для кожного із сезонів діяльності переробного підприємства.

Формальна постановка задачі тактичного планування по випуску готових видів продукції переробним підприємством за місяць виконується окремо для кожного із сезонів діяльності підприємства:

$$I^1_{\text{макс.на.}} = F\left(\sum_{j=1}^n b_j P(A_j) g_M(A_j) + b_0\right) \rightarrow \max_{P(A_j) g_M(A_j)} \quad (3)$$

де  $g_M(A_j)$  – обсяг випуску виду продукції  $A_j$  за місяць поточного сезону,  $P(A_j)$  – сезонна вартість готового виду продукції  $A_j$ ,  $b_j$  – коефіцієнти функціоналу, обраховуються при опитному навчанні моделі.

Формальна постановка задачі тактичного планування обсягів випуску переробними підрозділами – визначити обсяги виробничих завдань переробним підрозділам на місяць поточного сезону таким чином, щоб витратний механізм виробництва переробного підприємства був мінімальним:

$$I^2_{\text{макс.на.}} = F\left(\sum_{i=1}^m Z_{iM} G_M(S_i)\right) \rightarrow \min_{Z_{iM} G_M(S_i)} \quad (4)$$

де  $i = 1..m$  – номер переробного підрозділу,  $Z_{iM}$  – витрати і-го підрозділу на валовий випуск за місяць поточного сезону,  $G_M(S_i)$  – валовий випуск продукції і-м підрозділом за місяць поточного сезону.

Для подальшої формалізації структури багатоврівневої системи, здійснення адаптивного налаштування функціональних моделей, можливо використати пакет прикладних програм MATLAB. Засоби пакету дозволяють виконувати числові процедури розв’язання рівнянь і пошуку оптимальних рішень, реалізовувати параметричну ідентифікацію та налаштування моделей прогнозу [7]. Засоби MATLAB дозволяють менеджерам розраховувати оптимальні значення функціоналів мети (1)–(5) та визначати альтернативні управлінські рішення.

**Постановка задач оперативного планування обсягів випуску готової продукції.** Постановки завдання, отримані в результаті вирішення завдань стратегічного та тактичного планування переробними підрозділами піддаються технічним та організаційним збуренням, тобто відхиленням від планових завдань. Виробничим службам підрозділів потрібно мати інструментарій оцінки поточної реалізації планових завдань та відпрацю-



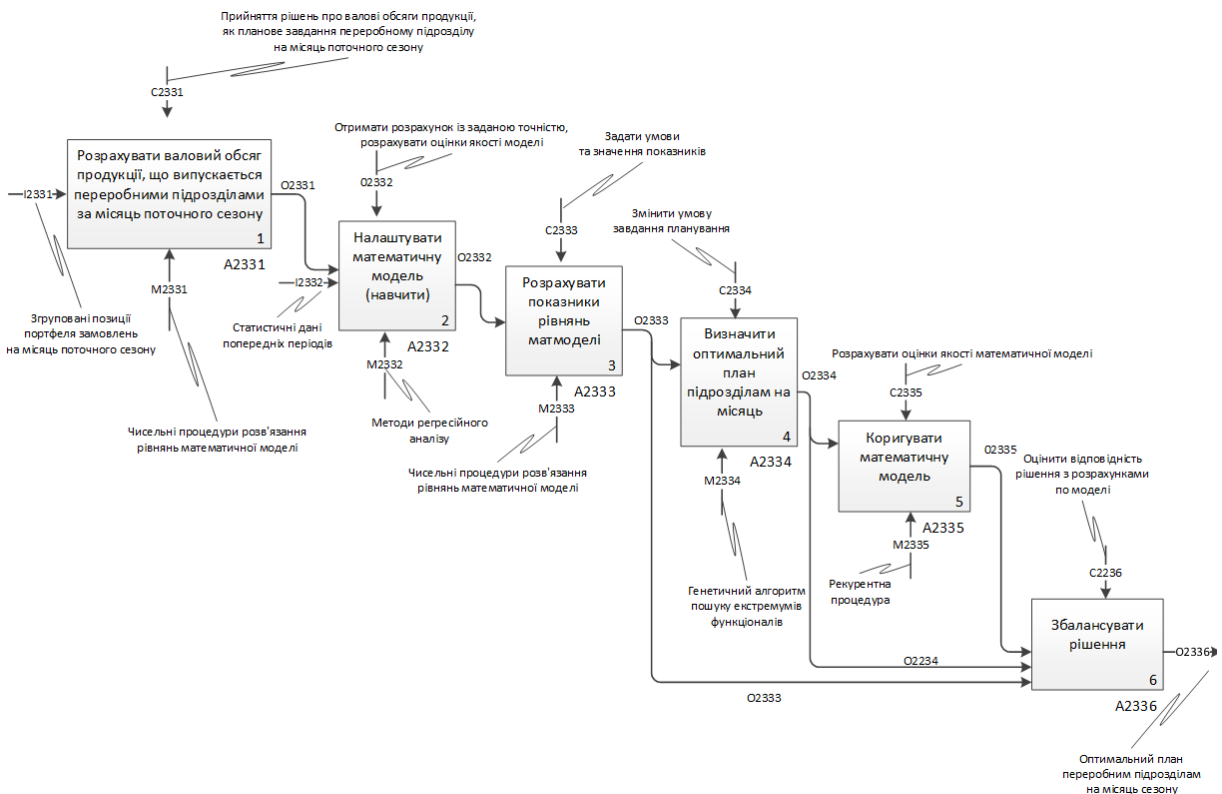


Рис. 2. Контекстна IDEF0-діаграма підсистеми тактичного планування завдань переробних підрозділів на місяць поточного сезону

вання всіх відхилень. Ухвалення рішень з інтервалом квантування в одну добу становить сутність завдання оперативного планування діяльності переробних підрозділів.

Формальна постановка задачі оперативного планування:

$$I_{оп.пл.} = F\left(\sum_{j=1}^n \lambda_j g_{д.ф.}(A_j)\right) \rightarrow \max_{g_{д.ф.}(A_j)} \quad (5)$$

де  $A_j, 1..n$  – асортимент готової продукції,  $\forall j : g_{д.ф.}(A_j) = g_{д.ф.}(A_j) + |\Delta g_{ф.}(A_j)|$ ,  $g_{д.ф.}(A_j)$  – планові завдання по випуску виду продукції  $A_j$  за добу,  $|\Delta g_{ф.}(A_j)|$  – відхилення від випуску виду продукції  $A_j$ ,  $\lambda_j$  – частка добового обсягу продукції  $A_j$ , що визначається менеджером планового відділу переробного підрозділу.

Математичні моделі, що визначають можливість динамічного прогнозу випуску асортименту продукції, є параметричними структурами. Залежно від меж інтегрування, що задаються менеджерами переробних підрозділів, прогноз може здійснюватися на будь-який заданий період. Ідентифіковані рівняння динамічної моделі дозволяють менеджерам переробних підрозділів розрахувати планові завдання на кожен добу місяця [6].

В режимі прийняття оперативних рішень постановка завдання може бути сформульована таким

чином: визначити виробничі завдання наступних календарних періодів (добу) з урахуванням відхилень від виробничої програми попередніх планових періодів таким чином, щоб забезпечити максимальний випуск продукції. Оцінювання витрат виробництва при визначенні економічно обґрунтованих планових завдань можна виконувати за допомогою генетичних алгоритмів.

**Висновки.** У роботі розглянута система планування виробничої діяльності багаторівневого переробного підприємства, що має власні запаси сировини, з сезонним характером попиту та виконано аналіз процесу випуску продукції. Були виконані постановки задач стратегічного, тактичного та оперативного планування обсягів випуску продукції таким чином, що на верхньому рівні менеджери приймають управлінські рішення з випуску готових видів продукції, а на нижньому – рішення з випуску кінцевого асортименту продукції переробних підрозділів, що визначається вимогами замовників. Задачі планування представлені функціоналами мети, що визначають можливість оптимального планування діяльності підприємства за допомогою рекомендацій. Створені контекстні IDEF0-діаграми підсистем стратегічного, тактичного та оперативного планування виробничої діяльності переробного підприємства та його підрозділів.

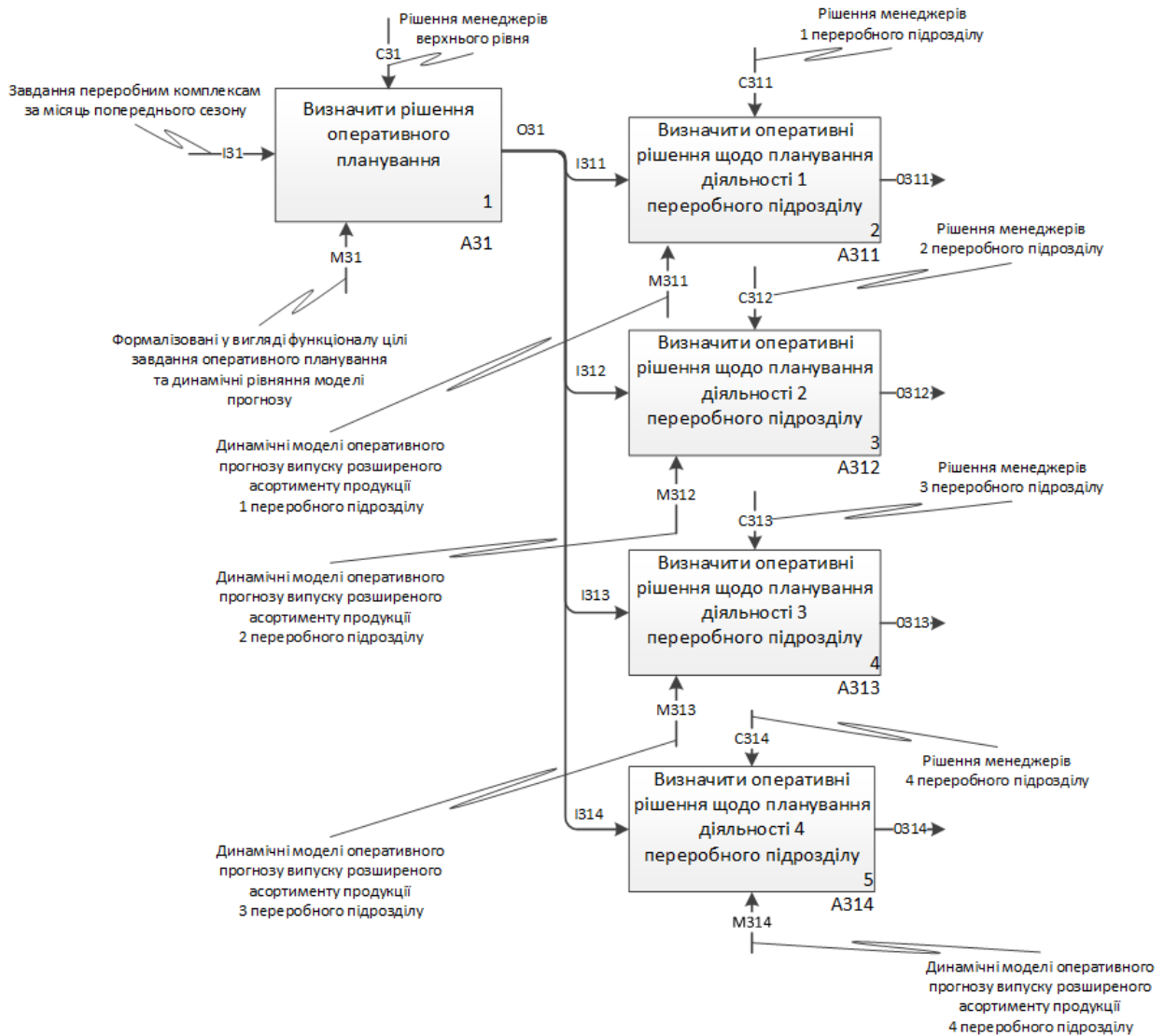


Рис. 3. Контекстна IDEF0-діаграма підсистеми оперативного планування верхнього рівня

**Список літератури:**

1. Мороз М.М., Труніна І.М., Мороз О.В. Оптимізація логістичної діяльності переробного підприємства. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2021. № 3-4 (280-281). С. 63-69.
2. Сергєєва О.Р., Анисарович І.Ю. Оптимізація управління запасами в оптових компаніях. *The 13th International scientific and practical conference "Information activity as a component of science development"*. International Science Group. 2023. Pp. 171-172. DOI – 10.46299/ISG.2023.1.13.
3. Маслак О.О., Малик М.В. Методи тактичного планування: сутність та типологія у системі циркулярних бізнес-моделей підприємств. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. Львів, 2023. № 1 (9). С. 60-68.
4. Ларка Л.С., Нелюб К.П. Бізнес-планування в системі економічного управління підприємством. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць*. Харків, 2016. № 27 (1199). С. 3-7.
5. Росоха В.В., Газуда Л.М. Особливості планування в системі маркетингового менеджменту. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Економіка : збірник наукових праць збірник наукових праць*. Ужгород, 2013. Вип. 2 (39), ч. 1. С. 223-233.
6. Чикунів П.О., Берестовий А.М. Правила розробки та застосування інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень для дворівневих підприємств. *Таврійський науковий вісник*, 2022. № 3. С. 79-87. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.9>
7. Чикунів П.О., Криводубський О.О. Метод побудови інформаційної технології системи підтримки прийняття рішень для багаторівневих підприємств з сезонною діяльністю. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2014. № 61 (1103). С. 42-54.

8. Fernandes M., Canito A., Bolyń-Canedob V., Conceicao L., Praca I. Data analysis and feature selection for predictive maintenance: A case-study in the metallurgic industry. *International Journal of Information Management*. 2019. Volume 46. Pp. 252-262.

9. Уряд збільшив фінансування грантових програм для переробних підприємств. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/uriad-zbilshyv-finansuvannia-hrantovykh-prohram-dlia-pererobnykh-pidpriemstv> (дата звернення: 12.01.2023).

10. Chari A., Stahre J., Barring M., Despeisse M., Li D., Friis M., Mörstam M., Johansson B. Analyzing the antecedents to digital platform implementation for resilient and sustainable manufacturing supply chains-An IDEF0 modelling approach. *Journal of Cleaner Production*. 2023, Volume 429: 139598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139598>

### **Chykunov P.O., Nefodova I.V. SUPPORT FOR DECISION-MAKING PROCESSES IN MULTI-LEVEL PROCESSING ENTERPRISES**

*The article discusses the problem of making optimal management decisions by managers of domestic processing enterprises with their own raw material base. Such enterprises are characterized by seasonal demand for products, which complicates the process of production program development for managers. Seasonal demand for products negatively affects the liquidity of the enterprise. The logistic system, covering the entire material flow from raw material sources to consumers, requires the integration of information technologies to optimize production and product supply management. Mathematical models and planning algorithms are based on an analysis of the enterprise's activities. General features of the enterprise's production activities determine the directions of modeling and solving planning tasks. Strategic and tactical planning focuses on information support and numerical decision-making for effectively addressing production and planning tasks. The formulation of strategic and tactical planning tasks is determined by the need to maximize the revenue of the processing enterprise during seasonal product prices and minimize the cost mechanism of production. The formulation of operational planning tasks is driven by the need for processing units to work out deviations from the tasks of the strategic and tactical planning program. The tasks of strategic (seasonal), tactical (monthly for the season), and operational (daily) planning of finished product output volumes have been defined. The planning tasks complex is presented by goal functions, determining the possibility of optimal planning of the enterprise's activities. The IDEF0 methodology is applied to analyze business processes and design planning subsystems. This work opens up opportunities for improving the process of making optimal decisions by managers of planning services for domestic multilevel processing enterprises in the extraction and processing industry.*

**Key words:** Decision-making process, processing enterprises, seasonal demand for products, strategic, tactical, and operational planning, IDEF0-diagram, information technology.

**Шубович І.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМ ЛОЯЛЬНОСТІ

Широке використання у бізнесі та громадському секторі споживчих програм лояльності актуалізує проблему їх моделювання, розробки, оцінювання ефективності та оптимізації. У даній роботі проаналізовано стан досліджень у цій сфері у науковій літературі. Проведений аналіз показав, що існує багато типів програм лояльності, кожен з яких має переваги та недоліки, а тому застосовується в певних бізнес-контекстах. Згідно розглянутих робіт не існує єдиного методу для оцінки ефективності програм лояльності, натомість науковці пропонують різні комплексні підходи, що використовують економічні, комунікаційні та маркетингові показники. Важливим результатом застосування програм лояльності є обчислення маркетингових показників позитивної цінності клієнта та прогнозу відтоку клієнтів. Вчені розробили багато моделей обчислення кожного із показників, що обираються в залежності від типу програму лояльності. Серед них є статистичні моделі і ті, що базуються на методах машинного навчання. Дослідники констатують, що деякі статистичні моделі показують результати з точністю, порівняною з методами машинного навчання, але є простішими в реалізації та швидшими для обчислення. У межах розробки та оптимізації програм лояльності виникають задачі обробки великої кількості даних від користувачів. Для попередньої підготовки даних часто використовують різноманітні статистичні методи, для аналізу даних – широкий спектр методів машинного навчання: кластерний аналіз, дерева прийняття рішень, метод опорних векторів, штучні нейронні мережі. Кожен з означених методів має багато варіантів реалізації, що мають свої переваги, недоліки та специфіку, яку необхідно враховувати при застосуванні. Науковці доводять, що комплексний підхід із використанням як статистичних, так і комбінування методів машинного навчання дозволяє створювати оптимальні програми лояльності. Окремі науковці порівнюють точність різних методів машинного навчання для обчислення прогнозу відтоку клієнтів, і констатують, що найбільшу точність забезпечують штучні нейронні мережі. Розробка ефективних, науково-обґрунтованих програм лояльності залишається наукомісткою задачею.

**Ключові слова:** лояльність, програма лояльності, машинне навчання, штучна нейронна мережа, дерево прийняття рішень, метод опорних векторів.

**Постановка проблеми.** У сучасному бізнес-середовищі, де конкуренція змушує компанії не лише залучати нових клієнтів, а й утримувати існуючих, програми лояльності стали ключовим елементом стратегії збереження клієнтської бази. Ефективність таких програм безпосередньо впливає на прибутковість та довгострокову стійкість підприємства. Однак, розробка та моделювання програм лояльності є складним процесом, який включає аналіз великих обсягів даних, розуміння поведінкових патернів споживачів та адаптацію до змінних умов ринку.

Системи моделювання програм лояльності потребують постійного вдосконалення та інтеграції передових методів маркетингу та науки про дані, зокрема машинного навчання та штучного інтелекту для точного прогнозування поведінки

клієнтів та їх відтоку. Хоча багато досліджень було зосереджено на ефективності існуючих програм, існує відчутна прогалина в літературі щодо уніфікованого підходу до розробки та оцінки таких систем.

Основна проблема, яку розглядає ця стаття, полягає у визначенні та аналізі існуючих методів моделювання програм лояльності, їх ефективності, адаптивності та придатності до специфічних умов бізнес-моделей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку з новими технічними можливостями, науковий інтерес до цієї сфери зростає. Зокрема, проблеми створення і моделювання програм лояльності приділяли досліджували багато вітчизняних і закордонних вчених. Серед вітчизняних вчених можна відзначити О. Панаско,

Н. Микитенко, О. Соболеву-Терещенко, В. Антонову, Ю. Чаплінського. Також цій проблематиці присвятили роботи наступні закордонні науковці: Сіддарт С. Сінгх (Siddarth S. Singh), Діпак Ч. Джейн (Dipak C. Jain), Й. Деляна (Y. Deliana), І. Рум (I.A. Rum), Р. Агарвал (R. Agarwal), С. де Кнаді (S. De Snudde), Д. Мартенс (D. Martens), А. Алури (A. Aluri), Б. С. Прайс (B. S. Price), Н. Г. МакІнтайр (N. H. McIntyre), С. Ходабандеглу (S. Khodabandehlou), М. З. Рахман (M. Z. Rahman), М. Т. Балестар (M. T. Ballestar), П. Грау-Карлз (P. Grau-Carles), Дж. Сайнз (J. Sainz), М. Р. Мачадо (M. R. Machado), С. Каррай (S. Karray), І. Т. де Суза (I. T de Sousa) та інші.

**Метою статті** є детальне дослідження стану проблеми систем моделювання систем програм лояльності.

**Виклад основного матеріалу.** О. Панаско та Н. Микитенко у дослідженні [1] провели історичний аналіз концепції лояльності, оцінили поведінкові та емоційні аспекти споживчої лояльності. Також детально розкрито чотири стадії циклу розвитку лояльності клієнтів:

- 1) стадія когнітивної лояльності;
- 2) стадія афективної лояльності;
- 3) стадія конверсійної лояльності;
- 4) стадія ефективної лояльності.

Авторами описано модель піраміди лояльності клієнтів (рис. 1), яка враховує динаміку циклу життя клієнта.

Науковці висвітили авторське тлумачення терміну «програма лояльності клієнтів» на підставі аналізу дефініцій, представлених у вітчизняних та закордонних наукових джерелах. Також запропоновано класифікацію таких програм (рис. 2) [1].

Автори здійснили аналіз наступних типів програм лояльності:

- 1) Багаторівнева дисконтна програма;

- 2) Бонусна програма;
- 3) Фіксована програма знижок;
- 4) Програма тимчасових знижок;
- 5) Товар у подарунок;
- 6) Партнерська програма лояльності;
- 7) Платна програма лояльності;
- 8) Некомерційна програма лояльності;
- 9) Імерсивна програма лояльності [1].

Для кожного із типів програм лояльності висвітлено їх сильні сторони та можливі недоліки, а також розглянуто практичне впровадження на прикладі українських підприємств торгівлі [1].

Науковці сформулювали ключові завдання для розробки ефективних програм лояльності у залежності від тенденцій розвитку поведінки споживача. Окремо наголошується яким чином пандемія COVID-19 вплинула на пріоритетні завдання програм лояльності [1].

У дослідженні [2] О. А. Соболева-Терещенко та В. О. Антонова розглядають оцінку продуктивності маркетингових ініціатив у контексті створення та оптимізації програм лояльності клієнтів.

Науковці доводять, що невірно оцінювати ефективність застосування маркетингових програм, базуючись на одному показнику ефективності. Спираючись на розглянуті дослідження, автори описали алгоритм оцінки ефективності маркетингової програми, який можна застосувати і для оцінювання ефективності програм лояльності (рис. 3) [2].

Дослідники у роботі [2] також пропонують набір часткових показників ефективності програм лояльності із наведеними формулами:

1. Економічні

1) Індекс повернення інвестицій в програмі лояльності

2) Коефіцієнт покриття витрат в програмі лояльності



Рис. 1. Піраміда лояльності покупців [1]

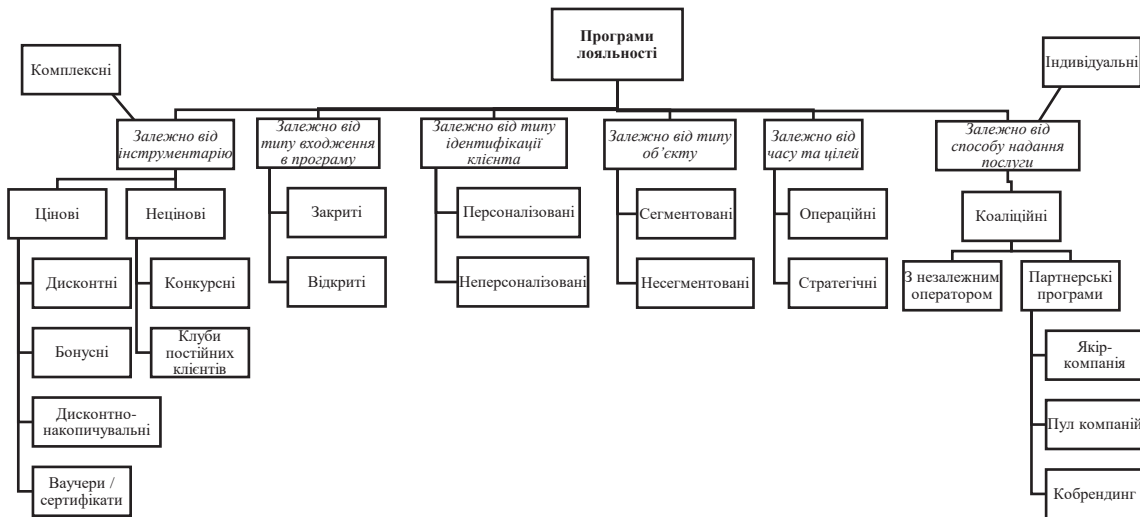


Рис. 2. Класифікація програм лояльності покупців [1]

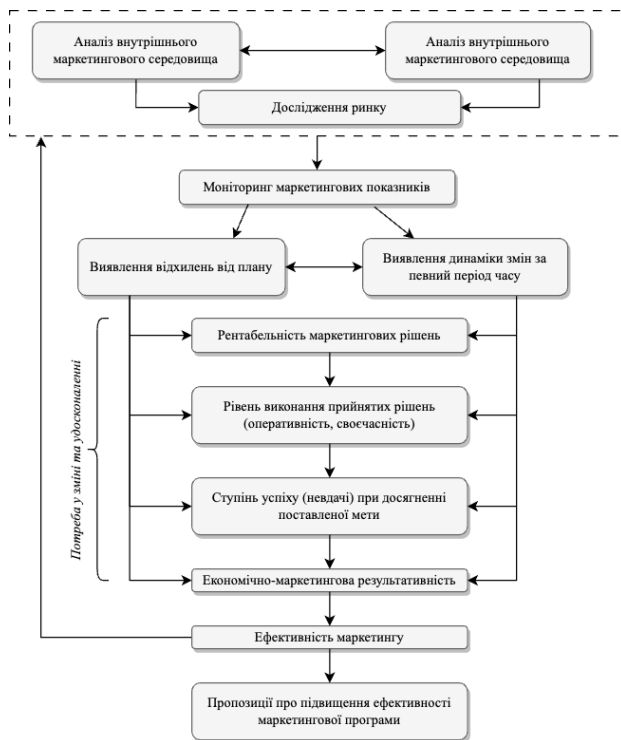


Рис. 3. Алгоритм оцінювання ефективності маркетингової діяльності [2]

- 3) Частка витрат на впровадження програми лояльності у загальних
- 4) Коефіцієнт рентабельності програми лояльності
2. Маркетингові
  - 1) Індекс товарообігу
  - 2) Темп приросту середньої вартості покупок
  - 3) Індекс продажів

### 3. Комунікаційні:

- 1) Індекс рейтингів популярності
- 2) Індекс задоволеності споживачів
- 3) Індекс якості обслуговування.

Автори доводять, що правильний набір критеріїв є передумовою для оцінювання ефективності програм лояльності. Ретельний огляд наявних досліджень та публікацій виявив брак уніфікованого методологічного підходу для оцінювання ефективності маркетингу в цілому та програм лояльності зокрема. В роботі систематизовано різні методики оцінювання продуктивності маркетингової діяльності і підкреслено, що використання єдиного критерію може не відобразити повної картини ефективності [2].

Дослідники сформулювали методику для вимірювання ефективності маркетингу, визначивши ключові індикатори, які впливають на її оцінку. У роботі пропонується інтегрований показник, що базується на універсальній формулі, а також розроблено шкалу для оцінювання та класифікації рівня продуктивності маркетингової діяльності [2].

Дослідження Ю. Б. Чаплінського [3] присвячено аналізу підходів до оцінки ефективності програми лояльності. Автор стверджує, що нерозуміння необхідності постійного аналізу показників ефективності системи лояльності часто призводить до поганих економічних результатів і, як наслідок, закриття програм лояльності [3].

Науковець категоризував підходи до оцінки ефективності програми лояльності на декілька груп:

- оцінювання витрат на створення програми лояльності через узагальнену систему показників лояльності споживача до підприємства (час спо-

живання; частка споживчої лояльності; ціна переходу; відносна лояльність; залишковий індекс промоутера – NPS; оцінка ставлення; конверсійна модель; комплексна модель);

- оцінювання ефективності програми лояльності, враховуючи зміни обсягу продажу чи зміни прибутку;

- оцінювання ефективності інвестиційних проектів (індекс доходності або рентабельності (Profitability Index, PI), чистий приведений дохід (NPV, Net Present Value), період окупності програми лояльності (Payback Period, Pay-Back Period, PBP), внутрішня норма доходності (Internal Rate of Return, IRR));

- визначення ефективності витрат на реалізацію програми лояльності на основі показника ROMI (Return of Marketing Investment) [3].

У роботі продемонстровано показники, які варто використовувати для аналізу віддачі від інвестицій у програми лояльності. Наведені підходи дозволять оцінити ефективність програм лояльності не тільки в класичному маркетинговому підході, але й програм лояльності, сконфігурованих на основі штучного інтелекту [3].

Сіддарт С. Сінгх (Siddarth S.Singh) та Діпак Ч. Джайн (Dipak C. Jain) провели ґрунтовний аналіз оцінки пожиттєвої цінності клієнта (CLV) [4]. Науковці дають визначення пожиттєвої цінності клієнта як передбачення чистого прибутку, пов'язаного з усією майбутньою взаємодією з клієнтом. Показник CLV є одним з ключових у поняттях програм лояльності і використовується під час різних етапів роботи з програмою: під час початкової конфігурації, адаптації, прийняття бізнес рішень [4].

Автори наводять головні фактори, які впливають на пожиттєву цінність клієнта:

- 1) Час повторної покупки;
- 2) Вартість залучення клієнта;
- 3) Вартість утримання клієнта;
- 4) Вартість повернень;
- 5) Вартість маркетингової діяльності;
- 6) Мережевий ефект;
- 7) Коефіцієнт знижок [4].

Науковці наводять декілька категоризацій програм лояльності в залежності від різноманітних факторів. Поширеними категоріями програм лояльності є наступні:

- 1) За наявністю контракту (контрактні, неконтрактні).
- 2) За часом між транзакціями (постійні, дискретні).
- 3) За витратами користувачів (фіксовані, змінні) [4].

Автори констатують, що найпоширеніша категоризація програм лояльності по відношенню до пожиттєвої цінності клієнта – за наявністю контракту. В контрактному контексті, де між компанією і клієнтом існують певні договірні відносини, очікуваний дохід може бути спрогнозовано досить точно. Зважаючи на рівень використання сервісу, зростаючий кумулятивний прибуток від всього життєвого циклу користувача може бути обчислений. В неконтрактному контексті, компанія повинна турбуватися про підтримку стосунки з клієнтом, оскільки він як правило розбиває свої витрати у даній категорії між кількома компаніями. В такому контексті прогноз пожиттєвої цінності клієнта ускладнюється і вимагає більшої кількості параметрів для забезпечення необхідної точності [4].

У дослідженні розглянуто різноманітні моделі обчислення CLV в залежності від категорії програм лояльності, розглянуто їх сильні і слабкі сторони. Зокрема автори описують та надають математичні формули для наступних моделей:

- 1) Контрактні програми лояльності
  - a. Базова структурна модель CLV;
  - b. Група RFM моделей (Recency, Frequency, Monetary);
  - c. Модель інтенсивності відмов (Hazard Rate Model);
- 2) Неконтрактні програми лояльності
  - a. Pareto/Negative Binomial Distribution або Pareto/NBD модель;
  - b. Beta-Geometric/NBD або BG/NBD модель;
  - c. Модель ланцюгів Маркова;
  - d. Модель ланцюгів Маркова–Монте-Карло [4].

Автори зробили важливий підсумок про те, що безвідносно до простоти деяких статистичних моделей (таких як RFM, BG/NBD), на практиці ці методи показують відхилення від реальних даних близько 3%, що можна порівняти із технічно складнішими і водночас менш оптимальними методами машинного навчання [4].

Автори стверджують, що незважаючи на велику кількість моделей обчислення пожиттєвої цінності клієнта, не існує загальноприйнятої схеми рекомендацій щодо того, яку модель обирати в конкретних умовах [4].

Й. Деляна (Yosini Deliana) та І. Рум (Irlan Rum) присвятили своє дослідження вивченню споживчої лояльності за допомогою нейронних мереж. У межах роботи автори розробили нейронну мережу для аналізу лояльності користувачів до різних брендів швидкорозчинної кави в Індонезії [5]. У дослідженні авторами використовується

штучна нейронна мережа (Artificial Neural Network – ANN), навчена алгоритмом масштабований спряжений градієнт (SCG) із випадковим розподілом даних. Запропонований метод забезпечує пряме відображення конфігураційних атрибутів лояльності на поведінку споживачів [5].

Для побудови нейронної мережі дослідники використали підхід багаторівневого перцептрон (Multi Layered Perception – MLP) з 3-ма рівнями навчання, архітектура якого показана на рис. 4. Вузли в такій мережі, що називаються штучними нейронами і з'єднуються між собою синапсами, можуть приймати закодовані сигнали, обробляти їх і передавати далі. Обробка сигналу здійснюється за допомогою нелінійної функції активації, у даному дослідженні була використана сигмоїда. На вхід мережа приймає значення змінних, а вихідний сигнал є результатом навчання. Вчені обрали в якості змінних характеристики брендів кави (розмір, тип упаковки, дизайн, задоволеність користувачів, наявність вибору, тощо), а на виході отримали значення рівня лояльності до даного продукту. Автори отримали точність моделі на рівні 58,2%, однак вони вказали на можливість побудови більш точної моделі: збільшення кількості змінних і їх зміна [5].

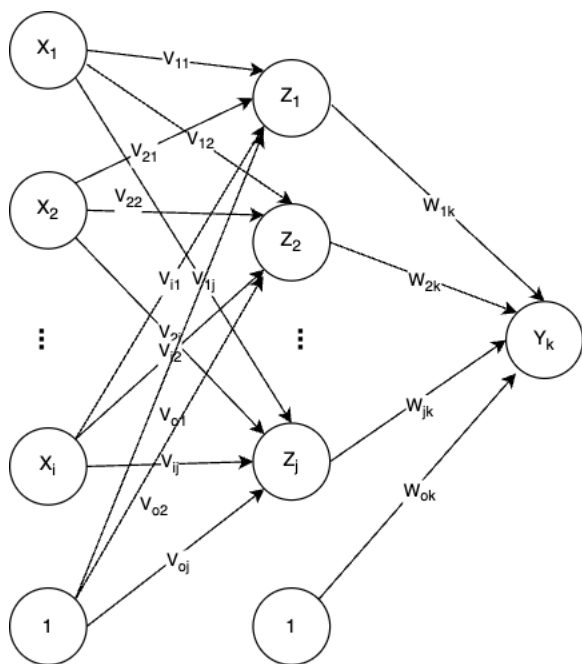


Рис. 4. Архітектура ANN моделі [5]

Дослідження, проведено за допомогою даних і штучних нейронних мереж, підтвердило зручність використання нейронних мереж ANN для аналізу споживчої лояльності, ключових її факторів, аспектів поведінки споживачів [5].

Реті Агарвал (Reeti Agarwal), проводячи експеримент з даними програми лояльності, використав методи машинного навчання, щоб відповісти на питання, чи програми лояльності дійсно призводять до повторних покупок [6].

Вчений досліджував дані програм лояльності гіпермаркетів у Індії у намаганні підтвердити переваги програм лояльності. Первинні дані були отримані шляхом маркетингового дослідження і потім нормалізовані за допомогою таких статистичних інструментів як тест Кайзера-Мейєра-Олкіна та критерія Бартлета. Для розподілу клієнтської бази на групи по їх відношенню до переваг програм лояльності, автор використав кластерний аналіз. Ієрархічний кластерний аналіз показав, що вибірка даних має 3 чітких кластери. Після цього вчений використав метод кластеризації К-середніх (k-means clustering) для обчислення центру кластерів. Таким чином, автор дослідження розбив вихідну вибірку даних на 3 кластери, які відповідали трьом групам користувачів: зацікавлених у програмах лояльності, незацікавлених і тих, хто сумнівається [6].

У подальшому така техніка машинного навчання як дерева рішень (Classification & Regression Trees – CART або C&RT) були використані для визначення як демографічні характеристики впливають на ймовірність клієнта бути активним користувачем програми лояльності. Параметрами дерева рішень були 6 вхідних змінних (стать, вік, дохід, освіта, робота, сімейний стан) та вихідна змінна – готовність стати постійним клієнтом. Фрагмент побудованого дерева рішень зображено на рис. 5.

Дане дослідження продемонструвало можливість побудувати більш оптимальні програми лояльності. Воно є прикладом спільного використання статистичних методів та різноманітних методів науки про дані – алгоритмів кластеризації, дерев прийняття рішень [6].

Софі Де Кнад (Sofie De Cnudde) і Девід Мартенс (David Martens) використали статистичні методи та алгоритми добування даних (Data Mining) для аналізу програми лояльності публічного сектору – карти містянина міста Антверпен [7]. Використовуючи інформацію про поведінку користувача, класифікатор Байєса і метод опорних векторів, дослідники побудували модель, що здатна передбачити наскільки активно клієнти користуватимуться картою, які локації відвідають та коли відмовляться від картки. Порівняння отриманих результатів із даними, що отримані від реальних карток містянина, показало що точність отрима-



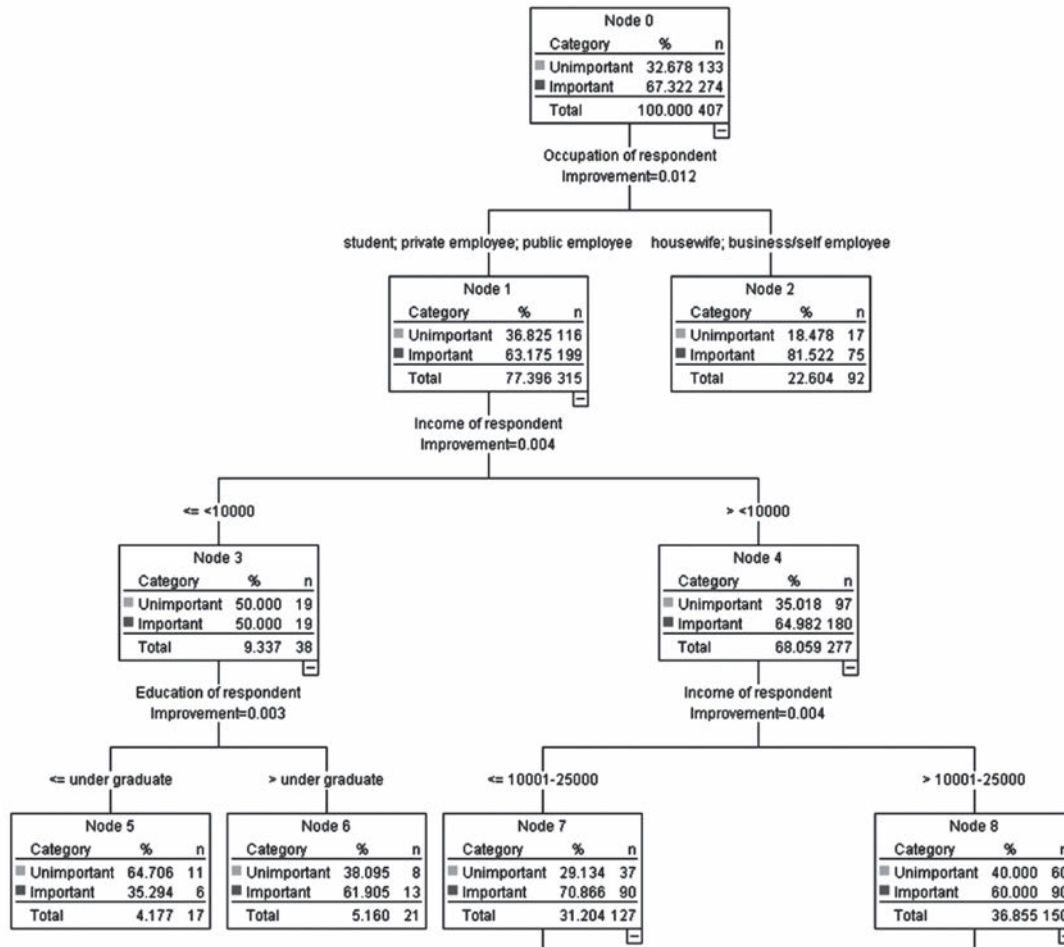


Рис. 5. Фрагмент дерева рішень [6]

них прогнозів варіюється від 85% до 92,5%, і це є прийнятним результатом [7]. Вчені показують подальші шляхи уточнення прогнозів, які полягають у подальшій деталізації і аналізі дій клієнтів.

Аджай Алури (Ajay Aluri), Бредлі С. Прайс (Bradley S. Price) і Ненсі Г. МакІнтайр (Nancy H. McIntyre) дослідили використання алгоритмів машинного навчання для динамічної адаптації під користувача програми лояльності. Автори розширили традиційні для готельного бізнесу CRM-системи підходами до машинного навчання, що дозволило динамічно приймати рішення та прогнозувати поведінку клієнтів [8].

Автори у роботі показують, що додавання методів машинного навчання в досліджену і відлагоджену систему може створити нові можливості і принести додаткову цінність [8].

Саміра Ходабандеглу (Samira Khodabandehlou) і Махмуд З. Рахман (Mahmoud Z. Rahman) розглянули ефективність різних методів машинного навчання для прогнозування відтоку клієнтів програми лояльності [9].

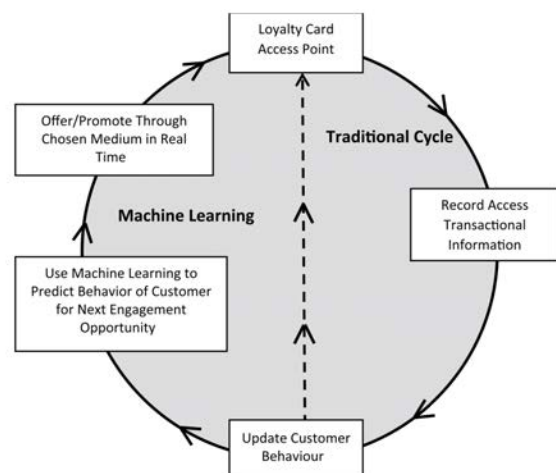


Рис. 6. Динамічне залучення споживачів за допомогою машинного навчання [8]

Згідно з результатами, 8 змінних мали найбільший вплив на точність прогнозування відтоку: частота транзакцій, час останньої транзакції, сума грошей, кількість транзакцій, кількість повернень,

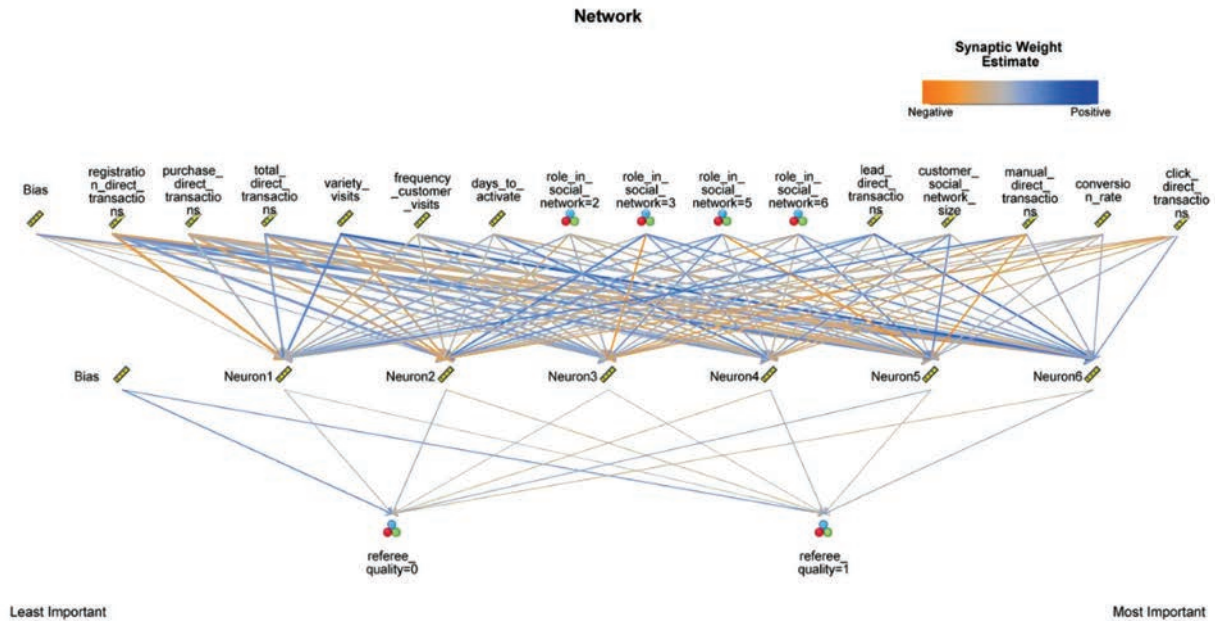


Рис. 7. Архітектура ANN MLP мережі [11]

знижка, розподіл часу, призи. В окремих випадках можна скористатися лише першими трьома змінними – частота транзакцій, час останньої транзакції, сума грошей (RFM) і отримати достатньо точний прогноз відтоку клієнтів [9].

Серед методів машинного навчання дослідники розглянули різноманітні варіанти штучних нейронних мереж (ANN), метод опорних векторів (SVM), дерева прийняття рішень (DT): ANN-MLP; ANN-RBF; SVM-Poly; SVM-RBF; DT-C5.0 Найточніші результати показали обидва варіанти штучних нейронних мереж, а найменш точні – дерева прийняття рішень [9].

Автори Маркос Р. Мачадо (Marcos R. Machado), Сельма Керрай (Salma Karra), Івальдо Т. де Суза (Ivaldo T. de Sousa) застосували алгоритм машинного навчання LightGBM до прогнозування програм лояльності у фінансовому секторі [10]. У роботі порівнюється точність двох моделей градієнтного бустингу дерев прийняття рішень: GDBoosting та LightGBM. Авторів доводять, що LightGBM – швидший та менш затратний по ресурсам порівняно з іншими алгоритмами дерев прийняття рішень. Тому він має використовуватися більш широко у фінансовій сфері [10].

У іншому дослідженні група авторів, до складу якої входять Марія-Тереза Балестар (Maria Teresa Ballestar), Пілар Грау-Карлес (Pilar Grau-Carles)

та Хорхе Сайнз (Jorge Sainz), побудувала штучну нейронну мережу багаторівневого сприйняття (ANN MLP) для аналізу програми лояльності на європейському сайті кешбеку з 2 мільйонами унікальних користувачів [11].

ANN MLP мережа, архітектура якої зображена на рис. 6, була обрана вченими за здатність ANN MLP мереж до навчання, це дозволило моделювати складні стосунки між залежними і незалежними змінними. Навчання мережі відбувалося методом тренування-тестування-перевірка (training-testing-validation – TTV) [11].

Практичний експеримент підтвердив теоретичні і практичні висновки інших досліджень, чим показав корисність даного методу. Дослідження продемонструвало значну гнучкість і універсальність нейронних мереж для пакетного аналізу даних програм лояльності. Водночас, складність і наукоємність методу ускладнює його практичний потенціал і спонукає вчених шукати простіші методи [11].

**Висновки.** Розглянувши стан досліджень у області систем моделювання програм лояльності можна стверджувати, що єдиного підходу в цій сфері немає. Вчені продовжують працювати над розробкою моделей, методів та алгоритмів, що дозволять проводити точніший аналіз даних програм лояльності.

Список літератури:

1. Панаско, О., Микитенко, Н. Програми лояльності покупців на підприємстві торгівлі: теоретичний та практичний ракурси. *Молодий вчений*. 2022. № 1 (101). С. 233–241. DOI: 10.32839/2304-5809/2022-1-101-48.
2. Соболева-Терещенко О. А., Антонова В. О. Оцінка ефективності маркетингової діяльності в контексті розбудови програм лояльності покупців. *Ефективна економіка*. 2019. № 5. DOI: 10.32702/2307-2105-2019.5.52.
3. Ю. Б. Чаплінський. Підходи до оцінки ефективності програми лояльності. *Вісник Чернівецького торговельно-економічного інституту*. 2020. Вип. II (82). С. 54–65.
4. Singh S. S. and Jain D. C. Measuring Customer Lifetime Value: Models and Analysis. *INSEAD Working Paper*. 2013. No. 2013/27/MKT. DOI: 10.2139/ssrn.2214860.
5. Deliana Y., Rum I.A. Understanding consumer loyalty using neural network. *Polish Journal of Management Studies*. 2017. Vol.16, No.2. DOI: 10.17512/pjms.2017.16.2.05.
6. Agarwal R. Does Loyalty Program Membership Lead to Repeat Purchase: A Demographic Analysis with Customer Profiling and Machine Learning. *Management Dynamics*. 2023. Vol. 23, No. 2, Article 4. DOI: 10.57198/2583-4932.1325.
7. De Cnudde S., Martens D. Loyal to your city? A data mining analysis of a public service loyalty program. *Decision Support Systems*. 2015. Vol. 73. P. 74–84. DOI: 10.1016/j.dss.2015.03.004.
8. Aluri, A., Price, B. S., McIntyre, N. H. Using Machine Learning To Cocreate Value Through Dynamic Customer Engagement In A Brand Loyalty Program. *Journal of Hospitality & Tourism Research*. 2019. Vol. 43 (1). P. 78–100. DOI: 10.1177/1096348017753521.
9. Khodabandehlou S., Rahman, M. Z. Comparison of supervised machine learning techniques for customer churn prediction based on analysis of customer behavior. *Journal of Systems and Information Technology*. 2017. Vol. 19, No. 1/2. P. 65–93. DOI: 10.1108/JSIT-10-2016-0061.
10. Machado M. R., Karray S., de Sousa I. T. LightGBM: an Effective Decision Tree Gradient Boosting Method to Predict Customer Loyalty in the Finance Industry. *2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. 2019. DOI: 10.1109/iccse.2019.8845529
11. Ballestar M. T., Grau-Carles P., Sainz J. Predicting customer quality in e-commerce social networks: a machine learning approach. *Review of Managerial Science*. 2018. DOI: 10.1007/s11846-018-0316-x.

**Shubovych I.V., Vakaliuk T.A. THE STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF DEVELOPMENT OF MODELING LOYALTY PROGRAMS**

*The widespread use of consumer loyalty programs in business and the public sector highlights the issue of their modeling, development, evaluation of effectiveness, and optimization. This study has analyzed the state of research in this field in both domestic and foreign scientific literature. The analysis revealed that there are many types of loyalty programs, each with its own advantages and disadvantages, and thus they are applied in specific business contexts. According to the studies reviewed, there is no single method for evaluating the effectiveness of loyalty programs; instead, scholars propose various comprehensive approaches that use economic, communicative, and marketing indicators. An important result of applying loyalty programs is the calculation of marketing indicators of customer lifetime value and the prediction of customer churn. Scientists have developed many models for calculating each of these indicators, which are chosen depending on the type of loyalty program. Among them are statistical models and those based on machine learning methods. Researchers note that some statistical models (such as RFM and NG/NBD) show results with accuracy comparable to machine learning methods but are simpler to implement and faster to compute. In the development and optimization of loyalty programs, there are challenges associated with processing large amounts of user data. Various statistical methods are often used for preliminary data preparation, and a wide range of machine learning methods for data analysis: cluster analysis, decision trees, support vector machines, and artificial neural networks. Each of the specified methods has many implementation variants, each with its own advantages, disadvantages, and specifics that must be considered when applied. Scholars argue that a comprehensive approach using both statistical methods and a combination of machine learning methods allows for the creation of optimal loyalty programs. Some researchers compare the accuracy of different machine learning methods for calculating customer churn prediction and state that artificial neural networks provide the highest accuracy. The development of effective, scientifically based loyalty programs remains a task rich in scientific content.*

**Key words:** loyalty, loyalty program, machine learning, artificial neural network, decision tree, support vector machine.

## Відомості про авторів

**Андрющенко Т.Ю.** – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

**Баган Т.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бален С.М.** – Cloud DevOps Engineer, SoftServe

**Бармак О.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету

**Бережна О.Б.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

**Бешлей М.І.** – доктор технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Бешлей П.І.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Близиюков Д.В.** – науковий співробітник Науково-дослідного гірничорудного інституту Криворізького національного університету

**Близиюкова А.Д.** – студентка кафедри електронних комунікацій та інтернету речей Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бодягін В.Ю.** – студент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Боженко М.І.** – студент 4 курсу за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Бойко Ю.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій Хмельницького національного університету

**Бойков А.І.** – аспірант кафедри кіберспорту та інформаційних технологій Національного університету фізичного виховання і спорту України

**Бойчук А.А.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри обліку і фінансів ПВНЗ «Хмельницький економічний університет»

**Бойчук В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, учитель інформатики Хмельницької загальноосвітньої школи № 14

**Бойчук М.В.** – магістр, програміст EPAM Ukraine

**Бондаренко Д.О.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

**Братчиков В.В.** – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Брич М.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Брунеткін В.О.** – аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Бугаєць П.І.** – студент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

**Бунке О.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бунь В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бурлака Г.Ю.** – аспірант 3 курсу навчання групи ТЗ-01ф кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бишевець Н.Г.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри кіберспорту та інформаційних технологій Національного університету фізичного виховання і спорту України

**Бишовець Н.М.** – магістр за освітньо-науковою програмою «Інформаційні управляючі системи та технології» за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вакалюк Т.А.** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Ветошко І.П.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вислоух С.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Газдюк К.П.** – доктор філософії з інженерії програмного забезпечення, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Грабовський Є.М.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

**Граф М.С.** – доктор філософії, завідувач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Гулієва Д.О.** – кандидат філологічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Давиденко І.Л.** – студент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

**Давидов В.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Дмитрашук К.М.** – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Дубина В.О.** – начальник відділу матеріального забезпечення Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дьячук Т.С.** – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

**Єрохін В.Ф.** – доктор технічних наук, професор, професор спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»

**Жанько К.О.** – аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Жученко А.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Завгородній О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету

**Зима І.В.** – аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Киричук Д.Л.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Киричек Г.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

**Климаш М.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Колодій Т.Б.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Коломоєць С.О.** – аспірант, асистент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Комаров В.О.** – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Комлева Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Кононова І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Корнійчук О.В.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Костинчук О.В.** – магістр кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Кравчук С.О.** – професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Криволапов Г.Я.** – студент факультету інформаційних технологій та математики Київського столичного університету імені Бориса Грінченка

**Криволапов Я.В.** – асистент кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Кулінченко Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

**Кучеренко О.І.** – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка»

**Лагута В.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Автоматика та телекомунікації» Українського державного університету науки і технологій

**Левкін А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, кібернетики та захисту інформації Державного біотехнологічного університету

**Левкін Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету

**Левковський О.В.** – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

**Легеза В.П.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лісовець С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Ляшенко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Малюга А.І.** – здобувач кафедри інженерії програмного забезпечення Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Манзюк Е.А.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету

**Маріяш Ю.І.** – доктор філософії, асистент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Марчук Д.К.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Масюк А.Р.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Матошин О.В.** – студент другого курсу групи ПБ-21мн кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мельничук Б.П.** – магістр кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мрак В.Б.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Мустафаєв О.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Надсяєв К.О.** – магістр кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нефьодова І.В.** – кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Української інженерно-педагогічної академії

**Нешадим О.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нічепорук А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій Хмельницького національного університету

**Новіков В.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних комунікацій та інтернету речей Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Омецинська Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Панич А.О.** – асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

**Положанко С.А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Продеус М.С.** – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій Хмельницького національного університету

**Прокоф'єв А.Ю.** – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Путятін Р.О.** – студент 5 курсу кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пфайфер В.В.** – магістрант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Пятін І.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент відділення комп'ютерної інженерії Хмельницького політехнічного фахового коледжу Національного університету «Львівська політехніка»

**Радзівілов Г.Д.** – кандидат технічних наук, професор, заступник начальника інституту з наукової роботи Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Романов О.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій, інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сайко В.Г.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Селюченко М.О.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Солодовник В.І.** – доктор філософії, доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Степанець О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тарновецька О.Ю.** – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Тельпіс Р.Ф.** – магістр кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Тимошенко Л.С.** – старший викладач кафедри «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій

**Тихонов М.В.** – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Толстова А.В.** – аспірант науково-організаційного відділу науково-дослідного центру Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тягунова М.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

**Ушакова І.О.** – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

**Фомін М.М.** – доктор філософії, начальник кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Фролова М.Е.** – старший викладач кафедри філософії, політології та українознавства Херсонського національного технічного університету

**Фуртат С.О.** – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Хорошевська І.О.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

**Хорошевський О.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри медіасистем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки

**Чикунів П.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія»

**Шевченко В.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шкрябець В.І.** – магістрант кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

**Шубович І.В.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»



## НОТАТКИ

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 35 (74) № 1 2024**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 31,48. Ум. друк. арк. 38,36. Зам. № 0324/181

Підписано до друку 28.12.2023. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

Е-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.