

**МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ
КОНФЕРЕНЦІЙ ЧОРНОМОРСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ**
№ 2(1), 6 серія 2026

**Матеріали XXIII Міжнародної наукової конференції
«ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ – 2026: стратегії країн
Причорноморського регіону в геополітичному просторі»**

29 червня – 04 липня 2026 р., м. Миколаїв, Україна

СЕРІЇ: ДИЗАЙН, КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

Заснований у 2025 році

Виходить 2 рази на рік



Миколаїв-2026

Засновано у 2025 році. Виходить 2 рази на рік.

Засновник і видавець:

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Голова редакційної ради:

Леонід Клименко – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор, в.о. ректора університету, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

Заступники голови:

Юрій Котляр – доктор історичних наук, професор, перший проректор, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Роман Дінжос – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Володимир Ємельянов – доктор наук з державного управління, заслужений діяч науки і техніки України, професор, директор Навчально-наукового інституту публічного управління та адміністрування, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

Члени редакційної ради:

Світлана Белінська – доктор економічних наук, професор, декан факультету економічних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Анжела Бойко – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, декан факультету комп'ютерних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Віталій Вербицький – кандидат історичних наук, доцент, в.о. декана факультету фізичного виховання і спорту, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Олена Кузнецова – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри соціальної роботи, управління і педагогіки, в.о. директора Навчально-наукового медичного інституту, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Ганна Норд – доктор економічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту післядипломної освіти, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Дмитро Січко – кандидат юридичних наук, доцент, декан юридичного факультету, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Анастасія Хмель – кандидат історичних наук, доцент, декан факультету політичних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Людмила Шерстюк – кандидат педагогічних наук, доцент, в.о. декана факультету філології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

**Свідоцтво про реєстрацію
друкованого засобу
масової інформації:**
Серія, номер R30-05946
від 27.03.2025 року

**Конференція
зареєстрована в
УкрІНТЕІ**

№535 від 24.06.2026 р.

*Рекомендовано до друку та
поширення мережею
рішенням Вченої ради ЧНУ
№ 7 від 29.06.2026 р.*

Мови видання:
українська, англійська,
мови ЄС

Електронна версія:
<https://mspc.mk.ua>

Адреса редакції:
м. Миколаїв,
вул. 68 Десантників, 10,
54003
Тел.: 8 (0512) 76-55-99,
8 (0512) 76-55-81.
факс 50-00-69, 50-03-33
E-mail: rvv@chmnu.edu.ua

М 32 Матеріали науково-практичних конференцій Чорноморського національного університету імені Петра Могили. Серія: Дизайн, Комп'ютерні технології : Ольвійський форум – 2026 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі : XXIII міжнар. наук. конф. 29 черв. – 04 лип. 2026 р., м. Миколаїв : матеріали конф. / М-во освіти і науки України ; ЧНУ імені Петра Могили. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2026. – № 2 (1) , 6 серія – 156 с.

УДК 004+3+62+7/9]:001.891](477)(06)

**MATERIALS OF THE SCIENTIFIC
AND PRACTICAL CONFERENCE
OF PETRO MOHYLA BLACK SEA
NATIONAL UNIVERSITY**

№ 2(1), Series 6, 2026

**Materials of the XXIII International Scientific Conference
«Olbia Forum – 2026: strategies of the countries of the
Black Sea region in the geopolitical space»**

June 29 – July 04, 2026, Mykolaiv, Ukraine

SERIES: DESIGN, COMPUTER TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC COLLECTION

Founded in 2025

Published 2 times a year



Mykolaiv-2026

Founded in 2025. It is published 2 times a year.

Founder and publisher:

Petro Mohyla Black Sea National University

EDITORIAL COUNCIL

Chairman of the Editorial Board:

Leonid Klymenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor, Acting Rector of the University, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

Deputy Chairmen:

Yurii Kotliar - Doctor of History, Professor, First Vice-Rector, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Roman Dinzhos - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Volodymyr Yemelianov - Doctor of Science in Public Administration, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor, Director of the Educational and Research Institute of Public Administration and Management, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

Members of the Editorial Board:

Svitlana Belinska - Doctor of Economics, Professor, Dean of the Faculty of Economics, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Anzhela Boyko - PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Dean of the Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Vitalii Verbytskyi - PhD in History, Associate Professor, Acting Dean of the Faculty of Physical Education and Sports, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Olena Kuznetsova - PhD in Pedagogy, Associate Professor of the Department of Social Work, Management and Pedagogy, Acting Director of the Educational and Research Medical Institute, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Hanna Nord - Doctor of Economics, Professor, Director of the Educational and Research Institute of Postgraduate Education, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Dmytro Sichko - PhD in Law, Associate Professor, Dean of the Faculty of Law, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Anastasiia Khmel - PhD in History, Associate Professor, Dean of the Faculty of Political Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Liudmyla Sherstiuk - PhD in Pedagogy, Associate Professor, Acting Dean of the Faculty of Philology, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

The conference is registered in
the catalog of international
conferences in Academic
Resource Index / Research Bib.



The conference is registered in
UkrNTI
№535 dated June 24, 2026.

**Identifier in the Register of
Subjects in the Media Sector:**
R30-05946 (Decision of the
National Council of Ukraine on
Television and Radio
Broadcasting No. 656 dated
March 27, 2025).

*Recommended for publication by
the decision of the Academic
Council of Petro Mohyla Black
Sea National University
(protocol № 7, 29.06.2026).*

Languages of the publication:
Ukrainian, English,
EU languages

Electronic version:
[//mspc.mk.ua](https://mspc.mk.ua)

Editorial address:
Mykolaiv,
10 Desantnykov St., 68, 54003
tel.: 8 (0512) 76-55-99,
8 (0512) 76-55-81.
fax: 50-00-69, 50-03-33
e-mail: rvv@chmnu.edu.ua

M 32 Materials of scientific and practical conferences of Petro Mohyla Black Sea National University. Series : Design, Computer technologies : Olbia Forum – 2026 : strategies of the countries of the Black Sea region in the geopolitical space : XXIII int. scientific conf. June 29 – July 04, 2026, Mykolaiv : scientific col. / Ministry of Education and Science of Ukraine ; Petro Mohyla Black Sea National University. – Mykolaiv : Publishing house of Petro Mohyla Black Sea National University, 2026. – № 2 (1), Series 6 – 156 p.

UDC 004+3+62+7/9]:001.891](477)(06)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
СЕРІЇ: ДИЗАЙН, КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Головний редактор:

Анжела Бойко кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри дизайну, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Заступники головного редактора:

Ірина Журавська доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Олександр Трунов доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Члени редакційної колегії:

Генадій Чуйко доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Юрій Одробінський кандидат мистецтвознавства, доцент, завідувач кафедри дизайну, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Олена Тригуб доктор філософії, старший викладач кафедри дизайну факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Олег Прищепов кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Олег Щесюк кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Відповідальний секретар:

Катерина Обухова старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

EDITORIAL BOARD
SERIES: DESIGN, COMPUTER TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief:

Anzhela Boiko PhD. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Deputy editors-in-chief:

Iryna Zhuravska DSc (Techn.), Professor, Head of the Computer Engineering Department of Petro Mohyla Black Sea

Oleksandr Trunov Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Members of the editorial board:

Henadii Chuiko Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Yurii Odobinskyi PhD in Art Studies, Associate Professor of the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Olena Tryhub PhD, Senior Lecturer, Department of Design, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Oleh Pryshchepov PhD, Associate Professor of Automation and Computer-Integrated Technologies Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine

Oleh Shchesiuk PhD, Associate Professor of Automation and Computer-Integrated Technologies Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine

Executive Secretary:

Kateryna Obukhova Senior Lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National

ЗМІСТ

ДИЗАЙН.....	12
Валерій Атланов ЦИФРОВИЙ РЕНЕСАНС: ЕТИКО-ХУДОЖНІЙ ВИМІР ТВОРЧОГО ПРОЦЕСУ В СУЧАСНОМУ ГРАФІЧНОМУ ДИЗАЙНІ	13
Анжела Бойко ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ОЦИФРУВАННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ.....	17
Юрій Корнюков МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАФІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГРАФІЧНОМУ ДИЗАЙНІ.....	21
Юрій Макушин, Віктор Макушин ПЕРСПЕКТИВИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ У СУЧАСНІЙ СКУЛЬПТУРІ	25
Юрій Одробінський, Анастасія Опришко ВІЗУАЛЬНА МОВА НАСТІЛЬНОЇ ГРИ ЯК ЧИННИК ФОРМУВАННЯ ІМЕРСИВНОГО ДОСВІДУ ТА КОГНІТИВНОЇ РЕЦЕПЦІЇ КОРИСТУВАЧА	28
Олена Тригуб, Анастасія Пожиган ОСОБЛИВОСТІ КОМПОЗИЦІЇ ТА ЗАСОБІВ ХУДОЖНЬОЇ ВИРАЗНОСТІ У СТВОРЕННІ КОМІКСУ ЯК ГРАФІЧНО-ОПОВІДАЛЬНОГО ЖАНРУ	32
КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	36
Роберт Айрапетян, Альона Швед ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ ІГРОВОГО КОНТЕНТУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ НАСТІЛЬНИХ ІГОР	37
Юрій Афонін, Андрій Яковішин, Володимир Савінов КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПОЄДНАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ РОЇВ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ.....	41
Іван Бурлаченко ОСОБЛИВОСТІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЖЕСТІВ НА БАЗІ ESP32.....	45
Віктор Волков, Ірина Журавська МЕТОД ЛОКАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖЕВИХ ІНЦИДЕНТІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ STS	50

Денис Гончаров, Ігор Кандиба ПОРІВНЯННЯ МОНОЛІТНОЇ ТА БАГАТОРІВНЕВОЇ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ	54
Галина Киричек, Марія Тягунова, Дмитро Карнаух СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ЯК ОБ'ЄКТ НАУКОВОЇ НОВИЗНИ	58
Юрій Молодожон, Валерій Ситніков МОДЕЛІ ОПЕРАТИВНОГО ТЕЛЕМЕТРИЧНОГО ОБМІНУ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ У LORA MESH МЕРЕЖАХ НА БАЗІ MESHTASTIC В УМОВАХ GNSS-DEGRADATION	62
Катерина Обухова МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ РУХОМИХ БАГАТОЯДЕРНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ	66
Олег Прищепов, Володимир Шенкевич, Максим Данилюк УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛА АВАРІЙНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В УМОВАХ ЧНУ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ	70
Сергій Пузирьов МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАСШТАБУВАННЯ МІКРОСЕРВІСНИХ АРХІТЕКТУР НА ОСНОВІ ХМАРНИХ РІШЕНЬ	74
Борис Салтовський СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ЗМІНИ В ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ ПРИМІЩЕННЯ	78
Микола Сіделєв, Олександр Поздняков, Богдан Гінжол ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЮ ЕНЕРГЕТИКОЮ	82
В'ячеслав Старченко ВЕЛИКІ МОВНІ МОДЕЛІ ТА СЕМАНТИЧНІ МЕРЕЖІ У ІОТ: ГІБРИДНИЙ НЕЙРОСЕМАНТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗНАНЬ	88
Євген Тенета, Валерій Ситніков КОНТЕКСТНА ОБ'ЄКТИВІЗАЦІЯ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ПОДІЙ У МЕРЕЖЕВІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ	94
Олексій Тогоєв ЛОКАЛІЗАЦІЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У WIFI-МЕРЕЖАХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	97
Олександр Трунов, Володимир Герасимюк АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ	100
Олександр Трунов, Юрій Дмитров ПРІОРИТЕТНЕ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ЧОВНИКОВИХ ЗАСОБІВ У СКЛАДСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ	105
Олександр Трунов, Олександр Поздняков КОНЦЕПТУАЛЬНІ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ І ЕЛЕМЕНТІВ УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕВАТОРА	110

Олександр Трунов, Антон Савчук ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРАВИЛ UI/UX ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ AI-МОДЕЛЕЙ МОНІТОРИНГУ АСК РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	115
Олександр Трунов, Олексій Сільвейстров РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ВІДДАЛЕННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПОСТІНФАРТНИХ ПАЦІЄНТІВ.....	119
Євгеній Худолій, Євген Дарнапук ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО КРОС-ДОМЕННІЙ ВЕРИФІКАЦІЇ ІДЕНТИЧНОСТІ В УМОВАХ НУЛЬОВОЇ ДОВІРИ У ГЕТЕРОГЕННИХ БАГАТОХМАРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	124
Дмитро Чередниченко, Євген Дарнапук МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ СТРЕСОВОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОТ-СИСТЕМИ НА БАЗІ ESP8266 V3.0 CH340.....	128
Гліб Чернигін АВТОМАТИЗАЦІЯ НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА БІЛА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПОЛЬОТНИХ ЛОГІВ.....	132
Геннадій Чуйко, Євген Дарнапук, Поліна Кравченко УКРАЇНСЬКА КВАНТОВА ОСВІТА В ГЛОБАЛЬНОМУ КОНТЕКСТІ.....	136
Альона Швед ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В АНАЛІЗІ РИЗИКІВ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ.....	140
Віктор Шевченко, Євген Дарнапук ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ PACS-СИСТЕМИ ДЛЯ ОБМІНУ DICOM- ЗОБРАЖЕННЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ RASPBERRY PI 4	144
Олег Щесюк, Аркадій Драмарецький, Вячеслав Андрєєв АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОМПЛЕКСОМ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ І СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	148
Yaroslav Krainyk HLS IMPLEMENTATION OF THE QOI COMPRESSION FOR FPGA	153

CONTENTS

DESIGN.....	12
Valerii Atlanov DIGITAL RENAISSANCE: ETHICAL AND ARTISTIC DIMENSION OF THE CREATIVE PROCESS IN MODERN GRAPHIC DESIGN	13
Anzhela Boiko THE APPLICATION OF 3D DIGITISATION TECHNOLOGIES FOR THE PRESERVATION AND RESEARCH OF CULTURAL HERITAGE.....	17
Yuriy Kornukov METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE USE OF DIGITAL PHOTOGRAPHY AND COMPUTER TECHNOLOGIES IN GRAPHIC DESIGN	21
Yuri Makushyn, Victor Makushyn PROSPECTS OF 3D MODELING IN CONTEMPORARY SCULPTURE.....	25
Yurij Odrobinsky, Anastasiia Opryshko VISUAL LANGUAGE OF BOARD GAMES AS A FACTOR IN FORMING IMMERSIVE EXPERIENCE AND USER COGNITIVE RECEPTION	28
Olena Tryhub, Anastasiia Pozhyhan PECULIARITIES OF COMPOSITION AND ARTISTIC EXPRESSIVE MEANS IN CREATING COMICS AS A GRAPHIC NARRATIVE GENRE	32
COMPUTER TECHNOLOGIES	36
Robert Airapetian, Alyona Shved HYBRID APPROACH TO GENERATING CONTENT FOR PERSONALIZED BOARD GAMES	37
Yurii Afonin, Andrii Yakovishyn, Volodymyr Savinov CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF INTEGRATING HETEROGENEOUS UNMANNED VEHICLE SWARMS AND MACHINE LEARNING FOR HUMANITARIAN DEMINING TASKS.....	41
Ivan Burlachenko FEATURES OF MULTI-AGENT SYSTEMS FOR GESTURE RECOGNITION BASED ON THE ESP32	45
Viktor Volkov, Iryna Zhuravska METHOD FOR LOCALIZING NETWORK INCIDENTS BASED ON THE STS MODEL	50

Denys Honcharov, Ihor Kandyba COMPARISON OF MONOLITHIC AND MULTI-TIER ARCHITECTURES OF HUMAN HEALTH MONITORING SYSTEMS	54
Halyna Kyrychek, Mariia Tiahunova, Dmytro Karnaukh SENSOR NETWORKS AS AN OBJECT OF SCIENTIFIC NOVELTY	58
Yurii Molodozhon, Valerii Sytnikov MODELS OF OPERATIONAL TELEMETRY EXCHANGE FOR MOBILE PLATFORMS IN MESHTASTIC-BASED LORA MESH NETWORKS UNDER GNSS-DEGRADED CONDITIONS	62
Kateryna Obukhova METHODS AND MEANS OF MONITORING MOBILE MULTICORE COMPUTER SYSTEMS	66
Oleg Pryshchepov, Volodymyr Shenkevych, Maksym Danyiuk HEAT UTILIZATION OF EMERGENCY DIESEL GENERATOR IN THE CONDITIONS OF THE PETRO MOHYLA BLACK SEA NATIONAL UNIVERSITY	70
Serhii Puzyrov METHODS AND TOOLS FOR SCALING MICROSERVICE ARCHITECTURES BASED ON CLOUD SOLUTIONS	74
Borys Saltovskiy REMOTE NOTIFICATION SYSTEM FOR CHANGES IN PREMISES POWER SUPPLY	78
Mykola Sidelev, Oleksandr Pozdniakov, Bohdan Hinzul DESIGN OF THE ELECTRICAL PART OF THE AUTOMATED RENEWABLE ENERGY CONTROL SYSTEM	82
Viacheslav Starchenko LARGE LANGUAGE MODELS AND SEMANTIC NETWORKS: A HYBRID NEUROSEMANTIC APPROACH TO KNOWLEDGE REPRESENTATION	88
Yevhen Teneta, Valerii Sytnikov CONTEXTUAL OBJECTIFICATION OF INTERRELATED TELEMETRIC EVENTS IN NETWORK INFRASTRUCTURE	94
Oleksii Tohoiev REAL-TIME LOCALIZATION OF MOVING OBJECTS IN WI-FI NETWORKS	97
Alexander Trunov, Volodymyr Herasymiuk AUTOMATED SYSTEMS FOR LASER MANUFACTURING OF PARTS FROM SHEET MATERIAL	100
Alexander Trunov, Yuriy Dimitrov PRIORITY CONTROL OF SHUTTLE FLOWS IN A WAREHOUSE TRANSPORT SYSTEM	105
Alexander Trunov, Oleksandr Pozdnyakov CONCEPTUAL AND MATHEMATICAL MODELS OF PROCESSES AND ELEMENTS OF THE GENERALIZED STRUCTURE OF THE ELEVATOR	110

Alexander Trunov, Anthon Savchuk FORMALIZATION OF UI/UX RULES AS FUNCTIONAL CONSTRAINTS FOR AI-MODEL MONITORING OF ASK	115
Alexander Trunov, Oleksiy Silvestrov DEVELOPMENT OF REMOTE RECOVERY TOOLS FOR POST-INFARTHARTORATE PATIENTS	119
Yevhenii Khudolii, Yevhen Darnapuk COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURAL APPROACHES TO CROSS-DOMAIN IDENTITY VERIFICATION UNDER ZERO TRUST IN HETEROGENEOUS MULTI-CLOUD ENVIRONMENTS	124
Dmytro Cherednychenko, Yevhen Darnapuk METHODS FOR ASSESSING STRESS STATE USING ESP8266 V3.0 CH340-BASED IoT SYSTEM	128
Hlib Chernyhin AUTOMATION OF UAV PID CONTROLLER TUNING BASED ON FLIGHT LOG ANALYSIS	132
Gennady Chuiko, Yevhen Darnapuk, Polina Kravchenko UKRAINIAN QUANTUM EDUCATION IN THE GLOBAL CONTEXT	136
Alyona Shved APPLICATION OF SCENARIO MODELING METHODS IN SOFTWARE RISKS ANALYSIS	140
Viktor Shevchenko, Yevhen Darnapuk DESIGN OF A DISTRIBUTED PACS SYSTEM FOR DICOM IMAGE EXCHANGE USING RASPBERRY PI 4	144
Oleg Shchesiuk, Arkadiy Dramaretskiy, Viacheslav Andrieiev AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A DIESEL GENERATOR SET AND SOLAR POWER PLANT	148
Yaroslav Krainyk HLS IMPLEMENTATION OF THE QOI COMPRESSION FOR FPGA	153

Розділ ДИЗАЙН

Section DESIGN

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.01

Валерій Атланов

ЦИФРОВИЙ РЕНЕСАНС: ЕТИКО-ХУДОЖНІЙ ВИМІР ТВОРЧОГО ПРОЦЕСУ В СУЧАСНОМУ ГРАФІЧНОМУ ДИЗАЙНІ

Аналіз Цифрового ренесансу та трансформації творчого процесу дизайнера в умовах автоматизації індустрії. Окреслено перспективи розвитку галузі через формування феномену універсального медіа-автора.

Ключові слова: Цифровий ренесанс, графічний дизайн, штучний інтелект, творчий процес, етика, медіа-автор.

Вступ та актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку постіндустріального суспільства та глобального медіапростору ознаменований тектонічним соціокультурним зсувом, який у межах цього дослідження детермінується як «Цифровий ренесанс». Це глобальне явище характеризується тотальною автоматизацією та делегуванням рутинних інтелектуальних, аналітичних та техніко-виконавчих процесів алгоритмам штучного інтелекту й нейромережевим системам.

Сутність Цифрового ренесансу як глобального явища: історико-філософські паралелі.

Застосування метафоричного терміну «Ренесанс» (Відродження) щодо сучасних цифрових трансформацій є науково обґрунтованим, оскільки нинішні соціокультурні та художні процеси демонструють фундаментальну, структурну аналогію з епохою європейського Ренесансу XV–XVI століть. Щоб глибше зрозуміти сутність Цифрового ренесансу, необхідно ретельно експлікувати ці паралелі через призму діяльності найвідоміших діячів тої епохи, як, наприклад, Леонардо да Вінчі, та зіставити їх із сьогоденням за кількома визначальними векторами.

Подолання цехової рутини та нівелювання «технічного рабства». У часи, що передували класичному Ренесансу (епоха Середньовіччя), художній процес підпорядковувався суворим цеховим канонам та жорсткій ремісничій рутині. Митець тривалий час функціонував як безіменний виконавець, чия валідність визначалася виключно роками механічного освоєння технології змішування фарб, підготовки поверхонь чи лінійної копіювання релігійних образів за готовими зразками. Творчість була скута складністю самого ремесла.

Класичне Відродження здійснило перехід від ремісничого копіювання до інтелектуального проектування. Леонардо да Вінчі у своїх трактатах неухильно наголошував, що «живопис – це сліпе ремесло, якщо він не керується науковою теорією», підкреслюючи пріоритет інтелектуального замислу над механічним виконанням.

У XXI столітті ми спостерігаємо ідентичний тектонічний зсув. Донедавна сфера графічного дизайну перебувала у своєрідному «технічному рабстві» у складного комп'ютерного софту. Дизайнер витрачав до 80% робочого часу на операційну рутину: виснажливе виділення контурів, технічне малювання текстур, лінійну верстку макетів та механічну синонімізацію елементів. Професійна майстерність часто підмінялася простим умінням швидко натискати комбінації клавіш та орієнтуватися в інтерфейсах.

Сучасний Цифровий ренесанс, озброєний генеративним штучним інтелектом та нейромережами дифузійного типу, повністю руйнує цю ремісничу монополію. ШІ нівелює операційний бар'єр, беручи на себе всю технічну рутину продакшну за лічені секунди. Як наслідок, чисте технічне виконання девальвується, звільняючи простір для чистої художньої стратегії, подібно до того, як гуманісти Ренесансу звільнили мистецтво від середньовічних цехових обмежень.

Еволюція до Антропоцентризму 2.0 та концепція «Артдиректора смислів». Головним досягненням епохи, в яку творив Леонардо да Вінчі, став перехід від теоцентризму до антропоцентризму – повернення людини, її особистості, інтелекту та унікального світогляду в центр усесвіту. Творець перестав бути просто інструментом, він став Деміургом.

У контексті Цифрового ренесансу ми фіксуємо появу «Антропоцентризму 2.0». Оскільки автоматизовані системи здатні згенерувати бездоганний за формою візуальний продукт в один клік, сама по собі «ідеальна картинка» миттєво втрачає художню цінність через свою масовість і доступність. У цих нових умовах єдиним джерелом справжньої унікальності знову стає Людина.

Роль сучасного графічного дизайнера зазнає радикальної мутації: він еволюціонує з позиції «технічного виконавця» (оператора інструменту) до статусу Мислителя, Філософа та Артдиректора смислів. Творчий акт тепер починається не з механічного руху рукою, а з глибокого ментального проектування – формулювання складної художньої метафори, лінгвістичного моделювання концепту (промтінгу) та критичного аналізу семантичних зв'язків. Суб'єктність автора, його емоційний біль, індивідуальний культурний код та ціннісні орієнтири стають головним і єдиним дефіцитним ресурсом у світі, перенасиченому бездушним цифровим генеративним шумом.

Відродження феномену Homo Universalis (Універсальної людини). Леонардо да Вінчі є еталонним уособленням ренесансної концепції Homo Universalis – людини універсальної, яка свідомо ігнорувала штучні кордони між різними дисциплінами. Да Вінчі одночасно розгортав свою діяльність як живописець, анатом, архітектор, військовий інженер, математик та музикант. Для нього наука і мистецтво були єдиним, нерозривним інструментом пізнання та моделювання реальності. Живопис живився знаннями з оптики та геометрії, а інженерні креслення мали бездоганну художню архітектоніку.

Протягом наступних століть індустриальна епоха змусила людство піти шляхом вузької, глибокої спеціалізації, роз'єднавши гуманітаріїв та техніків. Проте Цифровий ренесанс радикально повертає нас до ідеалів універсалізму Леонардо, але на базі новітніх цифрових екосистем.

Сучасні діджитал-інструменти стирають міждисциплінарні бар'єри. Сьогодні графічний дизайнер, завдяки ШІ-асистуванню та інтеграції софту, більше не запертий у межах двовимірного статичного аркуша. Він отримує можливість діяти як універсальний медіа-автор:

1. Проектувати складні тривимірні простори й запікати PBR-текстури у Blender чи 3ds Max;
2. Інтегрувати створені графічні образи в інтерактивні ігрові рушії Unreal Engine;
3. Паралельно вибудовувати UI/UX-сітки у Figma, писати програмний код за допомогою ШІ-асистентів та створювати наскрізні маркетингові стратегії сторітелінгу для SMM.

Це і є сучасне втілення Homo Universalis – коли одна творча особистість, керуючи потужним цифровим інструментарієм як продовженням власного розуму, здатна самотужки замінити роботу цілих креативних агенцій та студій, реалізуючи масштабні мультиплатформні проекти від філософської ідеї до фінального технічного релізу.

Новий технологічний злам: Екологія та Етика творчого процесу. Насамкінець, Ренесанс Леонардо да Вінчі супроводжувався появою друкарського верстата Йоганна Гутенберга, що викликало паніку серед тогочасних переписувачів книг та сприймалося як загроза автентичності культури. Проте цей злам не знищив мислення, а масштабував його, породивши нову епоху Просвітництва.

Сучасна поява генеративного ШІ викликає аналогічний тектонічний опір та етичну паніку в академічних та художніх колах. Цифровий ренесанс ставить перед нами жорсткі аксіологічні виклики: де межа між технологічним плагіатом (генеративною мімікрією під мистецтво) та легітимною, синергетичною колаборацією людини з ШІ?

Сутність Цифрового ренесансу полягає в осмисленні цієї кризи та формуванні нової етики цифрової творчості. Технологія штучного інтелекту має детермінуватися не як заміник художника, а як новітній інтелектуальний пензель, цифровий когнітивний партнер. Епоха Цифрового ренесансу доводить: хоч якими б досконалими були алгоритми генерації, архітектором сенсів, суб'єктом етичної відповідальності та джерелом живої художньої емоції залишається виключно Людина, що повністю відповідає гуманістичним ідеалам Відродження.

Ретельний аналіз проявів тенденції в сучасному графічному дизайні. В індустрії візуальних комунікацій та графічного дизайну це явище розгортається найяскравіше, докорінно трансформуючи традиційну структуру проектування. Впровадження генеративних систем не скасовує творчий процес, а радикально переформатовує його етапи, зміщуючи фокус із ремісничої виконавської майстерності на інтелектуально-концептуальну аналітику:

1. *Когнітивно-семантичний етап (Пре-продакшн).* Традиційний етап ескізування, тривалого пошуку аналогів та створення мудбордів трансформується у процес високоточного лінгвістичного моделювання (промт-дизайну). Креативна діяльність тепер починається не з механічного малювання олівцем, а з формулювання концептів. Дизайнер має перекласти художню метафору, колористику, закони композиції та стилістику на мову чітких алгоритмічних запитів. ШІ на цьому етапі виступає як надшвидкий генератор варіативності, що дозволяє миттєво протестувати десятки композиційних ідей та колористичних схем, суттєво звужуючи час на пошук візуального вектора.

2. *Синергетичний етап (Продакшн).* Безпосереднє створення візуального контенту перетворюється на інтерактивний діалог художника з дифузійними моделями штучного інтелекту. Роль дизайнера еволюціонує до «Артдиректора смислів». Критерієм майстерності стає не вміння механічно відмалювати складний об'єкт руками,

а експертна селекція, художня деконструкція, комбінування та курування згенерованих 3D-пластів. Автор утримує монополію на фінальний композиційний контроль, інтеграцію шрифтових гарнітур та загальну архітектоніку макета.

3. *Технічно-адаптивний етап (Пост-продакшн)*. Завдяки автоматизації рутинного технічного експорту, масштабування, підготовки до препресу чи оптимізації графіки, дизайнер отримує можливість миттєво інтегрувати створений візуальний артефакт у суміжні цифрові середовища. Творчий процес графічного дизайнера більше не замикається на статичній площині аркуша чи банера. Він розширюється у веб-середовище через UI/UX-сітки, у тривимірний простір через створення та запікання текстур для 3D-моделей у Blender чи 3ds Max, та у гейм-індустрію через інтерактивні рушії. Технології дозволяють графічному образу бути динамічним, адаптивним та інтерактивним.

Для наочності деконструкції та перерозподілу часових ресурсів дизайнера в умовах нової парадигми, наведемо порівняльну структуру часових витрат на проектування (Таблиця 1).

Таблиця 1.

Часовий розподіл етапів творчого процесу в графічному дизайні

Етап проектування	Традиційний підхід (% часу)	Модель Цифрового ренесансу (% часу)
Когнітивно-семантичний (Пре-продакшн)	20%	50%
Синергетичний продакшн (Виконання)	60%	20%
Пост-продакшн та адаптація середовищ	20%	30%

Окреслення перспектив розвитку тенденцій. Розглядаючи перспективи зазначеної тенденції, слід чітко розмежувати вектор розвитку безпосередньо в дизайні та в інших інтелектуальних сферах.

В *індустрії графічного дизайну* очікується неминуче пересичення глобального медіапростору семантично порожнім нейромережним шумом. Це спровокує закономірну реакцію суспільства – виникнення гострого дефіциту та підвищення цензу «людського сліду» (автентичності, недосконалої живої емоції, глибокого культурного коду). Зникнення технічних бар'єрів призведе до появи «супер-авторів» – універсальних медіамитців, здатних самостійно реалізовувати наскрізні мультимедійні проекти (від ідеї та філософського тексту до 3D-моделювання та маркетингової стратегії). Відповідно, вища освіта повністю відмовиться від репродуктивного навчання (навчання інтерфейсам софту) на користь креативного лабораторного менторства, де викладач виступає Майстром, що вчить формулювати надскладні художні концепції.

В *інших інтелектуальних сферах* (текстова аналітика, лінгвістика, маркетинг та академічна наука) рутинна компіляція та первинний збір даних також повністю перейдуть до алгоритмів. Перспективою тут є глобальний перехід фахівців до стратегічного проектування смислових архітектур. У науково-педагогічному середовищі сформується нова етика, яка чітко розмежує деструктивний генеративний плагіат (імітацію науки) від легітимного синергетичного співавторства людини з ШІ, де вчений зберігає абсолютну монополію на висування гіпотез та філософську інтерпретацію результатів.

Висновки. Підсумовуючи, можна стверджувати, що Цифровий ренесанс не знаменує собою кризи або занепад антропогенної творчості, а навпаки – постає етапом її емансипації від технічної рутини. У сучасному графічному дизайні генеративні системи штучного інтелекту мають розглядатися не як заміник художника, а як потужне інтелектуальне подовження рук митця, комплементарний інструмент нового покоління. При цьому єдиним автентичним джерелом художнього смислу, архітектором ціннісних орієнтирів та єдиним суб'єктом етичної відповідальності залишається виключно Людина.

References

1. Атланов В. Prompt engineering: ключова компетенція сучасного дизайнера. Матеріали науково-практичних конференцій Чорноморського національного університету імені Петра Могили. 2025. DOI: <https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.06.01>.
2. Liu, Y., Chilton, L. B., & Pirolli, P. (2022). Design recommendations for prompt engineering in natural language processing. arXiv preprint arXiv:2203.00824.
3. Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Patel, R., ... & Amodei, D. (2020). Language models are fewshot learners. Advances in neural information processing systems, 33, 1877-1901.

4. White, J., Fu, Q., Hays, S., Kissin, M., Scialom, T., Stashchuk, S., ... & Genzel, I. (2023). A Prompt Engineering Guide for LLMs. arXiv preprint arXiv:2310.03757.
5. Jain, A. (2023). Prompt Engineering for Beginners: Learn to create ChatGPT prompts that generate amazing results. Apress.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.01

Valerii Atlanov

**DIGITAL RENAISSANCE: ETHICAL AND ARTISTIC DIMENSION OF THE CREATIVE PROCESS IN
MODERN GRAPHIC DESIGN**

Analysis of the Digital Renaissance and the transformation of the designer's creative process under the conditions of industry automation. The prospects for the industry's development through the formation of the universal media author phenomenon are outlined.

Key words: Digital Renaissance, graphic design, artificial intelligence, creative process, ethics, media author.

Відомості про автора / Information about the Author

Валерій Атланов, магістр дизайну, викладач ВПУ-21 міста Миколаєва, викладач кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: valery.atlanov@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2514-2200>.

Valerii Atlanov, Master of Design, Lecturer at VPU-21 of Mykolaiv, Lecturer at the Department of Design of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: valery.atlanov@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2514-2200>.

© В. Атланов

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ОЦИФРУВАННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

У роботі розглянуто сучасні підходи до використання технологій тривимірного (3D) оцифрування для збереження, дослідження та популяризації об'єктів культурної спадщини. Проаналізовано основні методи створення цифрових 3D-моделей, зокрема лазерне сканування, фотограмметрію та технології структурованого світла. Визначено основні етапи процесу 3D-оцифрування археологічних об'єктів, що включають збір даних, обробку хмари точок, побудову полігональної моделі та текстурування. Особливу увагу приділено проблемам стандартизації цифрових даних культурної спадщини та забезпеченню сумісності різних форматів 3D-моделей. Обґрунтовано значення використання цифрових технологій для створення віртуальних музеїв, цифрових архівів та освітніх ресурсів. Зроблено висновок, що застосування технологій 3D-оцифрування сприяє збереженню культурних цінностей, розширенню можливостей наукових досліджень та підвищенню доступності культурної спадщини для широкої аудиторії.

Ключові слова: культурна спадщина, 3D-оцифрування, фотограмметрія, лазерне сканування, цифрові архіви, віртуальні музеї.

Збереження культурної спадщини є одним із важливих завдань сучасної науки та суспільства. Археологічні артефакти, історичні пам'ятки та музейні експонати потребують ефективних методів документування, дослідження та популяризації. У зв'язку з активним розвитком цифрових технологій дедалі більшого поширення набувають методи тривимірного (3D) оцифрування, що дозволяють створювати точні цифрові копії об'єктів культурної спадщини.

3D-моделювання забезпечує можливість не лише візуалізації об'єктів, а й їх детального наукового аналізу, збереження інформації про форму та структуру об'єктів, а також створення цифрових архівів культурних пам'яток. Використання таких технологій особливо важливе для археології, музеєзнавства та реставрації, оскільки дозволяє проводити дослідження без безпосереднього контакту з оригінальними об'єктами.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до 3D-оцифрування об'єктів культурної спадщини, дослідження технологічних методів створення цифрових моделей та визначення перспектив їх використання у сфері збереження і популяризації історико-культурних цінностей.

Розвиток технологій 3D-оцифрування став можливим завдяки значному зростанню обчислювальних можливостей комп'ютерів та розвитку методів цифрової обробки зображень. Сучасні технології дозволяють отримувати тривимірні моделі з високою точністю, що відкриває широкі можливості для їх застосування у сфері культурної спадщини.

Основними методами 3D-оцифрування культурних об'єктів є лазерне сканування, фотограмметрія, структуроване світло та багатокутне сканування. Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження. Наприклад, лазерне сканування забезпечує високу геометричну точність, тоді як фотограмметрія дозволяє отримувати реалістичні текстури поверхні об'єктів.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на використанні 3D-моделей у віртуальних музеях, які дозволяють демонструвати археологічні знахідки широкій аудиторії незалежно від географічного розташування. У межах цифрових музейних проєктів створюються інтерактивні експозиції, що поєднують 3D-моделі, мультимедійні матеріали та інформаційні ресурси.

Процес створення цифрової тривимірної моделі археологічного об'єкта є складною багатоступеневою процедурою, що передбачає використання спеціалізованого обладнання, програмного забезпечення та методів цифрової обробки даних. Основною метою 3D-оцифрування є отримання високоточної цифрової копії об'єкта, яка зберігає його геометричні параметри, форму, текстуру поверхні та інші важливі характеристики. Такі моделі можуть використовуватися для наукових досліджень, цифрового архівування, реставраційних робіт, а також для створення віртуальних експозицій та освітніх ресурсів.

Процес створення цифрової тривимірної моделі археологічного об'єкта, як правило, складається з кількох основних етапів.

1. Збір даних

Перший етап передбачає отримання первинної інформації про геометрію та поверхню об'єкта. Для цього використовуються різні технології 3D-сканування, серед яких найбільш поширеними є лазерне сканування, фотограмметрія та технології структурованого світла.

Лазерне сканування забезпечує високу точність вимірювання геометричних параметрів об'єкта та дозволяє отримувати детальні просторові дані навіть для складних поверхонь. Фотограмметрія, у свою чергу, базується на аналізі великої кількості цифрових фотографій, зроблених з різних ракурсів, і дозволяє відтворювати не лише форму, а й текстуру об'єкта.

Вибір конкретного методу залежить від розміру об'єкта, складності його геометрії, умов зйомки та необхідної точності цифрової моделі.

2. Попередня обробка даних

Після завершення сканування отримані дані потребують попередньої обробки. На цьому етапі виконується об'єднання різних сканів або фотознімків у єдину координатну систему. У результаті формується так звана хмара точок (point cloud) – набір просторових координат, що описують форму поверхні об'єкта.

Хмара точок може містити значну кількість зайвих або помилкових даних, які виникають через шум вимірювань, відблиски поверхні або інші фактори. Тому на цьому етапі також здійснюється фільтрація даних, видалення артефактів та вирівнювання окремих сканів.

3. Створення полігональної моделі

Наступним етапом є перетворення хмари точок у поверхневу модель. Для цього використовуються спеціальні алгоритми побудови сітки, які формують полігональну модель (mesh). Така модель складається з великої кількості трикутників або інших багатокутників, що утворюють цифрову поверхню об'єкта.

Якість полігональної моделі залежить від щільності хмари точок, точності сканування та параметрів алгоритму реконструкції поверхні. На цьому етапі також можуть виконуватися операції згладжування поверхні, заповнення прогалів у сітці та корекція геометрії моделі.

4. Накладення текстур

Для підвищення реалістичності цифрової моделі використовується текстурування. Цей процес передбачає накладення на поверхню полігональної моделі цифрових зображень, отриманих під час фотозйомки об'єкта.

Текстурування дозволяє відтворити колір, матеріал і дрібні деталі поверхні, які не завжди можуть бути відображені лише за допомогою геометричних даних. У результаті створюється високоякісна візуальна модель, яка максимально точно відтворює вигляд реального об'єкта.

5. Оптимізація та збереження моделі

Завершальним етапом є оптимізація отриманої моделі та її підготовка для подальшого використання. На цьому етапі виконується зменшення кількості полігонів, оптимізація текстур, а також підготовка моделі для експорту у різні формати.

Залежно від сфери застосування можуть створюватися моделі різного рівня деталізації. Наприклад, для наукових досліджень використовуються високодеталізовані моделі з максимальною точністю геометрії, тоді як для веб-візуалізації або інтерактивних презентацій застосовуються спрощені моделі з меншою кількістю полігонів.

Крім того, важливим аспектом є збереження супровідної інформації про процес оцифрування, включаючи параметри сканування, характеристики обладнання та методи обробки даних. Така інформація забезпечує можливість подальшого використання цифрових моделей у наукових дослідженнях.

Таким чином, застосування сучасних методів 3D-оцифрування дозволяє створювати високоточні цифрові копії археологічних об'єктів, які можуть використовуватися для документування, дослідження та збереження культурної спадщини. Використання багаторівневих цифрових моделей забезпечує можливість їх ефективного застосування як у науковій діяльності, так і у музейній практиці та освітніх проєктах.

Незважаючи на активний розвиток технологій 3D-оцифрування, сьогодні залишається низка проблем, пов'язаних із стандартизацією цифрових даних культурної спадщини. Багато дослідників зазначають, що відсутність єдиних стандартів ускладнює інтеграцію цифрових ресурсів, обмін даними між науковими установами та ефективне використання 3D-моделей у дослідницькій і музейній діяльності. Різні наукові центри, музеї та дослідницькі проєкти застосовують власні підходи до процесу оцифрування, що призводить до появи великої кількості несумісних форматів та методик представлення цифрових об'єктів.

Однією з ключових проблем є різноманітність форматів збереження 3D-даних. Сьогодні для збереження цифрових моделей використовуються такі формати, як OBJ, STL, PLY, FBX та інші. Кожен із них має свої технічні особливості, рівень підтримки текстур, метаданих та геометричних параметрів. У результаті моделі, створені в різних програмних середовищах, можуть відображатися некоректно або втрачати частину інформації під час передачі між різними платформами.

Ще однією важливою проблемою є відсутність універсальних критеріїв оцінювання якості 3D-моделей. У різних проєктах використовуються різні параметри оцінки точності, деталізації та реалістичності цифрових

моделей. Це ускладнює порівняння результатів різних досліджень та створює труднощі під час формування єдиних цифрових архівів культурної спадщини.

Суттєві відмінності спостерігаються також у підходах до документування процесу оцифрування. У багатьох випадках інформація про використане обладнання, параметри сканування, умови зйомки або алгоритми обробки даних не фіксується належним чином. Відсутність таких метаданих може знижувати наукову цінність цифрових моделей, оскільки ускладнює перевірку результатів дослідження та повторне відтворення процесу створення моделі.

Крім того, важливою проблемою залишається недостатня інтероперабельність між цифровими платформами, що використовуються музеями, архівами та дослідницькими центрами. Багато систем зберігання та візуалізації 3D-моделей створюються в межах окремих проєктів і не завжди забезпечують можливість інтеграції з іншими цифровими ресурсами. Це обмежує можливості створення спільних міжнародних баз даних культурної спадщини.

Якість створеної 3D-моделі значною мірою залежить від параметрів зйомки, роздільної здатності сканування, характеристик поверхні об'єкта та обраних алгоритмів обробки даних. Навіть незначні зміни у робочому процесі, наприклад різниці у кількості фотографій, освітленні або параметрах реконструкції поверхні, можуть призводити до суттєвих відмінностей у результатах моделювання. Саме тому стандартизація процедур оцифрування є важливою умовою забезпечення високої якості цифрових моделей.

У зв'язку з цим у науковому середовищі все активніше обговорюється необхідність розроблення міжнародних стандартів для 3D-оцифрування культурної спадщини. Такі стандарти повинні визначати вимоги до точності геометричних даних, методів обробки текстур, структури метаданих та форматів збереження цифрових моделей. Їх запровадження сприятиме підвищенню якості цифрових архівів, покращенню сумісності різних систем та розширенню можливостей використання 3D-технологій у наукових дослідженнях, музейній справі та освітній діяльності.

Перспективи використання 3D-технологій

Технології тривимірного оцифрування відкривають широкі можливості для розвитку сучасних підходів до збереження, дослідження та популяризації культурної спадщини. Використання 3D-моделювання дозволяє створювати точні цифрові копії історичних об'єктів, що сприяє їх довготривалому збереженню та забезпечує доступ до культурних ресурсів широкому колу дослідників, фахівців та громадськості.

Одним із найважливіших напрямів застосування 3D-технологій є **створення цифрових архівів культурної спадщини**. Формування електронних баз даних тривимірних моделей археологічних артефактів, історичних пам'яток та музейних експонатів дозволяє забезпечити їх надійне збереження навіть у випадку пошкодження або втрати оригіналів. Особливо актуальним це є в умовах природних катастроф, воєнних конфліктів або інших факторів, що можуть становити загрозу для матеріальних пам'яток культури. Цифрові копії дозволяють зберегти інформацію про форму, структуру та декоративні елементи об'єктів, що має важливе значення для подальших наукових досліджень.

Важливою сферою використання 3D-технологій є **створення віртуальних музеїв та інтерактивних експозицій**. Сучасні цифрові платформи дозволяють представляти тривимірні моделі музейних експонатів у віртуальному середовищі, забезпечуючи можливість їх детального огляду з різних ракурсів. Це значно розширює можливості доступу до культурної спадщини, оскільки відвідувачі можуть ознайомлюватися з експонатами незалежно від їхнього географічного місцезнаходження. Крім того, використання технологій віртуальної та доповненої реальності дозволяє створювати інтерактивні освітні середовища, які сприяють популяризації історико-культурних знань серед широкої аудиторії.

Ще одним перспективним напрямом є використання 3D-моделей у **наукових дослідженнях археологічних та історичних об'єктів**. Тривимірні цифрові моделі дають змогу проводити детальний морфологічний аналіз артефактів, досліджувати особливості їхньої форми, структури та технології виготовлення. Завдяки високій точності цифрових моделей дослідники можуть виконувати вимірювання, порівнювати різні об'єкти між собою та аналізувати їх без необхідності фізичного контакту з оригіналами. Це особливо важливо у випадку крихких або унікальних пам'яток, які потребують спеціальних умов зберігання.

Перспективним є також застосування 3D-технологій у **реставраційній та реконструкційній діяльності**. Цифрові моделі можуть використовуватися для відтворення пошкоджених або втрачених елементів архітектурних пам'яток, скульптур чи археологічних об'єктів. На основі таких моделей можна створювати точні реконструкції історичних споруд або їх окремих фрагментів. Крім того, цифрове моделювання дозволяє прогнозувати результати реставраційних робіт і оцінювати різні варіанти відновлення об'єктів без ризику пошкодження оригіналу.

Важливим напрямом розвитку є **використання 3D-моделей у системах дистанційного доступу до музейних колекцій**. Завдяки цифровим платформам дослідники з різних країн можуть отримувати доступ до тривимірних моделей артефактів, аналізувати їх та використовувати у власних наукових дослідженнях. Такий підхід сприяє розвитку міжнародної наукової співпраці, обміну досвідом та формуванню спільних цифрових ресурсів культурної спадщини.

Крім того, перспективним є поєднання 3D-технологій з іншими цифровими інструментами, зокрема технологіями **штучного інтелекту, машинного навчання та великих даних**. Використання таких методів дозволяє автоматизувати процеси обробки та аналізу 3D-моделей, підвищувати точність реконструкції об'єктів та розширювати можливості їх наукового дослідження. Наприклад, алгоритми штучного інтелекту можуть застосовуватися для автоматичного розпізнавання форм археологічних артефактів або для реконструкції відсутніх фрагментів історичних пам'яток.

Таким чином, використання 3D-технологій у сфері культурної спадщини відкриває нові можливості для збереження, дослідження та популяризації історико-культурних цінностей. Подальший розвиток цифрових технологій, удосконалення методів оцифрування та створення міжнародних цифрових платформ сприятимуть формуванню глобальних інформаційних ресурсів культурної спадщини та підвищенню доступності культурних надбань для суспільства.

Висновки. Технології 3D-оцифрування відіграють важливу роль у збереженні, дослідженні та популяризації культурної спадщини. Сучасні методи сканування та цифрового моделювання дозволяють створювати високоточні тривимірні моделі археологічних об'єктів, які можуть використовуватися у наукових дослідженнях і музейній практиці.

Подальший розвиток цієї галузі потребує вирішення проблем стандартизації цифрових даних, забезпечення сумісності різних платформ та формування єдиних підходів до збереження і використання 3D-моделей культурної спадщини.

References

1. Effective 3D Digitization of Archaeological Objects // Proceedings of the International Conference on Cultural Heritage Digitization. – 2023. – С. 1–8.
2. 3D Digitizing of Cultural Heritage: Methods and Applications // Journal of Cultural Heritage and Digital Technologies. – 2022. – С. 45–53.
3. Standardization of Digitized Heritage and 3D Data Management // International Journal of Digital Heritage. – 2021. – С. 67–75.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.02

Anzhela Boiko

THE APPLICATION OF 3D DIGITISATION TECHNOLOGIES FOR THE PRESERVATION AND RESEARCH OF CULTURAL HERITAGE

This paper examines contemporary approaches to the use of three-dimensional (3D) digitisation technologies for the preservation, study and promotion of cultural heritage sites. It analyses the main methods for creating digital 3D models, including laser scanning, photogrammetry and structured light technologies. The main stages of the 3D digitisation process for archaeological objects are identified, including data collection, point cloud processing, polygonal model construction and texturing. Particular attention is paid to the issues of standardising digital cultural heritage data and ensuring the compatibility of different 3D model formats. The importance of using digital technologies to create virtual museums, digital archives and educational resources is substantiated. It is concluded that the application of 3D digitisation technologies contributes to the preservation of cultural heritage, the expansion of opportunities for scientific research and the increased accessibility of cultural heritage to a wider audience.

Keywords: cultural heritage, 3D digitisation, photogrammetry, laser scanning, digital archives, virtual museums.

Відомості про автора / Information about the Author

Анжела Бойко, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри дизайну, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: anzhela.boiko@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-0453>.

Anzhela Boiko, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: anzhela.boiko@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-0453>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.03

Юрій Корнюков

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАФІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГРАФІЧНОМУ ДИЗАЙНІ

Тези представляють теоретико-методологічний аналіз основ фотографії як різновиду фотомистецтва, виявлення методів та художньо-композиційних можливостей її застосування в процесі створення об'єктів графічного дизайну у синергії з передовими комп'ютерними технологіями (у тому числі ШІ-обробкою та генеративними алгоритмами).

Візуальна культура цифрової фотографії надає нові можливості і технології у графічному дизайні й стимулює переосмислення створення візуального образу через фотомистецтво. Досліджено фотографіку як вид мистецтва, що базується на трансформації фотозображення в графічний художній образ.

Наукове обґрунтування методологічних засад використання цифрової фотографії та комп'ютерних технологій у графічному дизайні дозволяє висвітлити сучасні тенденції розвитку фотографії, вплив цифрового мистецтва на сучасний графічний дизайн та полягає у науково-теоретичному осмисленні стилістичних, методологічних трансформацій фотографії й її похідних в контексті сучасної візуальної культури..

Мета дослідження — осмислити специфіку цифрової фотографії як засобу створення варіативних графічних зображень та виявити методи й художньо-композиційні можливості її використання в процесі створення об'єктів графічного та мультимедійного дизайну.

Ключові слова: фотографія, фотографіка, комп'ютерні технології, композиція, колір, графічний дизайн, реклама, цифрове мистецтво, візуальна культура, цифрові медіа.

У сучасному світі графічний дизайн виступає ключовим інструментом візуальної комунікації.. Його розвиток тісно пов'язаний із цифровими технологіями, які радикально змінили способи створення та розповсюдження зображень. Цифрова фотографія та комп'ютерні засоби обробки стали не лише технічними інструментами, але й методологічними основами нової дизайнерської практики. Фотографія та комп'ютерні технології у графічному дизайні формують сучасну методологічну основу, що поєднує мистецтво, техніку та інновації. Вони не лише розширюють інструментарій дизайнера, а й визначають нові принципи творчості та перспективи розвитку галузі.

1. Теоретичні засади

1. Графічний дизайн як система комунікації: його завдання полягає у створенні візуальних повідомлень, що поєднують естетику та функціональність.

2. Цифрова фотографія: поєднує документальність і художність, забезпечуючи достовірність та емоційний вплив.

3. Комп'ютерні технології: дозволяють інтегрувати фотографію, графіку та текст у єдину композицію.

4. Фотографія у графічному дизайні розглядається як візуально-пластичний засіб, що доповнює традиційні художньо-графічні методи. Теорія базується на синтезі мистецтва та технологій: фотографія стає не лише документальним, а й художнім інструментом, що формує естетику сучасного дизайну.

2. Роль цифрової фотографії

1. Документальність: фотографія зберігає зв'язок із реальністю.

2. Естетика: художні прийоми фотографії формують стиль дизайну.

3. Маніпулятивність: цифрова обробка дозволяє створювати нові смисли.

4. Основний матеріал для реклами, поліграфії, веб-дизайну.

5. Гнучкість: можливість трансформації, редагування, комбінування.

6. Естетика: створення унікальних візуальних образів, що підсилюють комунікацію бренду.

3. Комп'ютерні технології у графічному дизайні

1. Програмне забезпечення: Adobe Photoshop, Illustrator, InDesign, CorelDRAW.

2. Технологічний аспект: аналіз інструментарію неруйнівного редагування (non-destructive editing), роботи з RAW-масивами та використання нейронних мереж для ретуші та стилізації. Це дозволяє прискорити робочий процес (workflow) без втрати авторської автентичності.

3. Тривимірна графіка: 3D-моделювання та візуалізація.

4. Інтерактивні технології: веб-дизайн, мультимедіа, анімація.

5. Алгоритмічні методи: використання штучного інтелекту для генерації зображень.

6. Автоматизація процесів: швидке створення макетів, прототипів, візуалізацій.

7. Інтерактивність: VR/AR-технології, мультимедійні презентації.

4. Методологічні принципи

1. Інтегративність: поєднання фотографії, малюнку та цифрової графіки.

2. Адекватність: відповідність візуальних засобів змісту.

3. Інноваційність: застосування нових технологій.

4. Критичність: усвідомлене ставлення до маніпуляцій та етики.

5. Системність: поєднання традиційних і цифрових засобів, розглядає дизайн як комплекс взаємопов'язаних елементів. Розгляд проєкту як єдиної екосистеми, де фотозображення адаптується під різні формати (web, print, motion) за допомогою автоматизованих сценаріїв.

6. Функціональність: орієнтація на практичні завдання (реклама, брендинг, UI/UX).

7. Технологічність: використання програмного забезпечення для обробки зображень (Adobe Photoshop, Illustrator, 3D-пакети).

8. Креативність: пошук нових форм вираження через експерименти з фотографією та технологіями. Застосування фотомонтажу, колажу, цифрових ефектів для створення нових образів, відкриває нові можливості художнього пошуку.

9. Колористична трансформація: використання комп'ютерних технологій для приведення різнорідних фотоматеріалів до єдиної палітри бренду.

10. Адаптивність: врахування швидких змін у технологічному середовищі.

5. Практичне значення

1. Освітній аспект: формування компетентностей студентів, підготовка майбутніх дизайнерів через інтеграцію фотографії та комп'ютерних технологій у навчальні програми.

2. Професійний аспект: підвищення якості дизайнерських проєктів.

3. Соціальний аспект: вплив на суспільну свідомість.

4. Комунікація: ефективна передача ідей та емоцій через візуальні образи.

5. Економічний аспект: конкурентоспроможність на ринку праці.

6. Індустрія: створення конкурентоспроможних продуктів у рекламі, поліграфії, цифровому маркетингу.

6. Перспективи розвитку

1. Штучний інтелект: автоматична генерація та редагування зображень.

2. Мобільні технології: доступність інструментів для широкої аудиторії, розширення можливостей створення та обробки фото у реальному часі.

3. Етичні виклики: регулювання використання цифрових зображень.

4. AR/VR: інтеграція фотографії у віртуальні середовища.

5. Синтез наук: взаємодія з медіа-мистецтвом, кіберкультурою, інтерактивним дизайном.

Айдентика та реклама є двома фундаментальними стовпами графічного дизайну. Вони використовують схожі інструменти (цифрову фотографію, колір, типографіку).

З урахуванням акценту фотографії в галузі айдентики та реклами, методологічна база стає більш практичною. У цих сферах фотографія перестає бути просто картинкою і стає частиною візуальної мови бренду або інструментом маніпуляції увагою споживача. Ось перелік методологічних основ використання цифрової фотографії у створенні айдентики та реклами.

1. Фотографія як елемент константи бренду (Айдентика)

В айдентичі цифрова фотографія розглядається як інструмент формування унікального стилю. Методологія включає:

1. **Розробку фотостилістики (Photo Styleguide):** Визначення параметрів глибини різкості, ракурсів та освітлення, що стають впізнаваними маркерами бренду.

2. **Комп'ютерну стандартизацію:** Використання пресетів та LUT-таблиць (Look-Up Tables) для забезпечення колористичної єдності фотоконтенту на всіх носіях бренду — від мобільних додатків до магістральних білбордів.

3. **Метод метафоризації:** Трансформація цифрового знімка в абстрактний графічний паттерн або знак за допомогою методів векторизації та програмної стилізації.

2. Технології цифрового синтезу в рекламному дизайні

Реклама вимагає максимальної візуальної переконливості («wow-ефект»), що досягається через:

1. **Фотореалістичне колажування:** Методологія створення гіперреалістичних середовищ шляхом поєднання професійної зйомки з 3D-моделюванням та цифровим живописом.

2. **Dynamic Creative Optimization:** Використання комп'ютерних алгоритмів для автоматичної адаптації фотозображень під різні сегменти аудиторії (автоматична зміна фону, кольору продукту або композиції залежно від контексту показу).

3. **Інтеграція із зображеннями створених комп'ютером:** Методика безшовного поєднання реальних об'єктів (наприклад, фуд-зйомка) з генерованими комп'ютерними ефектами для посилення емоційного впливу.

3. Технологічний інструментарій

Для ефективної реалізації цих завдань методологія передбачає використання:

1. **High-End Retouching:** Глибока ретуш із частотним розкладанням та роботою з об'ємом (Dodge & Burn), що є стандартом для fashion та beauty реклами.

2. **HDR-технологій та панорамного зшивання:** Для створення широкоформатної реклами надвисокої чіткості.

3. **AI-асистування:** Використання неймереж (Generative Fill) для розширення фонів під різні формати рекламних оголошень (наприклад, перехід від горизонтального банера до вертикального сторіз).

Протягом останніх десятиліть у культурно-інформаційному просторі відбулося піднесення фотографії та визнання її одним із найактуальніших видів мистецтва.

За результатами комплексного вивчення теоретичного та практичного світового досвіду розвитку фотографії поглиблено та розширено термінологічну базу, зокрема фотографіки, конкретизовано візуальні засоби художньої виразності (композиції кадру, колірної гармонізації, комп'ютерних спецефектів, стилістики), обґрунтовано їхню екстраполяцію на нові сфери – на цифрове мистецтво та цифрові медіа.

Методологічні основи використання цифрової фотографії та комп'ютерних технологій у графічному дизайні базуються на синтезі мистецтва й інновацій, що забезпечує не лише практичну ефективність, а й відкриває нові горизонти творчості та розвитку галузі візуальної культури. Вони забезпечують баланс між творчістю та технічною компетентністю, створюють нові горизонти комунікації та визначають перспективи розвитку графічного дизайну в умовах цифрової епохи. Ефективність сучасного графічного дизайну залежить не від простого володіння софтом, а від глибинного розуміння природи цифрового зображення та способів його технічної маніпуляції для досягнення конкретних комунікаційних цілей.

References

1. Bill Hurter. The best of Adobe Photoshop. Techniques and images from professional photographers. New York: Published by Amherst Media. (2006). 131 p. Режим доступу : <https://cutt.ly/QwXwHOSY>
2. Derek Lea. Creative Photoshop. Digital illustration and art techniques. New York : Focal Press is an imprint of Elsevier, (2007). 376 p. Режим доступу: <https://cutt.ly/VwXwLGiL>
3. Khramova-Baranova O., Shkrebtii V., Kasian T. Visual culture of photography in art and design. *Culture and Contemporaneity*. (2024). № 26(2). P. 15–21.
4. Chikarkova, M. Yu., Boruk, V. D. (2023) Digital Art: Educational Guide. Kyiv [in Ukrainian]
5. Boris Andresyuk, photographer. Collections. URL: <https://borisandresyuk.com/uk/> (дата звернення: 12.05.2026).

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.03

Yuriy Korniyukov

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE USE OF DIGITAL PHOTOGRAPHY AND COMPUTER TECHNOLOGIES IN GRAPHIC DESIGN

Theses represent a theoretical and methodological analysis of the basics of photography as a type of photo art, the identification of methods and the artistic and compositional possibilities of its use in the process of creating graphic design objects in combination with advanced computer technologies (including AI processing and generative algorithms).

The visual culture of digital photography provides new opportunities and technologies in graphic design and determines the need to rethink the creation of a visual image through photo art. Photography as a form of art, built on the principles of transforming a photo image into a graphic artistic image, is studied.

The scientific substantiation of the methodological principles of the use of digital photography and computer technologies in graphic design provides an opportunity to highlight the current trends in the development of photography, the impact of the development of digital art on modern graphic design, and consists in the scientific and theoretical understanding of stylistic and technological transformations of photography and its derivatives in the context of modern visual culture.

The purpose of the study is to understand the specifics of digital photography as a means of creating variable graphic images, as well as to identify the methods and artistic composition possibilities of its use in the process of creating objects of graphic and multimedia design.

Key words: *photography, photographica, computer technologies, composition, color, graphic design, advertising, digital art, visual culture, digital media.*

Відомості про автора / Information about the Author

Юрій Корнюков, заслужений художник України, старший викладач кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kornyukov.yuriy@chmnu.edu.ua. orcid: <https://orcid.org/0009-0005-3382-8634>.

Yuriy Kornyukov, Honored Artist of Ukraine, Senior Lecturer at the Design Department of the Black Sea National University named after Peter Mohyla, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kornyukov.yuriy@chmnu.edu.ua. orcid: <https://orcid.org/0009-0005-3382-8634>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.04

Юрій Макушин,
Віктор Макушин

ПЕРСПЕКТИВИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ У СУЧАСНІЙ СКУЛЬПТУРІ

У тезах досліджується вплив технологій тривимірного моделювання на розвиток сучасної скульптури. Розглянута проблема необхідності теоретичного осмислення феномену цифрової скульптури, яка стирає межі між віртуальним і реальним світами. Проаналізовано перехід від традиційних методів формотворення до цифрової скульптури, використання адитивних технологій (3D-друку) та станків з ЧПУ для матеріалізації віртуальних об'єктів. Розглянуто перспективи генеративного дизайну, збереження культурної спадщини через 3D-сканування та художнє відтворення об'єктів, які мають історичну та художню цінність, а також філософські та етичні аспекти трансформації авторського процесу. Доведено, що 3D-моделювання не замінює традиційну скульптуру, а розширює її межі, створюючи нові естетичні та технологічні парадигми.

Ключові слова: 3D-моделювання, цифрова скульптура, адитивні технології, 3D-друк, генеративний дизайн, віртуальна реальність, цифрове мистецтво.

Сучасне мистецтво перебуває у стані безперервної трансформації під впливом стрімкого розвитку цифрових технологій. Скульптура, як один із найдавніших видів образотворчого мистецтва, традиційно асоціювалася з фізичною взаємодією митця та матеріалу: глиною, каменем, деревом чи металом. Проте з появою та масовим поширенням технологій 3D-моделювання, просторове мистецтво отримало абсолютно новий інструментарій.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю теоретичного осмислення феномену цифрової скульптури, яка стирає межі між віртуальним і реальним світами. Сьогодні 3D-моделювання використовується не лише як допоміжний засіб для ескізування, але і як повноцінний самостійний медіум. Метою даної роботи є комплексний аналіз перспектив, які відкриває 3D-моделювання для сучасної скульптури, включно з етапами концептуалізації, формотворення, матеріалізації та експонування.

Перехід від традиційних методів до цифрових докорінно змінює методологію роботи скульптора. Програмне забезпечення для тривимірного моделювання можна умовно поділити на кілька категорій, кожна з яких відкриває специфічні можливості:

1. **Полігональне моделювання (Blender, Maya, 3ds Max):** Дозволяє створювати складні геометричні форми шляхом маніпуляції вершинами, ребрами та гранями. Цей підхід ідеальний для створення абстрактних, архітектурних або конструктивних скульптурних форм.

2. **Цифрове ліплення або воксельне моделювання (ZBrush, 3D Coat):** Найбільш наближений до традиційної скульптури метод. Використовуючи графічний планшет, митець «ліпить» об'єкт із віртуальної «цифрової глини», застосовуючи пензлі різного призначення. Це дозволяє досягати безпрецедентного рівня деталізації (мікрорельєф шкіри, текстура тканини тощо), який вкрай важко або неможливо відтворити вручну на етапі ескізу.

3. **САПР та параметричне моделювання (Houdini, Rhinoceros, Fusion 360):** Відкриває шлях до абсолютно точної, математично вивірної скульптури, що є критично важливим для кінетичного мистецтва або монументальних робіт, які вимагають складних інженерних розрахунків.

Крім того, використання технологій віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності (наприклад, програми Tilt Brush або Adobe Medium) дозволяє скульптору буквально «входити» у свій твір на етапі його створення, працюючи у справжньому тривимірному просторі без обмежень гравітації.

Найважливішим етапом у скульптурі є перехід від концепту до фізичного об'єкта. 3D-моделювання у поєднанні із сучасними технологіями виробництва революціонує цей процес.

Адитивні технології (3D-друк): 3D-друк дозволяє створювати об'єкти будь-якої складності шляхом шарового нанесення матеріалу. Для сучасної скульптури це означає здатність реалізовувати «неможливу геометрію» – об'єкти з порожнинами всередині, складні фрактальні структури або сітчасті форми, які неможливо відлити чи висікти традиційними методами. Матеріальна база постійно розширюється: від базових пластиків

(PLA, ABS) і фотополімерних смол, що імітують напівпрозорий мармур, до друку металом (SLS/SLM технології) та екструзії керамічних і бетонних сумішей за допомогою роботизованих рук.

Субтрактивні технології (фрезерування з ЧПУ): Верстати з числовим програмним керуванням дозволяють переносити цифрову модель у традиційні матеріали – камінь, дерево, пінопласт. Сьогодні багато монументальних скульптур створюються так: автор створює цифрову модель, вона масштабується, і роботизована фреза висікає її з мармурової брили. Скульптор на фінальному етапі лише допрацьовує деталі вручну. Це економить роки фізичної праці і мінімізує ризик фатальної помилки при роботі з дорогим матеріалом.

Однією з найцікавіших перспектив використання 3D-моделювання у скульптурі є генеративний та параметричний дизайн. Завдяки алгоритмам і візуальному програмуванню (наприклад, Grasshopper для Rhino), скульптор виступає не стільки творцем конкретної форми, скільки творцем «правил», за якими ця форма розвивається.

Вводячи параметри (вплив гравітації, імітація природного росту, аеродинамічні потоки, звукові хвилі), митець отримує сотні варіацій унікальних скульптурних форм, згенерованих комп'ютером. Цей симбіоз людської креативності та машинної логіки породжує новий напрям – алгоритмічну скульптуру. Вона дозволяє візуалізувати невидимі процеси (наприклад, перетворити сейсмічні дані у фізичний рельєф або надрукувати об'єкт, форма якого визначена алгоритмом росту колонії бактерій).

3D-моделювання відіграє ключову роль у збереженні світової скульптурної спадщини. Завдяки технологіям 3D-сканування та фотограмметрії створюються надточні цифрові двійники (Digital Twins) існуючих пам'яток.

У перспективі сучасної скульптури це дає змогу:

1. **Масштабування:** Легкий перехід від настільної статуетки до монументу. Цифрова модель не втрачає пропорцій при масштабуванні, і її можна розділити на сегменти для зручного виготовлення та транспортування. Але необхідно враховувати, що масштабування 3D-моделі – технічно простий, але критично важливий етап, особливо коли геометрія готується не лише для рендеру, а й для фізичного втілення. Виникають ключові нюанси масштабування в залежності від робочого середовища та кінцевої мети – який буде розмір кінцевого об'єкту, під який матеріал виготовляється 3D-модель і т. ін.

2. **Реставрація:** Відтворення втрачених фрагментів або створення ідеальних копій для експонування в агресивному середовищі просто неба, зберігаючи оригінал у музеї. Поєднання цифрового скульптингу та традиційних технологій кардинально змінює підхід до реставрації. Замість того, щоб ліпити втрачені фрагменти безпосередньо на оригіналі (що несе ризики пошкодження історичного матеріалу), процес повністю переноситься у віртуальне середовище, де геометрія відновлюється з мікронною точністю. Цей робочий процес є особливо ефективним для складної архітектурної ліпнини, медальєрного мистецтва та багатокомпонентних скульптурних композицій. Пошкоджений оригінал переводиться в цифрову форму. Для великих об'єктів використовують фотограмметрію, а для дрібної пластики та рельєфів – високоточні структуровані світлові сканери, які здатні вловити найменшу фактуру матеріалу.

3. **Віртуальні виставки:** Експонування цифрових скульптур у метавсесвітах та онлайн-галереях без фізичної реалізації об'єкта, що усуває географічні бар'єри між митцем і глядачем. Експонування цифрових скульптур у віртуальних просторах (метавсесвітах) кардинально відрізняється від звичайного рендеру. Головний виклик тут – знайти баланс між високою художньою якістю класичних матеріалів та жорсткими технічними обмеженнями браузерних рушіїв (WebGL). Метавсесвіти не здатні обробляти мільйони полігонів із таких програм, як ZBrush. Тож модель необхідно оптимізувати – геометрію та текстури, якщо вони були використані у процесі створення. Щоб ювілейна медаль чи орнамент не втратили мікрорельєф після зменшення полігонажу, уся деталізація з високополігональної (High-poly) моделі переноситься на оптимізовану (Low-poly) у вигляді карти нормалей (Normal Map). Це створює ілюзію об'єму без навантаження на систему. Метавсесвіти використовують стандарт Physically Based Rendering. Експорт у формат *GLTF/GLB* – це універсальний формат для метавсесвітів. Файл з розширенням *.glb* архівує геометрію моделі та всі підключені до неї текстури в один компактний контейнер, готовий до завантаження на платформу.

Впровадження 3D-технологій викликає низку теоретичних дискусій у мистецтвознавчому середовищі. Головне питання – «втрата дотику» (haptic loss). Традиційна скульптура цінується за тактильний зв'язок автора з матеріалом, де відбитки пальців на глині чи слід різця є носіями «аури» твору (за термінологією Вальтера Беняміна).

У цифровому просторі цей фізичний зв'язок розривається. Однак, прихильники цифрової скульптури стверджують, що 3D-моделювання просто переносить «дотик» у ментальну площину: інструментом стає не різець, а інтелект і просторова уява митця. Крім того, виникає питання авторства у випадках використання генеративних алгоритмів та штучного інтелекту для створення 3D-моделей. Це вимагає перегляду парадигми оцінки твору мистецтва, зміщуючи фокус із ремісничої майстерності виконання (яку тепер частково бере на себе машина) на концептуальну глибину та інноваційність форми.

Аналіз перспектив застосування 3D-моделювання у сучасній скульптурі дозволяє зробити наступні висновки:

1. **Технологічна емансипація:** Цифрові інструменти звільняють скульптора від фізичних обмежень матеріалу на етапі пошуку форми, дозволяючи реалізувати найсміливіші концепції.

2. **Оптимізація виробництва:** Поєднання 3D-моделювання з адитивними (3D-друк) та субтрактивними (ЧПУ) технологіями суттєво скорочує час та ресурси, необхідні для матеріалізації монументальних та складних об'єктів.

3. **Нова естетика:** Генеративне програмування та алгоритмічний дизайн формують нову візуальну мову в скульптурі – параметричну естетику, яка базується на математичній гармонії та природних паттернах.

4. **Синтез традицій та інновацій:** 3D-моделювання не є загрозою для класичної скульптури. Найбільш перспективним шляхом розвитку є гібридний підхід, де цифрове проєктування гармонійно поєднується з традиційною ручною доробкою фізичного твору.

Сучасна скульптура, озброєна технологіями 3D-моделювання, стоїть на порозі нового Ренесансу, де єдиним обмеженням для формотворення залишається лише уява митця.

References

1. Smith, R., Free, M. The Great Disruption: Competing and Surviving in the Second Wave of the Industrial Revolution. Thomas Dunne Books, - 240 p., 2016.
2. Dunn, N. Digital Fabrication in Architecture, Art and Design. Laurence King Publishing. - 192 p., 2012.
3. Picon, A. Digital Culture in Architecture: An Introduction for the Design Professions. Birkhäuser Architecture. - 224 p., 2010.
4. Kardashov, M. (2026). Suchasnyi stan formuvannia obrazno-prostorovoi kompetentnosti maibutnikh dyzaineriv u formalnii ta neformalnii osviti [The Current State of Developing the Spatial-Visual Competence of Future Designers in Formal and Non-Formal Education]. *Naukovi innovatsii ta peredovi tekhnolohii – Scientific Innovations and Advanced Technologies*, 2 (54), (pp. 1407-1421) [in Ukrainian]

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.04

*Yuri Makushyn,
Victor Makushyn*

PROSPECTS OF 3D MODELING IN CONTEMPORARY SCULPTURE

This paper investigates the impact of 3D modeling technologies on the development of contemporary sculpture. It addresses the need for a theoretical understanding of the digital sculpture phenomenon, which blurs the boundaries between the virtual and real worlds. The study analyzes the transition from traditional methods of form generation to digital sculpture, as well as the use of additive technologies (3D printing) and CNC machines for the materialization of virtual objects. Furthermore, it examines the prospects of generative design, the preservation of cultural heritage through 3D scanning, and the artistic reproduction of objects holding historical and artistic value, alongside the philosophical and ethical aspects of the transformation of the creative process. It is demonstrated that 3D modeling does not replace traditional sculpture but rather expands its boundaries, establishing new aesthetic and technological paradigms.

Keywords: 3D modeling, digital sculpture, additive technologies, 3D printing, generative design, virtual reality, digital art.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Юрій Макушин, народний художник України, професор кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна.

Yuri Makushyn, People's Artist of Ukraine, Professor at the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine.

Віктор Макушин, заслужений художник України, старший викладач кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: makushyn.viktor@chmnu.edu.ua

Victor Makushyn, Merited Artist of Ukraine, Senior Lecturer at the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. makushyn.viktor@chmnu.edu.ua

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.05

Юрій Одробінський,
Анастасія Опришко

ВІЗУАЛЬНА МОВА НАСТІЛЬНОЇ ГРИ ЯК ЧИННИК ФОРМУВАННЯ ІМЕРСИВНОГО ДОСВІДУ ТА КОГНІТИВНОЇ РЕЦЕПЦІЇ КОРИСТУВАЧА

У роботі здійснено комплексне дослідження ролі графічного дизайну як фундаментального стратегічного інструменту в архітектоніці сучасних настільних ігор. Візуальну комунікацію розглянуто не лише як естетичне оформлення, а як ключовий медіатор ігрової взаємодії, що структурує досвід користувача. У процесі наукового пошуку проаналізовано історичну еволюцію ігрових компонентів – від архаїчних символічних форм до складних візуальних систем ХХІ століття.

На основі компаративного аналізу провідних світових франшиз та актуальних українських проєктів виявлено специфіку впливу дизайну на когнітивну рецепцію правил та глибину емоційної імерсивності гравця. Доведено, що семіотика візуальних образів та ергономічність ігрових елементів безпосередньо детермінують успіх проєкту на ринку.

Окрему увагу приділено обґрунтуванню засад розроблення авторської настільної гри у жанрі фентезі «Морок». У роботі деталізовано процес створення цілісної візуальної ідентичності проєкту, де графічний дизайн гармонійно синтезує структуру гри з її механікою. Результати дослідження підкреслюють трансформацію ролі дизайнера від оформлювача до архітектора ігрового всесвіту.

Ключові слова: графічний дизайн, настільні ігри, візуальна комунікація, ігровий досвід, архітектоніка гри, візуальна ідентичність.

Настільні ігри є однією з найдавніших форм культурної взаємодії та дозвілля. Упродовж століть вони виконували не лише розважальну функцію, але й освітню, соціальну та навіть ритуальну.

У сучасному світі, попри стрімкий розвиток цифрових технологій та відеоігор, настільні ігри переживають період активного відродження. Новітні ігрові набори перетворилися на складні об'єкти візуальної культури та мистецтва. Дизайн у цьому контексті перестає бути лише декоративним доповненням, стаючи фундаментом для формування цілісного користувацького досвіду. Проєктування гри сьогодні вимагає від дизайнера глибинного розуміння психології сприйняття, знання актуальних стилістичних течій та вміння працювати зі складними візуальними метафорами. Це робить тему дослідження дизайну настільних ігор надзвичайно актуальною для мистецтвознавчого аналізу в контексті сучасної візуальної комунікації [1; 2].

Дане дослідження присвячене осмисленню феномену дизайну як ключового чинника творення іммерсивного середовища та специфічного коду комунікації в системі «гравець – віртуальний простір». Основна мета тут простежити генезис візуальної мови ігрової індустрії та виявити кореляцію між художньо-стилістичними рішеннями та афективним сприйняттям твору. Особливий акцент зроблено на вивченні морфології візуальних засобів – від типографічних систем до колористичної семантики, що сукупно детермінують атмосферну цілісність проєкту. Важливим вектором роботи є розгляд дизайну через призму інформаційної естетики, де він постає інструментом впорядкування семіотичного поля гри, сприяючи прецизійному засвоєнню ігрових механік.

Дизайн настільних ігор пройшов шлях від використання необроблених природних матеріалів до створення розгалужених візуальних екосистем. У давнину ігрові об'єкти поставали як артефакти з амбівалентною природою, поєднуючи утилітарність із глибоким художнім символізмом. Витоки ігрового дизайну демонструють синкретичний зв'язок між механікою гри та її фізичним втіленням, обмеженим технологічним інструментарієм епохи. Визначні пам'ятки ігрової культури, як «Сенет» чи «Гра Ура», демонструють домінування теоцентричного підходу в оформленні ігрових поверхонь. Декорування полів ієрогліфічними структурами та рельєфним різьбленням трансформувало ігровий процес на метафору трансцендентної подорожі. Графічна семіотика поля, де кожна клітинка виступає як окремий візуальний локус, диктувала правила пересування, гармонізуючи елемент

випадковості з іконографічним змістом. Таким чином, давні ігри репрезентують ранній досвід естетизації інтелектуальних конструктів через художню організацію матеріального простору [3].

Антична та середньовічна ігрова культура демонструє перехід дизайну до активного відображення соціальних та військових структур. Розвиток шахової традиції спричинив необхідність чіткої семіотичної виразності ігрових компонентів. Художнє оформлення ігор цього часу тяжіє до ювелірної деталізації, де фігури постають як мініатюрні скульптурні композиції, що маркують престижне споживання. Геометрична впорядкованість ігрового простору забезпечувала когнітивну легкість у реалізації тактичних маневрів. Важливою інновацією стала ергономіка сприйняття, де візуальні характеристики об'єктів безпосередньо корелювали з їхніми механічними ролями в системі гри. Винахід друку та впровадження паперових носіїв кардинально розширили іконографію настільних ігор. Дизайн почав виконувати роль візуального медіатора, де ілюстративні цикли, виконані за канонами тогочасної графіки, створювали ефект імерсивності, занурюючи суб'єкта в ідеологічний та сюжетний простір твору [4].

Вивчення феноменології настільних ігор як синкретичного явища, що поєднує візуальну культуру, дизайн та ігрові механіки, перебуває у центрі уваги широкого кола вітчизняних і закордонних дослідників. У контексті української гуманітаристики особливої ваги набувають розвідки М. Нестелєєва, присвячені соціокультурним аспектам функціонування настільних ігор у національному просторі, а також праці О. Заблоцької, котра здійснює системний аналіз еволюції видавничих стратегій у даному сегменті. На загальноосвітньому рівні теоретичним фундаментом слугує концепція Йогана Гейзинга, який обґрунтував логічну природу культурогенезу. Сучасний вектор досліджень, спрямований на деконструкцію ігрових систем та гейм-дизайну, репрезентований фундаментальними працями Еріка Циммермана та Кеті Сален, які розглядають гру як складну комунікативну структуру. [5; 6; 7].

Для ідентифікації підходів до візуалізації ігрового середовища було проведено порівняльний аналіз знакових світових та вітчизняних аналогів за критеріями стилістики та функціональності (табл. 1).

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз дизайну настільних ігор

Назва гри	Країна	Ключова особливість дизайну	Функція візуальної комунікації
Dungeons & Dragons	США	Деталізовані ілюстрації, складна іконографіка	Створення епічного всесвіту та занурення в роль
Catan	Німеччина	Функціональний мінімалізм, модульність компонентів	Чітке структурування інформації та легкість правил
This War of Mine	Польща	Монохромна палітра, фотореалістичний стиль	Формування емоційної напруги та драми
Острів котів	Україна	Насичена колористика, висока якість поліграфії	Естетичне задоволення та привабливість компонентів
Козацький похід	Україна	Етно-стилістика, національні символи	Кодування культурних метафор та історії
Dune: Imperium	США	Кінематографічний UI-дизайн, баланс ресурсів	Забезпечення інтуїтивно зрозумілого геймплею

Компаративний аналіз вищезазначених кейсів свідчить про виразну диференціацію стратегій, де закордонна практика тяжіє до вибудовування масштабованих мультимодальних франшиз із пріоритетом на тактильну преміальність матеріалів. Натомість вітчизняний досвід демонструє акцент на автентичності візуальної мови та експлікації локальних культурних кодів. Результати порівняння верифікують тезу, що для створення нового дизайну настільних ігор слід сконцентрувати увагу на конвергенцією глобальних стандартів когнітивної ергономіки та глибинної імерсивності. У даному контексті дизайн буде презентувати суто декоративну функцію, перебираючи на себе архітектонічну роль у конструюванні цілісної онтології ігрового всесвіту.

Сучасний етап розвитку індустрії характеризується міждисциплінарним підходом до проєктування. Дизайн визначається як комплексний інструмент, що поєднує в собі ілюстрацію, UI/UX принципи, промисловий дизайн та брендинг. Візуальна комунікація стає першою точкою контакту між гравцем і грою. Використання специфічних колірних палітр та шрифтових гарнітур дозволяє миттєво ідентифікувати жанр гри. Дизайнер виступає архітектором віртуального простору, де кожен графічний елемент – від сорочки карти до шрифту в книзі правил, повинен працювати на підтримку єдиної художньої концепції.

Особливого значення дизайн набуває у пригодницьких іграх, де занурення в атмосферу є критичним. Аналіз відомих світових та українських зразків свідчить, що успіх проєкту часто залежить від цілісності візуальної

концепції. У межах проектування авторської гри «Морок» дизайн розглядається як інструмент передачі містичного настрою та таємничості. Концепція проекту базується на використанні художніх особливостей стилю фентезі, що включає специфічну символіку, готичну типографіку та контрастне світлотіньове рішення форм. Вибір стилістики фентезі дозволяє експериментувати з ірреальними образами, використовуючи сюрреалістичні прийоми та складні колірні переходи, що підсилюють відчуття занурення у вигаданий світ [8; 9].

Процес розроблення настільної гри «Морок» включає ґрунтовну аналітичну роботу, спрямовану на виявлення закономірностей у сприйнятті містичного контенту сучасною аудиторією. Це дозволяє структурувати візуальні вектори розвитку бренду, враховуючи глобальні макротренди у дизайні. Наприклад, поєднання містичних архетипів із сучасною мінімалістичною графікою створює унікальний візуальний конфлікт, який привертає увагу.

Важливою складовою є також технологічний етап, що включає підготовку макетів до друку з урахуванням особливостей кольоропередачі та вибору матеріалів, що мають забезпечувати не лише візуальний, а й тактильний комфорт під час гри.

Крім того, результати дослідження вказують на необхідність врахування ергономічних аспектів у дизайні настільних ігор. Чіткість іконографіки та логічність розміщення інформаційних блоків безпосередньо впливають на динаміку гри. У проєкті «Морок» ці питання вирішуються через створення збалансованої композиційної сітки та вибір шрифтів, що мають високий ступінь читабельності. Таким чином, комплексне поєднання художнього образу та функціональності дозволяє створити продукт, що відповідає сучасним вимогам дизайну та очікуванням гравців.

Проведене дослідження верифікує статус графічного дизайну як засадничого інструментарію в архітектоніці сучасних настільних ігор. Дизайн трансформувався з суто декоративного атрибута у фундаментальний структуротворчий чинник ігрового досвіду, що забезпечує ефективну когнітивну рецепцію правил та імєрсивність нарративу. Ретроспективний аналіз еволюції ігрових елементів у синергії з моніторингом актуального ринку доводить, що успішна реалізація проєкту детермінується цілісністю візуальної стилістики та ергономічністю компонентів. У сучасному соціокультурному контексті дизайн постає імпліцитним медіатором, що структурує навігацію користувача в межах ігрового всесвіту.

На прикладі розробки гри «Морок» проаналізовано, що використання стилістики фентезі дозволяє створити унікальну містичну атмосферу. Продумане поєднання художніх образів та принципів читабельності допомагає не лише залучити аудиторію, а й зробити ігровий процес інтуїтивно зрозумілим. Послідовне втілення художньої ідеї та якісна підготовка макетів до друку є запорукою створення професійного продукту, здатного успішно конкурувати на ринку.

Вектор подальшої еволюції індустрії настільних ігор детермінується впровадженням інноваційних парадигм візуальної репрезентації, де постать дизайнера трансформується у ключового архітектора ігрового простору. Перспективним напрямом наукових розвідок вбачається поглиблений аналіз психосемантичного впливу колористики та морфології візуальних образів на когнітивні та поведінкові патерни гравців. Такий підхід дозволить не лише оптимізувати ергономіку ігрових компонентів, а й моделювати високоефективні інтерактивні екосистеми з безпрецедентним рівнем естетичної атрактивності та імєрсивності.

References

1. Nestelieiev, M. (2023) Hrailiva natsiia. Yak nastilky (i yaki same) staly popularnymy v Ukraini [Playful nation. How board games (and which ones exactly) became popular in Ukraine]. *Ukrainskyi tyzhden – Ukrainian Week*. URL: <https://tyzhden.ua/hrailiva-natsiia-iak-nastilky-i-yaki-same-staly-popularnymy-v-ukraini/> [in Ukrainian].
2. Zablotska, O. (2024) Shcho zihraty: 9 nastilnykh ihor vid ukrainskykh vydavnytstv, yakshcho vam nabrydla «Monopoliiia» [What to play: 9 board games from Ukrainian publishers if you are tired of "Monopoly"]. *Suspilne Kultura – Suspilne Culture*. URL: <https://suspilne.media/culture/946143-so-zigrati-9-nastilnih-igor-vid-ukrainskih-vidavnytstv-akso-vam-nabrydla-monopolia/> [in Ukrainian].
3. Lord of Boards Istoriia nastilnykh ihor [History of board games]. URL: <https://lordofboards.com.ua/istoriya-nastolnykh-igr/> [in Ukrainian].
4. Geekach (n.d.) Mekhanika nastilnykh ihor – pohliad z seredyny [Board game mechanics – an inside look]. URL: <https://geekach.com.ua/mekhaniki-nastolnykh-igr-vzglyad-iznutri/> [in Ukrainian].
5. Suspilne Kultura (2024) Neofity knyzhkovoi haluzi: 7 molodykh ukrainskykh vydavnytstv rozpovidaiut pro realii svoiei diialnosti [Neophytes of the book industry: 7 young Ukrainian publishers talk about the realities of their activities]. *Suspilne Kultura – Suspilne Culture*. URL: <https://suspilne.media/culture/1218950-neofiti-knizkovoi-galuzi-7-molodih-ukrainskih-vidavnytstv-rozpovidaut-pro-realii-svoei-dialnosti/> [in Ukrainian].

6. Petrushkevych, M.S. *Filosofiia hry* [Philosophy of the game]. *Velyka ukraïnska entsyklopediia – Great Ukrainian Encyclopedia*. URL: https://vue.gov.ua/Філософія_гри [in Ukrainian].
7. Salen, K., & Zimmerman, E. (2003) *Rules of Play: Game Design Fundamentals*. MIT Press. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Rules_of_Play [in English].
8. Dungeons & Dragons. Wikipedia article. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dungeons_%26_Dragons [in English].
9. D&D Beyond. Official Digital Toolset for Dungeons & Dragons. URL: <https://www.dndbeyond.com> [in English].
10. Hasbro Shop. Official Site. URL: <https://shop.hasbro.com/en-us> [in English].

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.05

*Yurij Odrobinsky,
Anastasiia Opryshko*

VISUAL LANGUAGE OF BOARD GAMES AS A FACTOR IN FORMING IMMERSIVE EXPERIENCE AND USER COGNITIVE RECEPTION

The work carries out a comprehensive study of the role of graphic design as a fundamental strategic tool in the architectonics of modern board games. Visual communication is considered not only as an aesthetic design, but as a key mediator of game interaction that structures the user experience. In the process of scientific research, the historical evolution of game components is analyzed - from archaic symbolic forms to complex visual systems of the 21st century.

Based on a comparative analysis of leading global franchises and current Ukrainian projects, the specifics of the influence of design on the cognitive reception of rules and the depth of the player's emotional immersion were revealed. It was proven that the semiotics of visual images and the ergonomics of game elements directly determine the success of the project on the market.

Special attention is paid to the justification of the principles of developing an author's board game in the fantasy genre "Darkness". The work details the process of creating a holistic visual identity of the project, where graphic design harmoniously synthesizes the structure of the game with its mechanics. The results of the study emphasize the transformation of the designer's role from a designer to an architect of the game universe.

Keywords: *graphic design, board games, visual communication, gaming experience, game architecture, visual identity.*

Відомості про автора / Information about the Author

Юрій Одробінський, кандидат мистецтвознавства, доцент, завідувач кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: odrobinsky.family@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8532-5466>

Yurij Odrobinsky, Candidate of Art History, Associate Professor, Head of the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: odrobinsky.family@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8532-5466>

Анастасія Опришко, здобувачка кафедри дизайну Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: opryshkosobaka@gmail.com.

Anastasiia Opryshko, a student of the Design Department of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: opryshkosobaka@gmail.com.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.06

Олена Тригуб,
Анастасія Пожиган

ОСОБЛИВОСТІ КОМПОЗИЦІЇ ТА ЗАСОБІВ ХУДОЖНЬОЇ ВИРАЗНОСТІ У СТВОРЕННІ КОМІКСУ ЯК ГРАФІЧНО-ОПОВІДАЛЬНОГО ЖАНРУ

У роботі досліджуються особливості коміксу як специфічного графічно-оповідального жанру, що синтезує елементи літератури та образотворчого мистецтва. Визначено роль композиційної організації сторінки, зокрема кадрування, масштабування та використання «негативного простору» у створенні наративного ритму. Проаналізовано засоби художньої виразності. Підкреслено, що цілісність коміксу забезпечується через глибоку взаємодію текстуального та образотворчого компонентів, перетворюючи його на складне семіотичне і комунікативне явище у сучасному культурному контексті.

Практична значущість наукової розвідки розкривається на прикладі авторської графічної адаптації фрагмента роману Алессандро Мандзони «Заручені», створеної в межах міжнародного проєкту «Promessi Sposi: Art, Design UA–IT». Аналізується візуалізація психологічного стану головної героїні Лючії через використання великих планів, світлових акцентів та символічних образів. Доведено, що застосування актуального інструментарію цифрового дизайну дозволяє ревіталізувати класичний наратив. Такий синтез традиційної оповіді та інноваційних технологій забезпечує інтенсифікацію когнітивного сприйняття тексту, роблячи морально-етичні сенси твору Мандзони доступними та емоційно близькими сучасному глядачеві.

Ключові слова: комікс, графічно-оповідальний жанр, композиція, художня виразність, візуальний наратив, літературна адаптація.

У сучасному культурному просторі комікс виступає одним із найпопулярніших і найдинамічніших напрямів візуального мистецтва, який поєднує в собі елементи літератури, графічного дизайну, живопису та кіномови. Його особливість полягає у здатності через взаємодію тексту й зображення створювати цілісний художній образ, розкривати складні емоційні стани, ідеї та філософські підтексти доступною й візуально привабливою формою.

Розвиток коміксу як графічно-оповідального жанру пройшов тривалий шлях – від коротких ілюстрованих історій у періодичних виданнях до повноцінних графічних романів, які нині визнаються рівноцінними літературним і кінематографічним творам. У сучасному світі комікси стають не лише формою популярного мистецтва, а й важливим засобом самовираження художників, дизайнерів і сценаристів, які поєднують візуальну мову з глибокими сюжетними концепціями.

Особливого значення сьогодні набуває створення авторських коміксів на основі класичних літературних творів, адже саме такі адаптації дають змогу переосмислити відомі сюжети через призму сучасної візуальної культури. Завдяки цьому класика стає ближчою до сучасного глядача і водночас зберігає свою художню та моральну цінність.

Дослідженню коміксу як особливої форми візуального оповідання, складної семіотичної та наративної системи присвячені наукові праці Р. Дункана [1], М. Сміта [1], П. Левітца [1], В. Айснера [2], Т. Гроенстіна [3] й С. МакКлауда [4].

Метою нашої наукової розвідки є виявлення особливостей побудови композиції коміксів та визначення принципів використання художніх засобів при їх створенні.

У процесі створення коміксу ключову роль відіграє композиційна організація сторінки, адже саме вона визначає ритм оповіді, наративну логіку та емоційний вплив на читача. Візуальна структура коміксу вибудовується за допомогою кадрування, розміщення панелей, масштабування персонажів і використання негативного простору, що дає змогу керувати увагою та швидкістю сприйняття. Композиція в коміксі часто підпорядковується кінематографічним принципам – від загальних планів до крупних, що формують динаміку та акценти всередині сюжету.

Важливим компонентом є послідовність та ритм панелей, які створюють відчуття руху й часу. Автор використовує зміну розмірів та форм кадрів, щоб передати інтенсивність подій: дрібні панелі підсилюють темп і напругу, тоді як великі – надають простору для зосередження на емоціях чи ключових сюжетних моментах. Розриви між кадрами (gutter) виконують функцію візуальних пауз, що дозволяють читачеві домислювати події, формуючи ефект «монтажного переходу».

Суттєве значення має образотворча мова коміксу, яка включає колірну палітру, лінію, штрих, стилізацію та характер персонажів. Колір використовується не лише для естетичного оформлення, а й як інструмент смислового навантаження – він позначає атмосферу, підкреслює емоційні стани й допомагає розмежовувати сюжетні лінії. Лінія та графічний стиль визначають характер візуального нарративу: від реалістичного до експресивного чи мінімалістичного, що впливає на сприйняття теми та настрою твору.

Одним із провідних засобів художньої виразності виступає типографіка та робота з текстом. Діалоги, авторські ремарки та звукові ефекти (ономатопеї) є невід'ємними елементами коміксової мови, що формують єдність між словом і зображенням. Шрифт може змінюватися залежно від емоційної ситуації: деформована літера підсилює відчуття крику, тонка – передає тишу чи напруження. Таким чином, текст перетворюється на активний графічний елемент.

Не менш важливою складовою є характер дизайн-підходу, що поєднує художнє бачення автора з принципами візуальної комунікації. Комікс як графічний продукт потребує чіткої структури, логічної побудови кадрів і продуманого дизайну персонажів. Образний ряд має бути послідовним, легко впізнаваним і єдиним за стилем, що підвищує читабельність і візуальну цілісність твору.

Особливу увагу приділяють взаємодії текстуального та образотворчого компонентів, адже саме їх синтез забезпечує унікальність коміксу як жанру. Візуальна мова оперує символами, метафоричними композиційними рішеннями, акцентним освітленням, повторюваними мотивами, що створюють глибину і дозволяють працювати з підтекстом на рівні, недоступному для традиційного вербального оповідання.

У рамках адаптації класичних літературних творів у комікс важливим стає збереження ідейно-смислового ядра першоджерела при одночасному переосмисленні візуальних образів. Автор має трансформувати сюжет у форму, придатну для графічного сторітелінгу, що передбачає виокремлення ключових сцен, посилення драматургії через візуальні акценти та адаптацію діалогів під новий формат. Це дозволяє відкрити знайомий наратив у новій образній структурі, роблячи його доступним для ширшої аудиторії.

Розгляньмо для прикладу створений нами у межах міжнародного культурно-освітнього проєкту «Promessi Sposi: Art, Design UA–IT» (Україна-Італія) комікс за історичним романом Алессандро Мандзоні «Заручені». Коміксовий фрагмент фокусується на драматичній 21-й главі роману, де Лючія перебуває у полоні в замку Безіменного (Рис. 1).

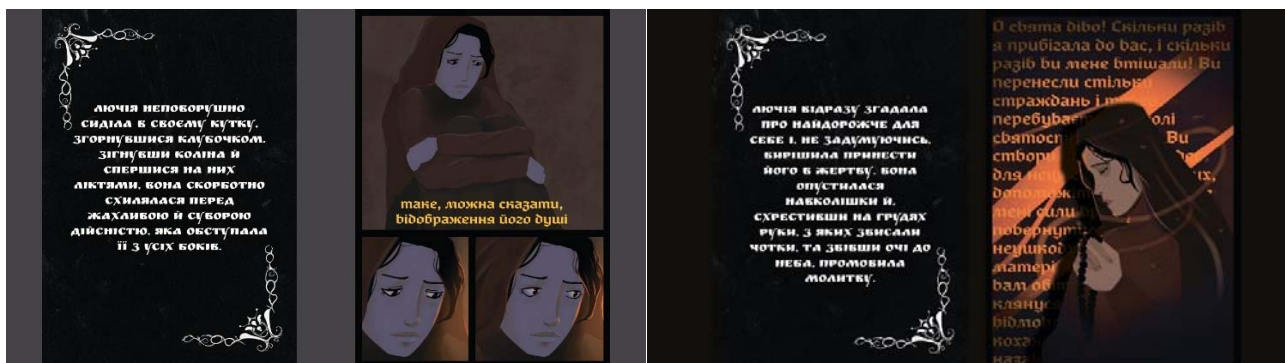


Рис. 1. Коміксовий фрагмент роману А. Мандзоні «Заручені». Сцени відчаю і молитви Лючії

У побудові сторінок використано принцип психологічного кадрування. Візуалізовано внутрішній стан героїні – перехід від відчаю та жаху перед суворою дійсністю до віднайдення надії через молитву. Центральним образом є духовне перетворення Лючії, яка в момент найвищої тривоги вирішує принести в жертву своє кохання заради порятунку. Обличчя Лючії зображено з підкресленою емоційністю; її очі передають страх, втому та, зрештою, смирення. Використання великих планів дозволяє читачеві максимально наблизитися до переживань героїні. Чотки в руках Лючії виступають як композиційний та смисловий центр, що символізує єдиний зв'язок героїні з Богом та надією. Тьмяний вогник каганця, що то з'являється, то зникає, стає метафорою людського життя та віри, що то згасає, то спалахує (Рис. 2).



Рис. 2. Коміксий фрагмент роману А. Мандзоні «Заручені». Образи каганця та чоток

Поєднання текстових блоків, що цитують Мандзоні, з графічними панелями створює ритміку швидкої зміни тривожних думок. Використання чорного фону та витончених графічних віньєток підкреслює атмосферу XVII століття та замкнутого простору в'язниці.

Робота виконана з використанням актуального інструментарію цифрового дизайну. Чіткий контур у поєднанні з м'якою заливкою створює ефект сучасної 2D-анімації. Технічно реалізовані світлові акценти (відблиски від каганця на обличчі Лючії) виконані за допомогою шарів накладання (Overlay/Add) у графічних редакторах, що додає зображенню об'єму. Використано два типи шрифтів: акцидентний гротеск для основних думок та класичний антиквоподібний шрифт для описових фрагментів, що допомагає структурувати наратив (Рис. 3).



Рис. 3. Коміксий фрагмент роману А. Мандзоні «Заручені». Акцидентний гротеск та класичний антиквоподібний шрифт

Відповідно до загальної концепції проєкту, цей коміксий фрагмент розроблений з урахуванням можливості інтеграції в AR-середовище (доповнену реальність). Статичні панелі (наприклад, зображення каганця або чоток) можуть виступати маркерами для запуску анімації або аудіосупроводу молитви Лючії.

Проєкт демонструє поєднання цифрового живопису та класичної верстки. Adobe Photoshop та Procreate використовувалися для створення растрової графіки, детального промальовування емоцій Лючії та роботи зі світловими ефектами. Adobe Illustrator застосовувався для створення чітких графічних віньєток у кутах панелей та обробки лінійної графіки. Adobe InDesign – для фінальної верстки сторінок коміксу, розміщення текстових блоків (баблів) та підготовки макета до експорту у PDF-формат.

Отже, комікс як графічно-оповідальний жанр базується на складній системі композиційних і художньо-виразних засобів, що перетворюють його на повноцінне мистецьке й комунікативне явище. Дослідження цих аспектів дозволяє глибше зрозуміти механізми формування візуальної історії та їх значення в сучасному культурному просторі. Адаптація «Заручених» доводить, що синтез традиційної оповіді та сучасних дизайн-

технологій дозволяє класичному твору не лише зберегти моральну цінність, а й набути нової імерсивної форми, доступної сучасному глядачеві, зокрема через потенційну інтеграцію в AR-середовище.

References

1. Duncan, R., Smith, M. J., & Levitz, P. (2023). *The Power of Comics and Graphic Novels: Culture, Form, and Context*. Bloomsbury.
2. Eisner, W. (1990). *Comics and Sequential Art*. Poorhouse Press.
3. Groensteen, T. (2007). *The System of Comics*. University Press of Mississippi.
4. McCloud, S. (1993). *Understanding Comics: The Invisible Art*. HarperCollins.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.06

Olena Tryhub,
Anastasiia Pozhyhan

PECULIARITIES OF COMPOSITION AND ARTISTIC EXPRESSIVE MEANS IN CREATING COMICS AS A GRAPHIC NARRATIVE GENRE

The paper explores the peculiarities of comics as a specific graphic narrative genre that synthesizes elements of literature and visual arts. The study identifies the role of page composition, specifically framing, scaling, and the use of "negative space", in creating narrative rhythm. The means of artistic expression are analyzed. It is emphasized that the integrity of a comic is ensured through the profound interaction of textual and pictorial components, transforming it into a complex semiotic and communicative phenomenon within the modern cultural context.

*The practical significance of this research is demonstrated through the author's graphic adaptation of an excerpt from Alessandro Manzoni's novel *The Betrothed*, created as part of the international project "Promessi Sposi: Art, Design UA–IT." The paper analyzes the visualization of the protagonist Lucia's psychological state through the use of close-ups, lighting highlights, and symbolic imagery. It is demonstrated that applying contemporary digital design tools allows for the revitalization of classical narrative. This synthesis of traditional storytelling and innovative technologies enhances the cognitive perception of the text, making the moral and ethical meanings of Manzoni's work accessible and emotionally resonant for the modern viewer.*

Keywords: comics, graphic narrative genre, composition, artistic expression, visual narrative, literary adaptation.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олена Тригуб, доктор філософії з професійної освіти, доцент кафедри дизайну факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: e.tryhub82@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0634-4106>.

Olena Tryhub, PhD in Vocational Education, Associate Professor of the Design Department, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: e.tryhub82@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0634-4106>.

Анастасія Пожиган, здобувачка вищої освіти спеціальності Дизайн, кафедра дизайну, факультет комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: nastyaposigan14@gmail.com

Anastasiia Pozhyhan, Design Student, Design Department, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: nastyaposigan14@gmail.com

Розділ
КОМП'ЮТЕРНІ
ТЕХНОЛОГІЇ

Section
COMPUTER
TECHNOLOGIES

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.07

Роберт Айрапетян,
Альона Швед

ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ ІГРОВОГО КОНТЕНТУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ НАСТІЛЬНИХ ІГОР

У тезах розглянуто проблему генерації узгодженого контенту персоналізованих настільних ігор, проаналізовано можливості мовних і дифузійних моделей для формування текстових та візуальних матеріалів. Розглянуто процедурну генерацію і шаблонний підхід як засоби контролю структури гри. Обґрунтовано доцільність поєднання цих методів у межах гібридного підходу. Запропоновано схему формування персоналізованої гри, у якій тематичне та візуальне наповнення створюється на основі визначеної механічної основи й проходить первинну перевірку узгодженості.

Ключові слова: персоналізована настільна гра, генерація ігрового контенту, штучний інтелект, мовна модель, дифузійна модель, гібридний підхід.

Настільні ігри залишаються популярним способом спільного проведення часу. Їх використовують під час дружніх зустрічей, командних подій або навчальних активностей. Окремий інтерес викликають ігри, які створюються для конкретної групи людей. У них можна врахувати бажану тематику, кількість учасників, тривалість партії, ролі та особливості гравців.

Створення такої гри вручну потребує часу. Недостатньо придумати тільки тему або кілька карток. Повноцінна настільна гра має правила, механіку, ігрове поле, набір компонентів і візуальні матеріали. Усі ці частини повинні працювати разом. Якщо в правилах є певний ресурс, він має бути присутнім у картках і на полі. Якщо задано конкретну тематику, вона повинна зберігатися у назвах, описах і візуальному оформленні.

Генеративний штучний інтелект (ШІ) вже давно не виглядає як технологія лише для експериментів. Його використовують там, де раніше вручну формували багато варіантів тексту, зображень або інших елементів для цифрового продукту [1]. У таких задачах добре видно практичну користь цієї технології. Вона прискорює підготовку матеріалів і дає більше варіантів для відбору. Водночас без структури й перевірки генерація може дати матеріал, який виглядає переконливо, але потребує доопрацювання.

Для ігрового контенту ця проблема особливо помітна. Дослідження використання генеративного ШІ у геймдизайні показують, що він добре допомагає під час пошуку ідей, створення початкових варіантів і підготовки візуальних матеріалів. Разом з цим виникають питання контролю, відповідності задуму та цілісності сформованого результату [2]. Користувачу потрібні не випадкові фрагменти правил чи зображень, а гра, яку можна зрозуміти й використати.

Застосування генеративного ШІ у створенні ігор може охоплювати різні етапи роботи. Він може бути корисним під час підготовки ідей, формування текстового наповнення, створення візуальних матеріалів і доопрацювання результату [3]. Проте різні частини гри не можна генерувати однаково. Тематика та опис допускають творчу варіативність. Правила, механіка і структура компонентів потребують більшого контролю.

Метою цього дослідження є визначення підходу, за якого генеративний ШІ може використовуватися для створення персоналізованої настільної гри без втрати зв'язку між її основними матеріалами. Для цього доцільно розглянути мовні й дифузійні моделі та процедурну генерацію, які застосовуються для формування ігрового контенту [4]. Окремо потрібно врахувати шаблонний підхід як спосіб зберегти керовану структуру гри.

Мовні моделі корисні в задачах створення текстової та змістової частини гри. Вони швидко створюють різні варіанти тексту та добре працюють зі стилем або тематикою. Ці моделі можуть формувати ігровий світ, атмосферу, ролі гравців, назви ресурсів, дій, зон, колод і типів карток.

Для персоналізації це має важливе значення. Одна й та сама механічна основа може отримати різне тематичне наповнення. Наприклад, гра зі збиранням ресурсів може бути оформлена як експедиція, космічна місія або детективне розслідування. Мовна модель допомагає швидко підготувати таке оформлення під запит користувача.

Проте згенерований текст ще не можна автоматично вважати готовою грою. Модель може додати дію, якої немає у механіці, використати зайвий ресурс або описати правило, яке не підтримується компонентами. Через це вся гра не повинна визначатися моделлю самостійно. Текстове наповнення потрібно формувати в межах уже підготовленої структури.

Дифузійні моделі для створення настільної гри можуть використовуватися під час створення картинок для карток, окремих ігрових об'єктів, тематичних поверхонь поля та інших матеріалів оформлення. Це дозволяє швидко отримати візуальну частину гри, яка підтримує її тематику.

Водночас не варто покладати всю візуальну частину лише на одну модель. Окреме зображення вона часто створює переконливо. Але серія матеріалів швидко показує слабкі місця. Може змінюватися стиль, губитися призначення елемента, а картинка починає існувати окремо від правил гри.

Наприклад, картка небезпеки повинна мати зображення, яке легко пов'язати з її дією. Ігрове поле повинно залишатися зрозумілим для переміщення та використання компонентів. Красиве зображення саме по собі цього не гарантує. У роботах, присвячених візуальному контенту для ігор, також зазначається, що узгодження зображень із наративом і функціями ігрових елементів залишається складним завданням [5].

Розглянуті моделі дають основу для переходу до методів організації ігрового контенту. Першим таким методом є процедурна генерація. У контексті настільної гри вона може відповідати за кількість раундів, типи дій, структуру карток, основні ресурси, логіку поля, зони та умови завершення партії.

Процедурна логіка не обов'язково створює тематику гри. Її головне завдання полягає у тому, щоб результат мав зрозумілу структуру. Саме вона може визначити, скільки потрібно карток, які дії доступні гравцю та як пов'язані окремі компоненти. Завдяки цьому зменшується ризик отримати матеріали, які виглядають цікаво, але не складаються у працездатну гру.

Такий підхід узгоджується із сучасними дослідженнями процедурної генерації ігрового контенту. Для оцінювання генеративного результату важливими є не лише новизна чи зовнішня привабливість, а також якість, різноманітність і керованість [6]. Для настільної гри це означає, що сформований результат повинен відповідати заданим параметрам, мати логічну структуру та залишатися придатним для проведення партії.

Шаблонний підхід полягає у використанні механічної основи, яка задає загальну будову гри. Це можуть бути типи дій, порядок ходів, ресурси, структура колод або спосіб визначення результату партії. Такий шаблон не створює готову персоналізовану гру, але дає основу, яку можна наповнити новою темою та візуальними матеріалами.

Шаблон не обмежує персоналізацію, а задає рамки, у яких вона стає надійною. Мовна модель може сформувати назви, описи й атмосферу гри. Дифузійна модель може створити зображення для цього змісту. Процедурна логіка стежить за кількістю і структурою елементів. У результаті гра отримує нове оформлення, але не втрачає механічну основу.

Отже, для генерації персоналізованої настільної гри недостатньо використати тільки мовну модель, тільки дифузійну модель або тільки процедурний метод. Мовна модель добре працює зі змістом і тематикою, але не гарантує правильну механіку. Дифузійна модель створює візуальні матеріали, але не контролює їх роль у грі. Процедурна логіка забезпечує структуру, проте сама по собі не дає достатньої тематичної різноманітності.

Гібридний підхід до генерації ігрового контенту – це не просто одночасне використання декількох інструментів. У такому підході кожен метод виконує свою роль. Спочатку визначається механічна основа гри. Далі вона наповнюється тематичним змістом, а потім створюються візуальні матеріали. Загальну схему такого підходу наведено на рис. 1.



Рис. 1. Схема гібридного формування контенту персоналізованої настільної гри

На схемі показано, що генерація починається не з випадкової відповіді моделі, а з параметрів майбутньої гри та її механічної основи. Це дозволяє надалі формувати текстові й візуальні матеріали в одному напрямі. Первинна перевірка потрібна для того, щоб виявити очевидні невідповідності. Наприклад, відсутній компонент або зайвий ресурс.

Сучасні дослідження процедурної генерації ігрового контенту також звертають увагу на необхідність контролю якості та різноманітності результатів [6]. Для настільної гри це має практичне значення. Користувач повинен отримати не набір окремих матеріалів, а гру, в якій тема, правила, картки й візуальна частина не суперечать одне одному.

Разом із цим первинна перевірка не замінює плейтестування. Навіть логічно узгоджена гра може виявитися незбалансованою або не зовсім зрозумілою під час реальної партії. Тому гібридний підхід дозволяє підготувати цілісний початковий результат, а остаточну перевірку ігрового досвіду потрібно виконувати вже із залученням гравців.

Важливо розділяти якість окремого згенерованого матеріалу і якість гри в цілому. Текст картки може бути добре написаний, а зображення – візуально привабливим. Проте цього недостатньо, якщо картка не пов'язана з механікою або не має зрозумілої ролі під час партії. Тому для настільної гри результат потрібно оцінювати не лише за виглядом, а й структурою.

Для гібридного підходу доцільно виділити три основні ознаки придатного результату: відповідність заданим параметрам, узгодженість компонентів і можливість практичного використання. Відповідність означає, що гра зберігає вибрану тематику, формат і особливості персоналізації. Узгодженість передбачає зв'язок між правилами, картками, ресурсами та полем. Практичне використання означає, що сформовані матеріали можна зрозуміти й підготувати до проведення партії.

Окремого контролю потребує співвідношення між варіативністю та передбачуваністю. Якщо результат формується лише за жорстким шаблоном, гра може втратити індивідуальність. Якщо ж усі рішення передати генеративній моделі, зростає ризик суперечностей і випадкових елементів. Саме тому механічна основа повинна залишатися контрольованою, а тема, назви та візуальне оформлення можуть змінюватися.

Отже, гібридний підхід дає змогу розподілити завдання між різними методами не випадково, а відповідно до їх сильних сторін. Генеративні моделі забезпечують різноманітність і персоналізоване наповнення. Процедурна логіка та механічна основа відповідають за цілісність результату.

Висновки. Розглянуто мовні та дифузійні моделі, процедурну генерацію і шаблонний підхід до формування контенту персоналізованих настільних ігор. Мовні моделі доцільно використовувати для тематики й текстового наповнення. Дифузійні моделі можуть створювати візуальні матеріали. Процедурна логіка та механічна основа потрібні для того, щоб зберегти структуру гри і зв'язок між її компонентами. Саме гібридний підхід дає можливість сформувати не набір розрізнених фрагментів, а цілісний ігровий продукт.

References

1. Sengar S. S., Hasan A. B., Kumar S., Carroll F. Generative artificial intelligence: a systematic review and applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2025. Vol. 84. P. 23661-23700. DOI: 10.1007/s11042-024-20016-1.
2. Alharthi S. A. Generative AI in Game Design: Enhancing Creativity or Constraining Innovation? *Journal of Intelligence*. 2025. Vol. 13. Article 60. DOI: 10.3390/jintelligence13060060.
3. Swacha J., Gracel M. Supporting Serious Game Development with Generative Artificial Intelligence: Mapping Solutions to Lifecycle Stages. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Article 11606. DOI: 10.3390/app152111606.
4. Mao X., Yu W., Okawara Y., Zhan X., Yamada K. D., Zielewski M. R. Procedural Content Generation via Generative Artificial Intelligence. *Interdisciplinary Information Sciences*. 2026. Advance View. P. 1–11. DOI: 10.4036/iis.2026.R.01.
5. Chen Y.-C., Jhala A. GameTileNet: A Semantic Dataset for Low-Resolution Game Art in Procedural Content Generation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*. 2025. Vol. 21, № 1. P. 12–21.
6. Khalifa A., Gallotta R., Barthet M., Liapis A., Togelius J., Yannakakis G. N. The Procedural Content Generation Benchmark: An Open-source Testbed for Generative Challenges in Games. *FDG '25 : Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games*, Graz, Austria, April 15–18, 2025. New York : ACM, 2025. 12 p. DOI: 10.1145/3723498.3723794.

HYBRID APPROACH TO GENERATING CONTENT FOR PERSONALIZED BOARD GAMES

This paper examines the problem of generating coherent content for personalized board games and analyses the capabilities of language and diffusion models for creating textual and visual materials. Procedural generation and a template-based approach are considered as means of controlling the game structure. The feasibility of combining these methods within a hybrid approach is substantiated. A scheme for creating a personalized game is proposed, in which thematic and visual content is generated on the basis of a defined mechanical framework and undergoes an initial consistency check.

Keywords: *personalized board game, game content generation, artificial intelligence, language model, diffusion model, hybrid approach*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Альона Швед, д. техн. наук, професорка, професорка кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: avshved@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4372-7472>.

Роберт Айрапетян, здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» факультету комп'ютерних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв. E-mail: rob8026823@gmail.com.

Alyona Shved, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: avshved@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4372-7472>.

Robert Airapetian, Bachelor's degree student in Specialty 121 "Software Engineering", Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine, E-mail: rob8026823@gmail.com.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.08

Юрій Афонін,
Андрій Яковішин,
Володимир Савінов

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПОЄДНАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ РОЇВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Представлено концепцію розподіленої системи, яка об'єднує безпілотні літальні апарати і наземні роботизовані комплекси у гетерогенний рій дронів з алгоритмами машинного навчання для виконання завдань гуманітарного розмінування.

Ключові слова: рої безпілотних апаратів, БпЛА, наземні роботизовані комплекси, машинне навчання, гуманітарне розмінування.

Заміновані території є надзвичайно нагальною проблемою для України (забруднено близько 140 тис. км²). Традиційні методи виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) та їх розмінування передбачають ручну роботу кваліфікованих спеціалістів із використанням металопрошукачів, щупів, саперних «кішок», тощо. Цей процес займає великий обсяг часу і несе підвищену небезпеку для операторів-демінерів.

Враховуючи масштаби забруднення, надзвичайно актуальним постає перехід від ручних засобів до автоматизованих і дистанційно керованих систем на основі безпілотних технологій, штучного інтелекту (ШІ) та сучасних архітектур комп'ютерних мереж.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування роїв безпілотних апаратів для виконання завдань гуманітарного розмінування та представлення концептуальних засад розподіленої системи, що поєднує безпілотні платформи та алгоритми машинного навчання.

Сучасні методи та засоби виявлення і знешкодження ВНП

Для технічного обстеження територій сьогодні активно залучаються безпілотні літальні апарати (БпЛА) та наземні роботизовані комплекси (НРК) [1]. Використання мультиспектральних, гіперспектральних, тепловізійних камер, а також LiDAR-сенсорів, магнітометрів та георадарів (рис. 1) дозволяє виявляти аномалії ґрунту та ідентифікувати ВНП без прямого фізичного контакту. Застосування дистанційно керованих НРК із спеціальними засобами (лопастями, тралями, маніпуляторами) дає змогу знешкоджувати виявлені ВНП з мінімізацією ризиків для операторів.



Рис. 1. Сучасні сенсори, які використовуються для виявлення ВНП

Вирішальну роль у цьому процесі відіграє машинне навчання. Для розпізнавання об'єктів у режимі реального часу (комп'ютерний зір) ефективними є моделі згорткових нейронних мереж (CNN), зокрема сімейство YOLO, для певних завдань також можуть використовуватись моделі архітектури Transformer (ViT, DETR) та новітні мультимодальні моделі (ШІ). Дослідження підтверджують, що використання ШІ для аналізу знімків з дронів може підвищити продуктивність обстеження замінованих територій на понад 800% порівняно з традиційними методами [2].

Варто зазначити, що використання моделей машинного навчання як складової безпілотних апаратів для автономної навігації і виявлення об'єктів не є тривіальним через обмежені технічні можливості (ємність акумуляторів, оперативна пам'ять, пропускна здатність каналів прийому/передачі даних). Найпростішим рішенням є обробка даних із безпілотних апаратів на більш потужних базових і віддалених станціях керування, що в свою чергу вимагає стабільного зв'язку, достатньої швидкості передачі телеметрії та потокових (стримінгових) даних. Однак напрямок «ШІ на борту» (Edge Computing, Edge AI) безпілотних апаратів стає все більш актуальним і затребуваним у дослідженнях [3]. Це неодмінно вплине на розвиток ройових ШІ-рішень у галузі гуманітарного розмінування.

Переваги гетерогенних роїв безпілотних апаратів

У контексті масштабування процесів розмінування доцільним є використання роїв дронів. Рої – динамічні бездротові комп'ютерні мережі (наприклад на основі архітектури FANET із MESH-маршрутизацією), що здатні автономно обмінюватися телеметрією використовуючи спеціальні протоколи (наприклад MAVLink).

Порівняльний аналіз показує вищу ефективність саме гетерогенних мереж порівняно з гомогенними [4]. Такі мережі дозволяють розподілити виконання завдань між різними типами апаратів. На прикладі гуманітарного розмінування такі мережі можуть включати:

1. невеликі FPV-дрони, що ефективні для візуально-оптичного обстеження лісосмуг завдяки маневреності і малим розмірам;
2. великі гекса- або октакоптери здатні нести важке обладнання (наприклад, рамкові магнітometri) для створення карт магнітних аномалій;
3. НРК, що застосовуються безпосередньо для розчищення рослинності або нейтралізації ВНП.

Концепція розподіленої системи на основі гетерогенного рою дронів

Авторами розроблено концептуальну модель системи, головною відмінністю якої є поєднання БпЛА та НРК в єдину гетерогенну мережу із підтримкою зв'язку із базовою та віддаленою станціями керування [5].

Функціонування системи базується на принципі «ситуативної обізнаності» та розподіленні обчислювальних завдань. Завдяки прямому обміну телеметрією, БпЛА з комп'ютерним зором може виявити та класифікувати ВНП, передати його координати наземному комплексу (НРК), а той, у свою чергу, автоматично оновить свій маршрут, щоб безпечно наблизитися до об'єкта або оминати його. При цьому оператор у режимі реального часу може вносити корективи у маршрути та змінювати керування конкретним «агентом» рою за потреби, не ризикуючи при цьому життям.

Переваги запропонованої концепції включають:

1. безпеку для операторів-демінерів завдяки віддаленому/дистанційному керуванню;
2. мультисенсорне виявлення об'єктів за допомогою алгоритмів машинного навчання безпосередньо «на борту» (Edge AI) і на базовій/віддаленій станції;
3. «багатоагентний» режим керування різними типами безпілотних апаратів;
4. можливість резервного інтернет-з'єднання через супутниковий зв'язок (наприклад Starlink) або LTE-зв'язок;
5. розширення радіуса дії рою завдяки ретрансляції сигналів між дронами.

Водночас впровадження таких систем стикається з низкою викликів:

1. обмеженою ємністю акумуляторів, високою вартістю обладнання;
2. технологічною складністю досягнення повної автономності рою;
3. потребою у висококваліфікованих операторах.

На рис. 2 зображено один із потенційних сценаріїв використання різнотипних безпілотних апаратів як гетерогенного рою для виконання завдань із виявлення та знешкодження ВНП.

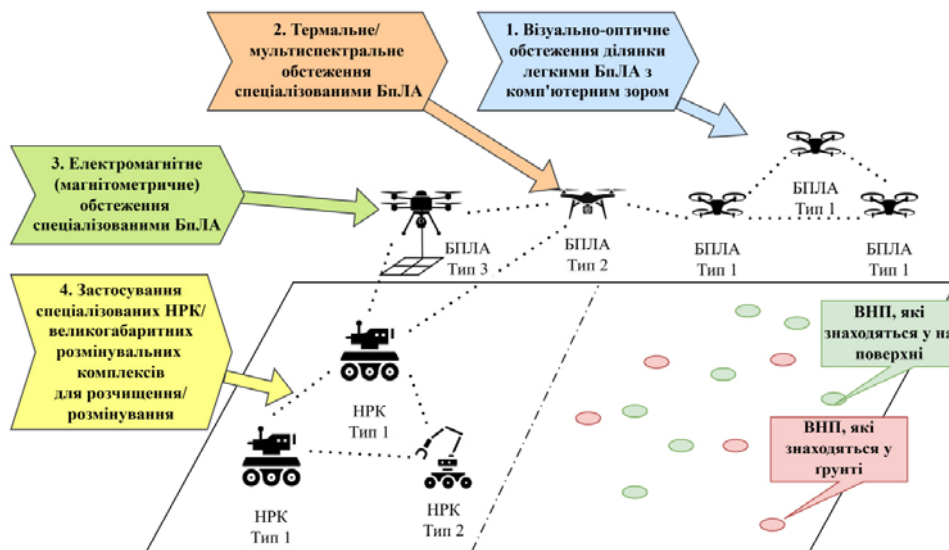


Рис. 2. Взаємодія між БПЛА і НРК у єдиній системі

Безумовно, розмінування вимагає виконання великої кількості специфічних і складних завдань. Кожен БПЛА чи НРК вимагає оснащення спеціалізованими сенсорами відповідно до власного призначення (рис. 3).

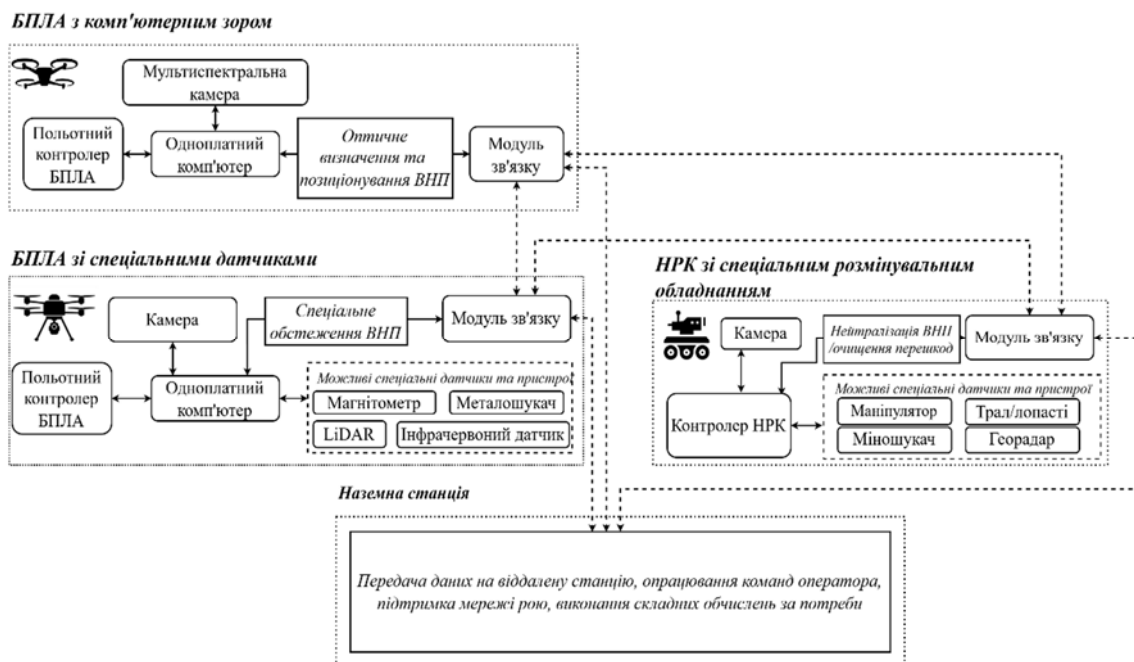


Рис. 3. Структурна схема компонентів різнотипних безпілотних апаратів

Висновки

Інтеграція гетерогенних роїв безпілотних апаратів у поєднанні з алгоритмами машинного навчання є одним із найбільш перспективних шляхів розвитку галузі гуманітарного розмінування. Розподілені системи на базі безпілотних апаратів здатні пришвидшити очищення забруднених територій, мінімізуючи ризики для життя фахівців-демінерів. Подальший розвиток напрямку має бути зосереджений на створенні якісних комбінованих ML-датасетів ВНП для тренування моделей комп'ютерного зору, дослідженні апаратно-програмних рішень і обґрунтування методів застосування роїв дронів із використанням ШІ для виконання завдань розмінування.

References

1. Zatserkovnyi, V., & Nikoliuk, I. (2025). Using UAVs to detect explosives and create maps in humanitarian demining. Technical sciences and technologies, (1 (39)), 328–345. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).
2. Safe Pro's artificial intelligence delivers 800% productivity surge in Ukraine demining surveys according to independent research presented at leading global conference. (2025). Business Wire. <https://surl.lu/stxrvp>.
3. Toma, C., Popa, M., Iancu, B., Doinea, M., Pascu, A., & Ioan-Dutescu, F. (2022). Edge Machine Learning for the Automated Decision and Visual Computing of the Robots, IoT Embedded Devices or UAV-Drones. Electronics, 11(21), 3507. <https://doi.org/10.3390/electronics11213507>.
4. Albrekht, Y., & Pysarenko, A. (2023). Exploring the power of heterogeneous UAV swarms through reinforcement learning. Technology audit and production reserves, 6(2(74)), 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.293063>.
5. Afonin, Yu., & Savinov, V. (2026). Kontseptualna model rozpodilenoї systemy humanitarnoho rozminuvannia na osnovi roiu bezpilotnykh aparativ ta mashynnoho navchannia. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 305-315. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-43>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.08

Yurii Afonin,
Andrii Yakovishyn,
Volodymyr Savinov

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF INTEGRATING HETEROGENEOUS UNMANNED VEHICLE SWARMS AND MACHINE LEARNING FOR HUMANITARIAN DEMINING TASKS

The abstract presents a concept of a distributed system that combines unmanned aerial vehicles and ground robotic complexes into a heterogeneous drone swarm using machine learning algorithms for humanitarian demining tasks.

Keywords: swarms of unmanned vehicles, unmanned aerial vehicles, ground robotic complexes, machine learning, humanitarian demining.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Юрій Афонін, аспірант кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний ун-т імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yurii.afonin@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0005-6971-417X>.

Yurii Afonin, PhD Student of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yurii.afonin@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0005-6971-417X>.

Андрій Яковішин, магістрант кафедри АКТ, Чорноморський національний ун-т імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yakovishyn.andrii@gmail.com.

Andrii Yakovishyn, MSc Student of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yakovishyn.andrii@gmail.com.

Володимир Савінов, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний ун-т імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0862-5879>.

Volodymyr Savinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0862-5879>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.09

Іван Бурлаченко

ОСОБЛИВОСТІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЖЕСТІВ НА БАЗІ ESP32

Представлено аналіз технологій для використання моделей машинного навчання на малогабаритних малопотужних пристроях та перспектив мультіагентних систем, що саморозвиваються, для розпізнавання жестів на базі ESP32.

Ключові слова: мікроконтролери, інтернет речей, машинне навчання, розпізнавання жестів, мультіагентні системи, esp32.

Технології штучного інтелекту (ШІ) змінюють спосіб взаємодії пристроїв з реальним навколишнім середовищем[1]. Інформація приймається шляхом передачі даних з малогабаритних малопотужних пристроїв [2] або сенсорів до хмарних вебсервісів. Мережеві особливості підключення IoT пристроїв, висока вартість вебсервісів ШІ та конфіденційність даних є недоліками хмарно-орієнтованих методів обробки інформації. Штучний інтелект на периферії це ще один спосіб обробки даних безпосередньо на апаратному пристрої [3] без пересилання даних мережею, що оптимізує час затримки при передачі даних, виключає кібербезпекові аспекти, а також зменшує навантаження на бездротові канали обміну даними, впливаючи на пропускну здатність та енергоспоживання.

Апаратне забезпечення лінійного ряду ESP представлено на ринку розповсюдженими платами ESP8266 та ESP32. Для машинного навчання на ESP8266 існує кілька практичних альтернатив[4, 5], хоча можливості мікроконтролера суттєво обмежені через малий обсяг оперативної пам'яті – зазвичай 64 - 128 KB RAM, що значно менше, ніж у сучасних альтернатив.

Найпопулярнішим рішенням є Arduino TensorFlow Lite – це портована версія TensorFlow Lite для мікроконтролерів, який офіційно підтримує ESP8266 [6]. Бібліотека дозволяє розгорнути оптимізовані TFLite-моделі на мікроконтролерах. Вона також інтегрована у Sming Framework, який має вбудовану підтримку TFLite для плат на базі ESP8266. Також EloquentTinyML надає зручний інтерфейс до TensorFlow Lite Micro. Офіційна версія підтримує лише процесори ARM Cortex-M, але існує модифікована версія ESP8266-TinyML-test, яка працює на ESP8266, що підтверджує можливість запуску ML-моделей. Альтернативою є Diwa – це легка бібліотека для реалізації feedforward штучних нейронних мереж (ANN), яка підтримує як ESP8266, так і ESP32. Дана бібліотека призначена для задач класифікації та регресії [7].

Існує кілька підходів до розгортання ML-моделей на ESP8266. Перший підхід – micromlgen, який конвертує модель Scikit-learn у .h файл з C++ кодом. Методологія ідеально підходить для класифікації даних з сенсорів, наприклад, визначення орієнтації з MPU6050. В процесі розгортання за допомогою easyRTM генерується Classifier.h безпосередньо з Jupyter Notebook або VSCode і дозволяє розгорнути модель нейронної мережі на ESP8266 через Arduino IDE. Найбільш універсальний метод це класичний конвеєр при якому з TensorFlow готуються файли для TFLite, а потім формується C header-файл. Під час цього процесу ML-модель навчається з використання мови програмування Python, конвертується у формат TFLite, а потім експортується як масив байтів (C header), який можна вставити в код мікроконтролера.

ESP8266 має суттєво менший обсяг RAM – лише 64-128 KB, тоді як ESP32 має 320-520 KB RAM і підтримує PSRAM (зовнішню пам'ять), що дозволяє запускати значно складніші моделі. Тактова частота ESP8266 становить 80-60 МГц, тоді як ESP32 працює на 160-240 МГц, що забезпечує значно вищу продуктивність при виконанні інтенсивних обчислень нейромереж. Підтримка TensorFlow Lite Micro на ESP8266 є обмеженою – працюють лише прості моделі з малою кількістю параметрів. ESP32 має повну підтримку TFLite Micro з офіційними прикладами та документами.

Компанія Espressif Systems надає фреймворк ESP-DL, який можна використовувати для розгортання високопродуктивних моделей глибокого навчання на чіпі Espressif ESP32-S3. У цій статті ми розглянемо, як

використовувати ESP-DL та розгорнути модель глибокого навчання на ESP32-S3. Для дослідження було обрано задачу класифікації та розроблено модель глибокого навчання для класифікації 6 різних жестів рук. Основні етапи розробки моделей були виконані в середовищі Google Co-lab. Для задачі класифікації було використано відкритий набір даних з набору даних розпізнавання жестів рук Kaggle. Вихідний набір даних містить 10 класів, проте було виконано скорочення до 6 класів, які легко розпізнати та корисніші в повсякденному житті. Інші 4 класи під час майбутніх експериментів стануть необхідними для дослідження саморозвитку мультиагентних систем (MAC) розпізнавання жестів з використанням ML-моделей (рис. 1). Було враховано відмінність, що пов'язана з розміром зображення: вихідний набір даних має розмір зображення (240, 640), проте для спрощення розмір набору даних було змінено до (96, 96).

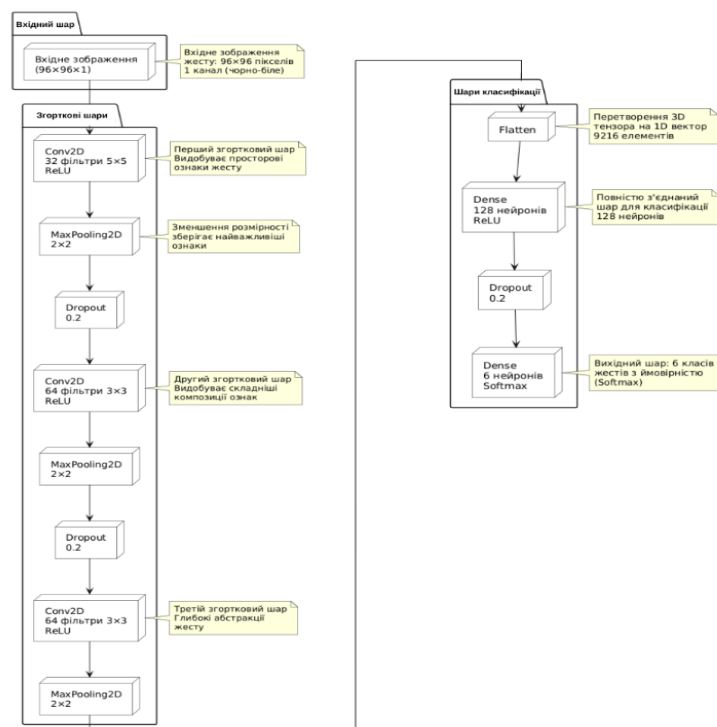


Рис. 1. Граф архітектури ML-моделі для розпізнавання жестів

Граф моделі представляє конволюційну нейронну мережу (CNN) з послідовною архітектурою, яка починається з вхідного зображення жесту розміром 96×96 пікселів з одним каналом (чорно-біле зображення). Модель містить три згорткові блоки, кожен з яких складається з Conv2D шару для видобування ознак, MaxPooling2D шару для зменшення розмірності та Dropout шару для запобігання перенавчанню. Перший блок має 32 фільтри розміром 5×5 , другий і третій – по 64 фільтри розміром 3×3 , що дозволяє мережі поступово видобувати все більш складні просторові ознаки жестів від простих країв до складних композицій.

Кожен згортковий блок зменшує розмірність просторових ознак у 2 рази завдяки MaxPooling2D з вікном 2×2 : від 96×96 до 48×48 , потім до 24×24 , і нарешті до 12×12 пікселів. Dropout шари з коефіцієнтом 0.2 після кожного пулінгу випадково вимикають 20% нейронів під час навчання, що покращує узагальнювальну здатність моделі. Після трьох згорткових блоків тензор розміром $64 \times 12 \times 12$ (9216 значень) перетворюється на одновимірний вектор через Flatten шар, який готує дані для повністю з'єднаних шарів класифікації.

Граф ML-моделі завершується двома повністю з'єднаними шарами Dense: перший має 128 нейронів з активованою функцією ReLU для нелінійної трансформації ознак, другий – 6 нейронів з функцією активації Softmax для виведення ймовірностей для 6 класів жестів. Модель компілюється з оптимізатором adam, функцією втрат sparse_categorical_crossentropy (для цілочисельних міток класів) та метрикою accuracy для оцінки точності класифікації. Така архітектура оптимізована для розпізнавання жестів на мікроконтролерах ESP32 з обмеженою пам'яттю, оскільки згорткові шари значно ефективніші за повністю з'єднані за кількістю параметрів.

Після побудови графу, було виконано процес навчання та підготовки моделі розпізнавання жестів складається з трьох ключових етапів. Спочатку модель навчалась протягом 5 епох з batch_size=64, досягаючи

кінцевої точності близько 99%, після чого модель було збережено у форматі Keras (.h5) через `model.save("handrecognition_model.h5")`. Далі була виконана конвертація у формат ONNX (Open Neural Network Exchange), необхідний для сумісності з ESP-DL: модель завантажується з .h5, зберігається як `saved_model`, і конвертується за допомогою `tf2onnx.convert`, після чого завантажуються всі файли (.h5, .onnx, архів `tmp_model.zip`) для подальшого використання.

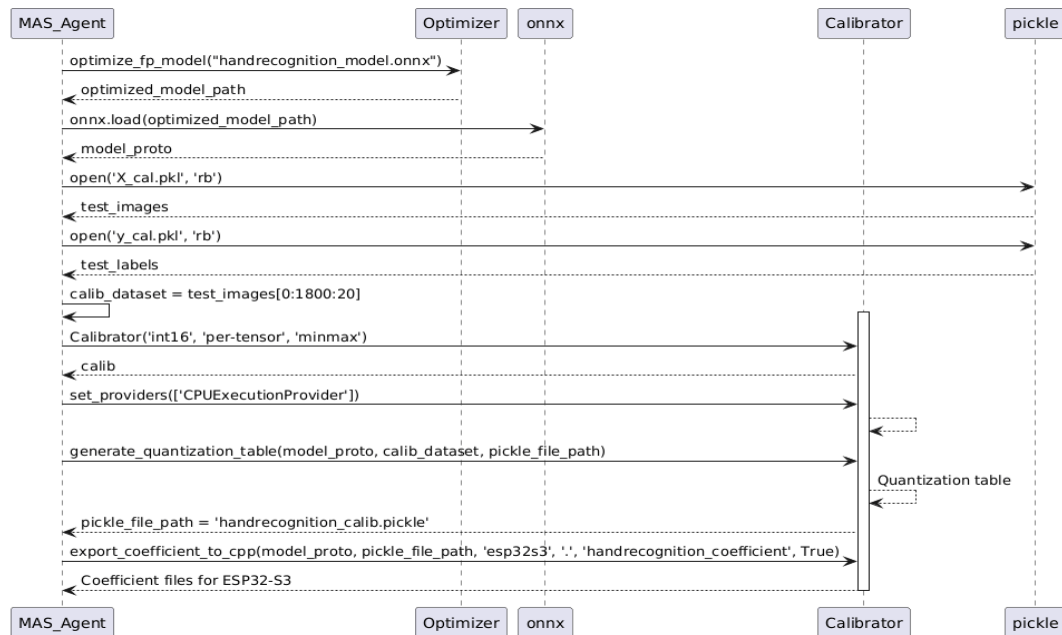


Рис. 2. Діаграма послідовності квантування моделі ONNX для ESP32

Було виконано конвертацію у формат ESP-DL для розгортання на мікроконтролерах ESP32. Для цього було потрібно налаштувати середовище з правильними версіями модулів у середовищі розробки, клонувати репозиторій ESP-DL і виконати конвертацію ONNX моделі у формат, оптимізований для ESP32-S3. Ключовим є правильне налаштування версій модулів, оскільки невідповідність призводить до помилок під час конвертації. Отримана модель готова до інтеграції з ESP-DL фреймворком для розпізнавання жестів на вбудованих пристроях з обмеженою пам'яттю.

Діаграма на рис. 2 демонструє послідовність дій для квантування ONNX моделі розпізнавання жестів для мікроконтролера ESP32-S3. MAS_Agent спочатку викликає модуль Optimizer, який оптимізує FP-модель через функцію `optimize_fp_model()`, повертаючи шлях до оптимізованої моделі. Потім завантажується модель через `onnx.load()`, і завантажуються калібрувальні дані з файлів `X_cal.pkl` та `y_cal.pkl` через `pickle`, з яких формується піддасет `calib_dataset` перші 1800 зображень з кроком 20.

Під час етапу калібрування створюється екземпляр класу `Calibrator` з параметрами "int16", "per-tensor", "minmax" (можлива альтернатива "int8", "per-channel"), встановлюється постачальник виконання `CPUExecutionProvider`, і викликається метод `generate_quantization_table()`, який аналізує модель на калібрувальних даних та генерує таблицю квантування, зберігаючи її у файл `handrecognition_calib.pickle`. Цей етап визначає параметри квантування (масштаби, зсуви) для перетворення float32 wag у int16. Під час експорту коефіцієнтів: метод `export_coefficient_to_cpp()` генерує C++ файли з коефіцієнтами квантування, оптимізовані для архітектури ESP32-S3, з префіксом імені `handrecognition_coefficient`. Ці файли містять ваги, зміщення та масштаби у форматі, сумісному з обмеженою пам'яттю мікроконтролера, дозволяючи розпізнавання жестів на устрою з мінімальним використанням пам'яті та прискореним виконанням завдяки цілочисельній арифметиці замість плаваючої коми.

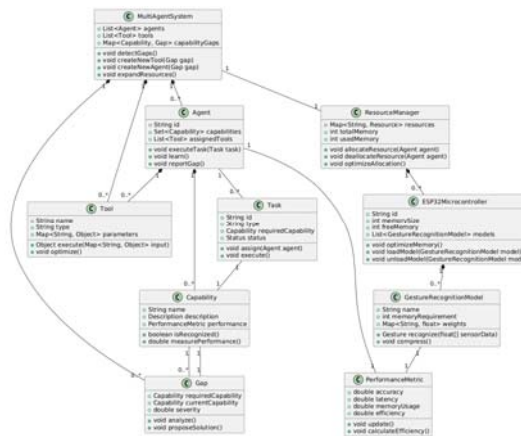


Рис. 3. Діаграма класів концептуальної архітектури МАС, що саморозвивається для розпізнавання жестів

Центральний клас MultiAgentSystem на рис. 3. керує всією системою. MultiAgentSystem зберігає списки агентів та інструментів, автоматично виявляє прогалини у можливостях через метод detectGaps(), і динамічно створює нові інструменти або навіть нових агентів для заповнення цих прогалин. Класи Agent, Tool та Capability формують ядро функціональності. Агенти мають набір можливостей, отримують призначені інструменти, виконують завдання через executeTask() і навчаються, щоб покращити свої навички. Інструменти (Tool) виконують конкретні операції з вхідними даними та можуть оптимізуватися. Можливості (Capability) описують, що система може робити (наприклад, розпізнавання жестів), з вимірюванням продуктивності. Клас Gap аналізує розрив між поточними та потрібними можливостями, оцінює його серйозність і пропонує рішення, що запускає процес саморозвитку системи.

Класи нижнього рівня забезпечують технічну реалізацію оптимізації ресурсів. ESP32Microcontroller керує пам'яттю мікроконтролера, завантажує та вивантажує моделі розпізнавання жестів, оптимізує використання пам'яті через optimizeMemory(). GestureRecognitionModel містить ваги моделі, виконує розпізнавання жестів із сенсорних даних і може стискатися для економії пам'яті. Task представляє завдання з вимогою до конкретної можливості та статусом виконання. PerformanceMetric збирає метрики точності, затримки, використання пам'яті та ефективності, обчислюючи загальну ефективність системи. ResourceManager розподіляє та звільняє ресурси (пам'ять ESP32) між агентами, оптимізує загальне розподілення ресурсів. Разом ці класи реалізують перехід від фіксованого набору ресурсів до активного розширення з динамічною оптимізацією пам'яті на мікроконтролерах ESP32.

References

- Афонін, Ю., & Савінов, В. (2026). Концептуальна модель розподіленої системи гуманітарного розмінування на основі рою безпілотних апаратів та машинного навчання. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 305–315. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-43>
- Wang, T., Cao, X., & Zhang, Y. (2025). A systematic review of state-of-the-art TinyML applications in embedded systems. IEEE Access, 13, 45678–45712. <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10820123/11266886.pdf>
- Kravchenko, P., Nikolskyi, V., & Zhuravska, I. (2025). Hardware-software complex for detection and modeling of defects in technical constructions. Scientific and Practical Journal “Materials of Scientific Conferences of the Petro Mohyla Black Sea National University,” (1), 97–101. <https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.06.20>
- Kallimani, R., Pai, K., Raghuwanshi, P., Iyer, S., & López, O. L. A. (2023). TinyML: Tools, applications, challenges, and future research directions. arXiv. <https://arxiv.org/pdf/2303.13569.pdf>
- Chen, L., & Kumar, A. (2023). A comprehensive survey on TinyML. IEEE Access, 11, 67890–67925. <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/10005208/10177729.pdf>
- Paleo, A., & Sakhare, S. (2023). Test the capability of Arduino TinyML for machine learning. In Proceedings of the 7th EAI International Conference on Robotics and Networks (ROSENET 2023) (pp. 161–175). Springer. <https://nchr.elsevierpure.com/en/publications/test-the-capability-of-arduino-tinyml-for-machine-learning>
- Castellani, A. (2021). A review on TinyML: State-of-the-art and prospects. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(10), 9238–9253. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821003335>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.09

Ivan Burlachenko

**FEATURES OF MULTI-AGENT SYSTEMS FOR GESTURE RECOGNITION
BASED ON THE ESP32**

This research presents an analysis of technologies for deploying machine learning models on small, low-power devices, as well as the prospects for self-developing multi-agent systems for gesture recognition based on the ESP32.

Keywords: microcontrollers, Internet of Things, machine learning, gesture recognition, multi-agent systems, ESP32.

Відомості про автора / Information about the Author

Іван Бурлаченко, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ivan.burlachenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5088-6709>.

Ivan Burlachenko, Senior Lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ivan.burlachenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5088-6709>

© I. Бурлаченко

Стаття отримана редакцією 20.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.10

Віктор Волков,
Ірина Журавська

МЕТОД ЛОКАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖЕВИХ ІНЦИДЕНТІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ STS

У тезах розглянуто підхід до локалізації мережесих інцидентів у локальній обчислювальній мережі на основі авторської моделі STS. Запропонована модель передбачає структурування джерел телеметрії за рівнями інфраструктури та використовується для визначення зони потенційної компрометації після виявлення підозрілої активності.

Ключові слова: локальна обчислювальна мережа, мережесий інцидент, локалізація інцидентів, телеметрія, модель STS, зона потенційної компрометації, зона недовіри, VPN, міжмережесий екран, моніторинг безпеки.

Сучасні локальні обчислювальні мережі є складними багаторівневими середовищами, у яких одночасно функціонують сервери, робочі станції, мережеве обладнання, системи віртуалізації, периферійні пристрої та інфраструктурні сервіси. Кожен із цих компонентів формує власну телеметрію: системні журнали, мережесі події, записи міжмережесих екранів, події автентифікації, DNS-запити, VPN-сесії, метрики доступності та інші технічні дані. Саме ця телеметрія є основою для виявлення аномалій, аналізу стану інфраструктури та реагування на інциденти інформаційної безпеки [1].

Водночас наявність великої кількості журналів і подій не гарантує швидкого та правильного розуміння інциденту. У багатьох випадках джерело підозрілої активності можна побачити одразу: це може бути конкретний вузол, обліковий запис, VPN-сесія, сервер або мережесий напрямок. Проте сам факт виявлення джерела ще не дає відповіді на більш важливе практичне питання: яким компонентам інфраструктури після цього інциденту тимчасово не можна довіряти. Тобто проблема полягає не лише у первинному виявленні події, а у визначенні зони потенційної компрометації навколо неї, що узгоджується з логікою containment та подальшого відновлення після інциденту [1].

Для вирішення цієї задачі в роботі запропоновано авторську модель STS – Structure-Based Telemetry Source Model (рис. 1).

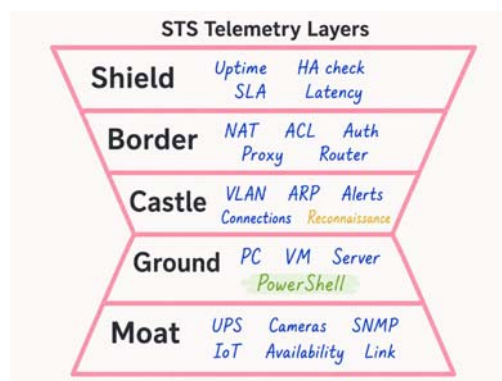


Рис. 1. Прототип моделі STS

Ця модель не розглядається як готовий галузевий стандарт, а подається як підхід до структуризації джерел телеметрії локальної мережі відповідно до їх ролі та рівня походження в інфраструктурі. Основне призначення STS полягає в тому, щоб після появи підозрілої або підтвердженої події допомогти визначити межі недовіри: які вузли, облікові записи, сервіси, канали доступу або сегменти мережі потребують першочергової перевірки,

обмеження або ізоляції. Такий підхід також відповідає принципу відсутності неявної довіри до активів і доступів лише на підставі їхнього розташування в мережі [2].

У межах моделі STS джерела телеметрії доцільно розглядати за п'ятьма логічними рівнями.

Перший рівень (Moat) охоплює допоміжні та периферійні пристрої, зокрема системи резервного живлення, IP-камери, IoT-пристрої, точки доступу, контролери та інші компоненти, які часто мають обмежені механізми захисту, але можуть бути важливими джерелами сервісної телеметрії.

Другий рівень (Ground) включає кінцеві вузли: сервери, робочі станції, системи віртуалізації, контейнери та прикладні сервіси. Саме на цьому рівні формується значний обсяг подій, пов'язаних з автентифікацією, запуском процесів, файловою активністю та локальними мережевими з'єднаннями.

Третій рівень (Castle) описує локальну мережеву взаємодію між вузлами інфраструктури, для аналізу якої можуть використовуватися мережеві потоки та засоби пасивного моніторингу [9], [10]. До нього належать дані про сесії, напрямки трафіку, мережеві метадані, DNS-активність, службові підключення та ознаки горизонтального переміщення всередині мережі.

Четвертий рівень (Border) охоплює міжсегментний і прикордонний контроль: міжмережеві екрани, маршрутизатори, VPN-шлюзи, проксі-сервери та інші точки, через які проходить контрольована взаємодія між сегментами або із зовнішніми мережами. Саме такі точки є важливими для аналізу віддаленого доступу, зовнішніх сервісів і міжсегментних маршрутів [3; 5].

П'ятий рівень (Shield) формують зовнішні метрики доступності й сервісного стану, які можуть не вказувати безпосередньо на атаку, але допомагають оцінити наслідки інциденту для роботи сервісів.

Таким чином, STS дозволяє перейти від аналізу окремої події до аналізу взаємозв'язків між подією, джерелом телеметрії та інфраструктурним контекстом. Якщо система фіксує підозрілу активність, модель допомагає визначити не лише те, де вона виникла, а й те, які суміжні компоненти можуть бути пов'язані з цією активністю. Саме це є основою для формування зони потенційної компрометації.

Показовим прикладом є компрометація VPN-акаунта адміністратора, що відповідає поширеним сценаріям використання зовнішніх сервісів віддаленого доступу та легітимних облікових записів зловмисником [3; 4]. У VPN-журналах може бути зафіксовано успішний вхід адміністративного облікового запису в нетиповий час або з нетиповою зовнішньою адреси. На перший погляд джерело інциденту вже відоме: це конкретний акаунт і конкретна VPN-сесія. Однак для реагування цього недостатньо. Потрібно визначити, до яких серверів цей акаунт мав доступ після підключення, чи виконувалися RDP, SSH або WinRM-сесії, які адміністративні дії були здійснені, чи використовувалися привілейовані облікові дані та які внутрішні вузли могли бути зачеплені [5; 6].

У цьому випадку STS дає змогу розширити аналіз від однієї VPN-події до повної лінії доступу. На рівні міжсегментного контролю в зону недовіри потрапляє VPN-сесія, шлюз і політика доступу. На рівні кінцевих вузлів – адміністративна робоча станція, сервери, до яких було виконано підключення, та сам обліковий запис. На рівні локальної мережевої взаємодії – усі внутрішні з'єднання, які були встановлені після підозрілого входу. Отже, компрометований VPN-доступ означає, що недовіра поширюється не лише на акаунт, а й на всю лінію доступу та системи, до яких цей акаунт мав відношення.

Другим прикладом є внутрішній сервер, який зазвичай обслуговує лише локальних клієнтів, але раптово починає встановлювати нетипові зовнішні з'єднання. Подібна поведінка може аналізуватися через мережеві з'єднання, мережеві потоки та ознаки командно-керуючої або іншої нетипової зовнішньої взаємодії [7; 9; 10]. Джерело події в такій ситуації також є очевидним — це конкретний сервер. Проте сама наявність вихідного з'єднання ще не пояснює природу інциденту. Це може бути легітимне оновлення, резервне копіювання, звернення до зовнішнього API або, навпаки, ознака компрометації, командного каналу чи спроби виведення даних.

Для такого сценарію STS дозволяє пов'язати подію на рівні хоста з телеметрією міжмережевого екрана, проксі, NAT-сесій, DNS-запитів і мережевих потоків [7; 9; 10]. У зону недовіри можуть потрапити сам сервер, сервісний обліковий запис, процес, що ініціював з'єднання, правило виходу в інтернет, зовнішній напрямок комунікації та внутрішні клієнти, які взаємодіяли з цим сервером перед появою аномалії. Водночас цей приклад потребує обережної інтерпретації, оскільки без базового профілю нормальної поведінки та списку дозволених напрямків він може давати багато хибних спрацювань. Тому STS не замінює аналітичну перевірку, а задає структурований контур для неї.

Аналогічний підхід може застосовуватися і до інших сценаріїв: внутрішнього сканування мережі з одного хоста, аномальних DNS-запитів, масових помилок автентифікації, нетипової активності кінцевих точок або спроб обходу міжсегментної політики доступу. У кожному з цих випадків важливо не лише побачити подію, а й визначити, які вузли, акаунти, сервіси або канали взаємодії потрапляють у зону потенційної недовіри.

Практична реалізація такого підходу може працювати як аналітичний шар поверх наявних засобів моніторингу, SIEM, EDR, мережевої телеметрії та журналів інфраструктурних сервісів. Для узгодження різномірних подій можуть використовуватися загальні підходи до телеметрії, кореляції сигналів і пасивного мережевого моніторингу [10; 11]. STS не має замінювати ці системи. Її роль полягає в тому, щоб надати додаткову логіку структурування: класифікувати джерела подій за рівнями, зв'язати їх з інфраструктурним контекстом і допомогти сформувати обґрунтовану зону першочергової перевірки або containment (табл. 1).

Таблиця 1.

Порівняльна таблиця сталих підходів з моделлю STS

Підхід	Основна роль	Сильна сторона	Слабка сторона
STS	Авторська структурна модель для побудови зони потенційної компрометації	Дає відповідь не лише «де сигнал», а «які активи/сесії/шляхи тимчасово недовірені»	Потребує якісної нормалізації, інвентаризації та емпіричної валідації
SIEM	Централізоване збирання, кореляція та аналітика подій	Єдина точка огляду різних джерел	Сам по собі не задає моделі «радіусу недовіри» після інциденту
EDR/XDR	Детекція й response на endpoint/incidents майже в реальному часі	Глибока видимість host-рівня, scope breach, containment actions	Гірше бачить міжсегментні шляхи без інтеграції з network/perimeter telemetry
MITRE ATT&CK	Knowledge base технік противника та detection strategies	Добре описує поведінкові сценарії і потрібні data components	Не є архітектурною моделлю джерел телеметрії та меж довіри
MITRE D3FEND	Knowledge graph захисних технік	Добра термінологія для inventory, link mapping, policy mapping	Не дає простого operational rule для побудови distrust zone під конкретний інцидент
OpenTelemetry [11]	Vendor-neutral framework для logs/metrics/traces	Уніфікує сигнали й кореляцію	Не додає security semantics і не визначає incident boundaries
IPFIX / Zeek / NSM [10]	Flow та passive network telemetry	Сильні для east-west/east-west+egress видимості	Не закривають identity/endpoint контекст без кореляції з іншими джерелами

Отже, запропонована модель STS дозволяє уточнити підхід до локалізації мережевих інцидентів у локальній обчислювальній мережі. Її основна цінність полягає не лише у фіксації джерела підозрілої активності, а у визначенні меж потенційної компрометації після її виявлення. Завдяки структуризації телеметрії за рівнями інфраструктури можна швидше оцінити, які компоненти потребують перевірки, які канали доступу слід тимчасово обмежити та які сегменти можуть потребувати ізоляції [1; 2; 8]. Це створює основу для більш керованого, обґрунтованого та безпечного реагування на внутрішні мережеві інциденти.

References

1. Nelson, A., Rekhi, S., Souppaya, M., & Scarfone, K. (2025). NIST SP 800-61 Rev. 3: Incident Response Recommendations and Considerations for Cybersecurity Risk Management: A CSF 2.0 Community Profile. National Institute of Standards and Technology. Retrieved from: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-61r3>.
2. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). NIST SP 800-207: Zero Trust Architecture. National Institute of Standards and Technology. Retrieved from: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>.
3. MITRE ATT&CK. External Remote Services, Technique T1133. URL: <https://attack.mitre.org/techniques/T1133/>.
4. MITRE ATT&CK. Valid Accounts, Technique T1078. Retrieved from: <https://attack.mitre.org/techniques/T1078/>.
5. MITRE ATT&CK. Remote Services, Technique T1021. Retrieved from: <https://attack.mitre.org/techniques/T1021/>.
6. MITRE ATT&CK. Behavior-chain detection for T1133 External Remote Services, Detection Strategy DET0354. Retrieved from: <https://attack.mitre.org/detectionstrategies/DET0354/>.
7. MITRE ATT&CK. Detection of Command and Control Over Application Layer Protocols, Detection Strategy DET0444. Retrieved from: <https://attack.mitre.org/detectionstrategies/DET0444/>.

8. MITRE D3FEND. Network Mapping, Technique D3-NM. Retrieved from: <https://d3fend.mitre.org/technique/d3f:NetworkMapping/>.
9. Claise, B., Trammell, B., & Aitken P. (2013). RFC 7011: Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of Flow Information. Internet Engineering Task Force. Retrieved from: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7011>.
10. Zeek Project. About Zeek – Book of Zeek. Retrieved from: <https://docs.zeek.org/en/v6.2.1/about.html>.
11. OpenTelemetry Authors. What is OpenTelemetry? Retrieved from: <https://opentelemetry.io/docs/what-is-opentelemetry/>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.10

Viktor Volkov,
Iryna Zhuravska

METHOD FOR LOCALIZING NETWORK INCIDENTS BASED ON THE STS MODEL

The theses examine an approach to localizing network incidents in a local area network based on the author's STS model. The proposed model involves structuring telemetry sources according to infrastructure levels and is used to determine the zone of potential compromise after suspicious activity has been detected.

Keywords: local area network, network incident, incident localization, telemetry, STS model, zone of potential compromise, zone of distrust, VPN, firewall, security monitoring.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Віктор Волков, бакалаврант кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: vikvolk99@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9151-5556>.

Viktor Volkov, BSc Student of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: vikvolk99@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9151-5556>.

Ірина Журавська, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8102-9854>.

Iryna Zhuravska, Doctor of Sciences (In Techn.), Professor, Head of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8102-9854>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.11

Денис Гончаров,
Ігор Кандиба

ПОРІВНЯННЯ МОНОЛІТНОЇ ТА БАГАТОРІВНЕВОЇ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

У тезах порівняно монолітну та багаторівневу архітектури систем моніторингу здоров'я за критеріями масштабованості, надійності й безпеки.

Ключові слова: монолітна архітектура, багаторівнева архітектура, моніторинг стану здоров'я, IoMT, віддалений моніторинг пацієнтів, хмарні технології, масштабованість, медичні інформаційні системи.

Системи моніторингу стану здоров'я людини є одним із ключових напрямів розвитку сучасної цифрової медицини. Їх призначення полягає у безперервному або періодичному збиранні фізіологічних показників, передаванні цих даних до засобів оброблення, подальшому аналізі, виявленні критичних станів і поданні результатів лікарю, медичному персоналу чи самому пацієнтові. Поширення сенсорів, носимих пристроїв, мобільних застосунків, телемедичних сервісів і концепції Internet of Medical Things суттєво розширило вимоги до програмно-апаратної архітектури таких систем. Сьогодні вже недостатньо лише зібрати окремі показники, архітектура повинна забезпечувати надійне зберігання даних, їх своєчасну доставку, підтримку аналітичних модулів, масштабування під реальне навантаження та захист конфіденційної медичної інформації [1]. У зв'язку з цим особливо актуальним є порівняння традиційного монолітного підходу та багаторівневих архітектурних рішень, орієнтованих на розподіл функцій між окремими рівнями системи [2].

Монолітна архітектура передбачає побудову системи як єдиного програмного цілого, у межах якого модулі збору даних, бізнес-логіка, засоби аналізу, інтерфейс користувача та доступ до бази даних функціонують як одна тісно пов'язана система. Перевагами такого підходу є відносна простота початкового проектування, швидкий запуск прототипу, централізоване розгортання та спрощене налагодження на ранніх етапах. Для невеликих дослідницьких або пілотних систем монолітний підхід часто є доцільним, оскільки дозволяє швидко перевірити працездатність концепції без побудови складної інфраструктури. Дослідження, присвячені порівнянню монолітних і мікросервісних рішень, також показують, що моноліт не завжди програє за продуктивністю: в окремих сценаріях він може демонструвати порівнянні, а інколи й кращі показники пропускну здатності через менші витрати на міжсервісну взаємодію. Отже, монолітна архітектура не є застарілою сама по собі, її ефективність залежить від масштабу системи, характеру навантаження та вимог до розвитку.

Разом з тим для систем моніторингу здоров'я людини монолітна архітектура має низку суттєвих обмежень:

1. зростання кількості пацієнтів, пристроїв та потоків даних призводить до того, що масштабувати доводиться всю систему цілком, навіть якщо перевантаження виникає лише в одному функціональному контурі, наприклад у модулі приймання телеметрії або в підсистемі аналітики;

2. будь-які зміни в одній частині моноліту можуть вимагати повторного тестування та перевстановлення всієї системи, що підвищує ризик простоїв;

3. моноліт формує єдину точку відмови: помилка в одному критичному компоненті потенційно впливає на роботу всього застосунку.

Для медичних систем це особливо небезпечно, оскільки затримка в обробленні або втрата сигналів ЕКГ, сатурації чи температури може знизити цінність моніторингу або навіть призвести до пропуску небезпечного стану. У міру розвитку системи зростає і складність підтримки коду, особливо коли до проекту залучено кілька команд або коли окремі частини мають різні темпи оновлення.

Багаторівнева архітектура, навпаки, ґрунтується на логічному та фізичному розподілі функцій між кількома рівнями. У сучасних IoMT-системах типовою є структура, що включає сенсорний рівень, рівень шлюзу, хмарний або серверний рівень та прикладний рівень візуалізації й керування. Сенсорний рівень відповідає за реєстрацію фізіологічних параметрів за допомогою носимих чи стаціонарних пристроїв. Рівень шлюзу агрегує потоки від

сенсорів, виконує первинну фільтрацію, буферизацію, локальне прийняття рішень або передавання даних далі. Хмарний рівень забезпечує зберігання, складні обчислення, аналітику, машинне навчання та довготривалу історію спостережень. Прикладний рівень подає результати лікарям, пацієнтам і адміністраторам, а також забезпечує керування параметрами моніторингу. Саме така багаторівнева побудова дедалі частіше розглядається як базова для реального дистанційного нагляду за станом здоров'я [1].

Перевага багаторівневого підходу полягає насамперед у кращій пристосованості до гетерогенності медичного середовища. Реальна система моніторингу повинна працювати з різними датчиками, мобільними пристроями, каналами зв'язку, форматами даних та ролями користувачів. У роботах, присвячених сучасним архітектурам IoT, показано, що багаторівневі рішення дозволяють рознести по різних контурах збір даних, транспорт, оброблення, зберігання і представлення інформації. Це спрощує модернізацію: можна окремо змінювати сенсори, нарощувати аналітичні можливості, додавати нові інформаційні панелі або підключати сервіси штучного інтелекту без повної перебудови всієї системи. Якщо, наприклад, зростає кількість запитів до модуля прогнозування або до сервісу тривожних повідомлень, масштабують лише ці частини, а не всю систему в цілому. Для тривалого розвитку медичної платформи це є істотною техніко-економічною перевагою [3].

Для систем моніторингу здоров'я людини особливо важливо, що багаторівнева архітектура краще підтримує оброблення даних «поблизу джерела». Частина задач може виконуватися на шлюзі або крайовому вузлі ще до надсилання інформації в хмару: фільтрація шуму, перевірка допустимих меж, виявлення аномалій, локальне формування попереджень. Такий підхід зменшує затримки, трафік і залежність від постійної мережевої доступності. Водночас більш ресурсоемні задачі – накопичення історії, складна аналітика, статистичне узагальнення, навчання моделей – доцільно залишати на серверному чи хмарному рівні. У сучасних реалізаціях віддаленого моніторингу саме поєднання носимих пристроїв, шлюзів, хмарної інфраструктури та прикладних сервісів розглядається як спосіб досягти балансу між швидкістю, надійністю та гнучкістю. Таким чином, багаторівнева архітектура краще відповідає природі медичних даних, що є потоковими, багатоджерельними й критичними до часу реакції [1].

Ще однією перевагою багаторівневого підходу є покращення інтероперабельності. У медичних інформаційних системах важливо не лише зібрати сигнали, а й передати їх у зручному для клінічного використання вигляді, інтегрувати з електронними медичними записами та забезпечити стандартизований обмін між різними компонентами. У сучасних архітектурах для цього використовуються різні технологічні рівні: енергоєфективні бездротові протоколи для сенсорів, брокери повідомлень для внутрішнього транспорту та стандарти медичних даних для верхніх рівнів. Наприклад, у дослідженні бездротового біомоніторингу пацієнтів запропоновано архітектуру, де на рівні збору застосовується BLE, для внутрішньої взаємодії – MQTT, а на верхньому рівні – стандарт FHIR для інтеграції з лікарняними системами. Така побудова суттєво краще відповідає умовам реального медичного закладу, ніж централізований моноліт, де інтеграція зовнішніх джерел часто перетворюється на складну доробку всередині єдиного коду [4].

У контексті безпеки та конфіденційності даних багаторівнева архітектура також має важливі переваги, хоча й вимагає вищої культури проектування. Медичні дані є чутливими, тому система повинна гарантувати автентифікацію пристроїв, контроль доступу, захист каналів зв'язку, цілісність записів і стійкість до відмов та атак. Дослідження нових IoT-архітектур показують, що багаторівнева модель дозволяє окремо реалізувати політики безпеки на різних ділянках: на пристрої, на шлюзі, на сервері та на прикладному рівні. У роботах останніх років пропонуються архітектури, у яких захист передбачено вже на рівні проектування, а також моделі, що поєднують сенсори, проміжний вузол і захищене серверне або блокчейн-середовище для підвищення довіри до даних. На відміну від цього, у моноліті засоби безпеки нерідко концентруються в єдиному серверному вузлі, що спрощує первинну реалізацію, але створює більш критичні наслідки у разі компрометації центрального вузла.

Водночас було б помилкою стверджувати, що багаторівнева архітектура автоматично є кращою за монолітну в усіх випадках. Її впровадження підвищує складність системи: з'являються задачі оркестрації сервісів, мережевої взаємодії, моніторингу контейнерів, балансування навантаження, розподіленого журналювання та підтримки узгодженості даних. Для невеликих систем, де кількість пристроїв обмежена, а обсяг телеметрії невеликий, монолітне рішення може бути дешевшим і швидшим у реалізації. Емпіричні порівняння монолітних і мікросервісних систем показують, що вигода від декомпозиції проявляється не завжди й особливо залежить від характеру навантаження. Отже, перехід до багаторівневої архітектури слід розглядати не як самоціль, а як обґрунтований крок, коли система виходить за межі лабораторного прототипу і повинна підтримувати багато джерел даних, віддалений доступ, аналітику, інтеграцію та безперервний розвиток [5].

З практичної точки зору доцільно вважати монолітну архітектуру прийнятною для ранніх етапів створення системи моніторингу здоров'я: коли перевіряється концепція, тестується окремий сенсор, відпрацьовується алгоритм або створюється демонстраційний стенд. Однак для системи, що має забезпечити довготривалий

дистанційний нагляд за багатьма пацієнтами, взаємодію з медичним персоналом, накопичення історичних даних, використання хмарних сервісів, локальне реагування на критичні стани та інтеграцію з іншими інформаційними системами, більш перспективною є саме багаторівнева архітектура. Вона краще пристосована до реальних умов експлуатації, дає можливість поступового нарощування функціональності та знижує ризик того, що розвиток однієї підсистеми паралізує роботу всієї платформи. Тому в задачах сучасного моніторингу стану здоров'я багаторівневий підхід слід розглядати як стратегічний напрям побудови систем, тоді як монолітний – як локально доцільне рішення для простих або стартових реалізацій [6].

Експериментальна перевірка також підтвердила переваги багаторівневої архітектури. Під час навантажувального тестування, виконаного в Docker із використанням Locust при моделюванні 1000 віртуальних користувачів, багаторівнева реалізація продемонструвала пропускну здатність близько 316,2 запитів/с (рис. 1), тоді як монолітна – 296,9 запитів/с (рис. 2), при цьому частка помилкових запитів зменшилася з 39 % до 18 %.



Рис. 1. Результати навантажувального тестування багаторівневої реалізації системи моніторингу в середовищі Locust

Це дає підстави стверджувати, що багаторівнева архітектура є більш придатною для побудови масштабованих систем дистанційного моніторингу стану здоров'я людини.



Рис. 2. Результати навантажувального тестування монолітної реалізації системи моніторингу в середовищі Locust

Отже, порівняння показує, що монолітна архітектура виграє у простоті початкового впровадження, меншій інфраструктурній складності та придатності до швидкого створення прототипів. Натомість багаторівнева архітектура має переваги щодо масштабованості, відмовостійкості, гнучкості розвитку, інтероперабельності та підтримки сучасних сценаріїв IoMT-моніторингу. Саме ці властивості роблять її більш придатною для побудови спеціалізованих систем моніторингу стану здоров'я людини, орієнтованих на реальне використання в клінічній або домашній практиці. Рациональний вибір між цими підходами повинен визначатися не модою на певний стиль проєктування, а функціональними вимогами системи, обсягом даних, кількістю користувачів, критичністю часу реакції та вимогами до захисту медичної інформації.

References

1. Gallo, G. D., & Micucci, D. (2025). Internet of Medical Things Systems Review: Insights into Non-Functional Factors. *Sensors*, 25(9), 2795. <https://doi.org/10.3390/s25092795>
2. Гончаров Д. С., Гончарова Н. В., Кандиба І. О. Архітектура багаторівневої системи моніторингу стану здоров'я людини. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35(74), № 2. С. 78–85. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.2/11.
3. Alasmary, H. (2024). ScalableDigitalHealth (SDH): An IoT-Based Scalable Framework for Remote Patient Monitoring. *Sensors*, 24(4), 1346. <https://doi.org/10.3390/s24041346>
4. Famá, F., Faria, J. N., & Portugal, D. (2022). An IoT-based interoperable architecture for wireless biomonitoring of patients with sensor patches. *Internet of Things*, 100547. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100547>
5. Marchang, J., McDonald, J., Keishing, S., Zoughalian, K., Mawanda, R., Delhon-Bugard, C., Bouillet, N., & Sanders, B. (2024). Secure-by-Design Real-Time Internet of Medical Things Architecture: e-Health Population Monitoring (RTPM). *Telecom*, 5(3), 609-631. <https://doi.org/10.3390/telecom5030031>
6. Gallo, G. D., & Micucci, D. (2025). Internet of Medical Things Systems Review: Insights into Non-Functional Factors. *Sensors*, 25(9), 2795. <https://doi.org/10.3390/s25092795>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.11

Denys Honcharov,
Ihor Kandyba

COMPARISON OF MONOLITHIC AND MULTI-TIER ARCHITECTURES OF HUMAN HEALTH MONITORING SYSTEMS

The abstract compare monolithic and multi-tier architectures of health monitoring systems according to the criteria of scalability, reliability, and security.

Keywords: monolithic architecture, multi-tier architecture, health monitoring, IoMT, remote patient monitoring, cloud technologies, scalability, medical information systems.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Денис Гончаров, викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: honcharov.denys@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-1200-6677>.

Denys Honcharov, Lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mukolaiv, Ukraine. E-mail: honcharov.denys@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-1200-6677>.

Ігор Кандиба, PhD, ст. викладач кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8589-4028>.

Ihor Kandyba, PhD, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mukolaiv, Ukraine. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8589-4028>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.12

Галина Киричек,
Марія Тягунова,
Дмитро Карнаух

СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ЯК ОБ'ЄКТ НАУКОВОЇ НОВИЗНИ

В даній роботі досліджено сенсорні мережі як об'єкт наукової новизни в контексті розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Проаналізовано: архітектури сенсорних мереж та принципів їх функціонування; сучасні технології бездротового зв'язку, зокрема ZigBee, LoRaWAN, Bluetooth Low Energy та NB-IoT; мережеві протоколи IEEE 802.15.4, RPL, LEACH, MQTT і CoAP. Досліджено: методи енергозбереження та оптимізації маршрутизації у сенсорних мережах; сучасні підходи до забезпечення інформаційної безпеки сенсорних систем; напрями інтеграції сенсорних мереж із технологіями Інтернету речей і штучного інтелекту; перспективи використання у промисловості, медицині, екологічному моніторингу та системах «розумного міста». Визначено ключові напрями наукової новизни: енергоефективні алгоритми, адаптивна маршрутизація та підвищення точності вимірювань у реальному часі. Оцінено перспективи використання сенсорних мереж у кіберфізичних системах та «розумних» інфраструктурах.

Ключові слова: бездротовий зв'язок, сенсорні вузли, маршрутизація, протоколи, IEEE 802.15.4, передача інформації.

Сенсорні мережі є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, оскільки забезпечують можливість автоматизованого збору, передачі, обробки та аналізу даних у режимі реального часу [1]. На сучасному етапі цифрової трансформації суспільства сенсорні мережі активно використовуються у промисловості, транспорті, медицині, військовій сфері, системах «розумного міста», екологічному моніторингу, аграрному секторі та критичній інфраструктурі [2]. Їх наукова новизна полягає не лише у створенні розподілених систем збору інформації, але й у формуванні нових підходів до побудови інтелектуальних середовищ, здатних самостійно аналізувати події, реагувати на зміни стану середовища та забезпечувати автономне функціонування без постійного втручання людини. Сенсорна мережа є сукупністю просторово розподілених сенсорних вузлів, які оснащені мікроконтролерами, модулями бездротового зв'язку, джерелами живлення та спеціалізованими датчиками для вимірювання фізичних параметрів, таких як температура, вологість, тиск, рівень освітлення, рух, концентрація газів, вібрація або біометричні показники. Основною особливістю таких мереж є здатність до самоорганізації, масштабованості та адаптації до змін умов функціонування [3].

Наукові дослідження у сфері сенсорних мереж спрямовані на вирішення проблем енергоефективності, підвищення надійності передачі даних, оптимізації маршрутизації, забезпечення кібербезпеки та інтеграції з технологіями штучного інтелекту. Одним із ключових напрямів досліджень є мінімізація енергоспоживання сенсорних вузлів, оскільки більшість з них працює від автономних джерел живлення [4]. Для цього застосовуються спеціальні алгоритми керування енергоресурсами, механізми переходу вузлів у режим сну, адаптивне регулювання потужності передавачів та енергоефективні протоколи маршрутизації. Значна увага приділяється використанню методів машинного навчання для прогнозування навантаження мережі, аналізу аномалій та автоматичного прийняття рішень. Інтеграція сенсорних мереж із технологіями Інтернету речей (IoT) створює передумови для формування кіберфізичних систем нового покоління, у яких фізичні процеси тісно взаємодіють із цифровими платформами обробки інформації [5].

Метою роботи є проведення аналізу принципів побудови та функціонування сенсорних мереж, дослідження сучасних технологій, методів і протоколів передачі даних, а також визначення перспектив розвитку та наукової новизни впровадження сенсорних мереж у сучасних інформаційно-комунікаційних системах. Об'єктом дослідження є сенсорні мережі як розподілені інформаційні системи збору, обробки та передачі даних. Предметом виступають технології бездротового зв'язку, методи організації роботи сенсорних вузлів, протоколи маршрутизації та передачі інформації, а також механізми забезпечення енергоефективності, надійності та безпеки функціонування сенсорних мереж.

Сучасні сенсорні мережі використовують різноманітні технології бездротового зв'язку залежно від вимог до швидкості передачі даних, дальності дії та енергоспоживання. Найбільш поширеними є технології ZigBee, Bluetooth Low Energy, Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT та 6LoWPAN [6]. Технологія ZigBee базується на стандарті IEEE 802.15.4 та характеризується низьким енергоспоживанням і підтримкою mesh-топології, що дозволяє забезпечувати самовідновлення мережі у випадку виходу окремих вузлів з ладу. Bluetooth Low Energy застосовується переважно у медичних та персональних сенсорних системах завдяки мінімальному споживанню енергії та високій сумісності з мобільними пристроями. LoRaWAN використовується для побудови мереж великого радіусу дії з низькою швидкістю передачі даних, що особливо ефективно для екологічного моніторингу та аграрного сектору. Технологія NB-IoT функціонує на базі інфраструктури стільникових операторів і забезпечує високу надійність зв'язку та підтримку великої кількості пристроїв у мережі.

Важливим елементом функціонування сенсорних мереж є використання спеціалізованих мережевих протоколів. На фізичному та каналному рівнях широко застосовується стандарт IEEE 802.15.4, який визначає механізми доступу до середовища передавання та формати кадрів для малопотужних бездротових мереж. На мережевому рівні використовуються протоколи маршрутизації RPL, AODV та LEACH [7]. Протокол RPL призначений для мереж із обмеженими ресурсами та забезпечує побудову оптимальних маршрутів на основі деревоподібної топології. Протокол LEACH реалізує кластерний підхід, у якому вузли об'єднуються у кластери з вибором головного вузла, що дозволяє суттєво знизити енергоспоживання мережі. На транспортному та прикладному рівнях активно застосовуються протоколи MQTT і CoAP, орієнтовані на роботу з малими обсягами даних та пристроями з обмеженими обчислювальними ресурсами. MQTT використовує модель publish/subscribe та забезпечує ефективну передачу повідомлень між сенсорними вузлами та серверними платформами. CoAP є спрощеним аналогом HTTP для IoT-систем і забезпечує мінімальні накладні витрати під час обміну даними [8].

Однією з актуальних проблем є забезпечення інформаційної безпеки. Через обмежені ресурси сенсорних вузлів традиційні механізми криптографічного захисту не завжди можуть бути ефективно реалізовані. Тому дослідження спрямовані на створення легковагових алгоритмів шифрування, систем автентифікації та методів виявлення атак у бездротових сенсорних мережах. Особлива увага приділяється захисту від атак типу «відмова в обслуговуванні», перехоплення пакетів, підміни вузлів та несанкціонованого доступу до мережевих ресурсів. Перспективним напрямом є використання блокчейн-технологій для децентралізованого управління сенсорними мережами та забезпечення цілісності даних.

Також сенсорні мережі активно досліджуються у контексті впровадження концепції «розумного міста». За допомогою розподілених сенсорних систем здійснюється моніторинг транспортних потоків, контроль стану дорожньої інфраструктури, автоматизація освітлення, управління енергоспоживанням будівель та контроль екологічних показників. У промисловості вони застосовуються для реалізації технологій Industry 4.0, дистанційного контролю обладнання та прогнозування аварійних ситуацій на основі аналізу телеметричних даних. У медицині бездротові сенсорні мережі використовуються для моніторингу фізіологічних параметрів пацієнтів, дистанційної діагностики та створення систем телемедицини. У сільському господарстві сенсорні мережі забезпечують автоматизований контроль вологості ґрунту, температури, стану посівів та оптимізацію систем зрошення.

У межах практичної реалізації концепції сенсорних мереж проведено експериментальне дослідження на базі університетського навчального корпусу з метою оцінювання ефективності застосування бездротової сенсорної мережі для моніторингу мікроклімату та енергоспоживання. Дослідження спрямоване на перевірку гіпотези про те, що впровадження розподіленої сенсорної системи дозволяє підвищити енергоефективність будівлі та забезпечити автоматизований контроль параметрів середовища в режимі реального часу.

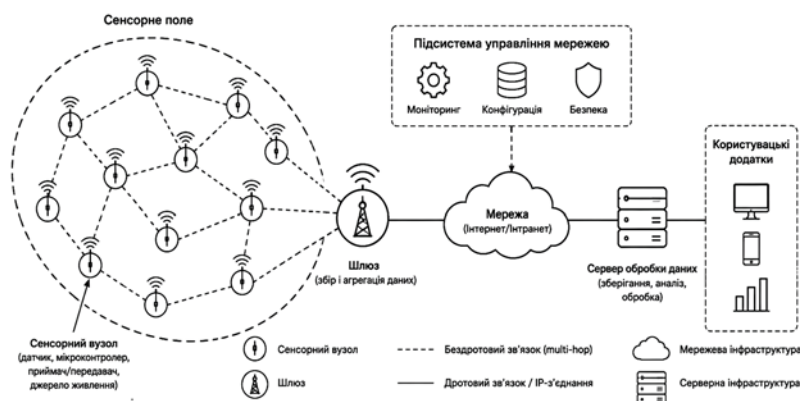


Рис.1. Загальна модель сенсорної мережі

Об'єктом дослідження виступала інфраструктура навчального корпусу університету, включно з аудиторіями, лабораторіями та коридорами. Предметом - стали параметри мікроклімату (температура, вологість, рівень CO₂, освітленість), а також енергоспоживання систем освітлення та вентиляції. Для реалізації експерименту розгорнуто сенсорну мережу, яка складалася з 48 сенсорних вузлів на базі мікроконтролерів ESP32 із підтримкою Wi-Fi та протоколу MQTT.

Вузли розміщені рівномірно по всіх приміщеннях корпусу з інтервалом 10–15 метрів. Центральний сервер обробки даних реалізовано на платформі Linux із використанням брокера повідомлень Mosquitto та бази даних InfluxDB для зберігання телеметричних даних. Кожен вузол виконував вимірювання наступних параметрів: температура T, °C; вологість H, %; концентрація CO₂ C, ppm та освітленість L, lux. Інтервал дискретизації вимірювань становив $\Delta t=10$ секунд.

У ході дослідження проведено порівняння двох режимів роботи інфраструктури: традиційного режиму з ручним керуванням освітленням і вентиляцією та інтелектуального режиму з автоматичним керуванням на основі даних сенсорної мережі та простих алгоритмів машинного навчання для прогнозування навантаження.

Результати експерименту (табл. 1, 2) показали, що впровадження сенсорної мережі дозволило знизити середнє енергоспоживання освітлювальних систем на 18–22%, а систем вентиляції на 12–15%. Також зафіксовано підвищення точності підтримання комфортних параметрів мікроклімату, температурні коливання зменшилися в середньому на 1,8 °C у порівнянні з базовим режимом.

Таблиця 1.

Середні значення параметрів мікроклімату

Параметр	До впровадження системи	Після впровадження	Відхилення	Покращення
Температура, °C	24.8	23.6	-1.2	стабілізація
Вологість, %	42.5	46.1	+3.6	покращення
CO ₂ , ppm	980	720	-260	значне зниження
Освітленість, lux	310	450	+140	оптимізація

Таблиця 2.

Показники енергоефективності

Система	Базове споживання, кВт·год	Після IoT, кВт·год	Економія, %
Освітлення	1240	990	20.2%
Вентиляція	860	745	13.4%
Загальне	2100	1735	17.4%

Додатково проведено аналіз надійності передачі даних, який показав, що використання протоколу MQTT із QoS-рівнем 1 забезпечує втрату пакетів не більше 1,3%, що є прийнятним для систем моніторингу в реальному часі (табл. 3). Дослідження енергоспоживання сенсорних вузлів, яке в середньому становило 0,8-1,2 мВт у режимі передачі даних та 0,05 мВт у режимі сну, підтвердило доцільність застосування енергоощадних алгоритмів.

Таблиця 3.

Параметри якості передачі даних

Показник	Кількість вузлів	Інтервал вимірювання	Втрати пакетів MQTT	Середня затримка	Надійність передачі
Значення	48	10 с	1.3%	120 мс	98.7%

Отримані результати підтверджують ефективність використання сенсорних мереж в освітніх установах для побудови «розумного кампусу», а також демонструють можливість масштабування запропонованого рішення на рівень університетської або міської інфраструктури.

Таким чином, сенсорні мережі виступають важливим об'єктом сучасних наукових досліджень та інноваційного розвитку інформаційних технологій. Їхня наукова новизна полягає у поєднанні розподілених обчислень, бездротових комунікацій, інтелектуального аналізу даних та автономного функціонування пристроїв. Подальший розвиток сенсорних мереж пов'язаний із впровадженням технологій штучного інтелекту, 5G/6G-комунікацій, квантових методів захисту інформації та хмарних платформ обробки даних, що створює передумови для формування високоєфективних кіберфізичних систем нового покоління.

References

1. Kirichek G., Tymoshenko V., Rudkovskiy O., Hrushko S. (2019) Decentralized System for Run Services. In: *CMIS-2019*, (pp.860-872).
2. El Khediri, S. (2022) Wireless sensor networks: a survey, categorization, main issues, and future orientations for clustering protocols. *Computing*, 104(8), (p.1775). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01071-8>.
3. Roberts M. K., Ramasamy, P. (2023) An improved high performance clustering based routing protocol for wireless sensor networks in IoT. *Telecommunication Systems*, 82(1), (p.45). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-022-00968-1>.
4. Behera T. M., Samal U. C., Mohapatra S. K., Khan M. S., Appasani B., Bizon N., Thounthong P. (2022) Energy-efficient routing protocols for wireless sensor networks: Architectures, strategies, and performance. *Electronics*, 11(15), 2282, (p.1-26). DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11152282>.
5. Babaker S., Khatibi A., Alsoud A. R., Kaur J., Jagtap J., Alkhayyat A., Shah S. K. (2025) Improving reliability and data management in internet of things based wireless sensor networks. *Internet Technology Letters*, 8(6), e646. DOI: <https://doi.org/10.1002/itl2.646>.
6. Mowla M. N., Mowla N., Shah A. S., Rabie K. M., Shongwe T. (2023) Internet of Things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: A survey. *IEEE Access*, 11, (pp.145813-145852). DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299>.
7. Cherappa V., Thangarajan T., Meenakshi Sundaram S. S., Hajje J., Munusamy A. K., Shanmugam R. (2023) Energy-efficient clustering and routing using ASFO and a cross-layer-based expedient routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, 23(5), 2788, (pp.1-15). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052788>.
8. Stangaciu V., Stangaciu C., Gusita B., Curia D. I. (2025) Integrating real-time wireless sensor networks into IoT using MQTT-SN. *Journal of Network and Systems Management*, 33(37), (pp.1-34). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10922-025-09916-1>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.12

**Halyna Kyrychek,
Mariia Tiahunova,
Dmytro Karnaukh**

SENSOR NETWORKS AS AN OBJECT OF SCIENTIFIC NOVELTY

This paper investigates sensor networks as an object of scientific novelty in the context of the development of modern information and communication technologies. The following are analyzed: architectures of sensor networks and principles of their functioning; modern wireless communication technologies, in particular ZigBee, LoRaWAN, Bluetooth Low Energy and NB-IoT; network protocols IEEE 802.15.4, RPL, LEACH, MQTT and CoAP. The following are investigated: methods of energy saving and routing optimization in sensor networks; modern approaches to ensuring information security of sensor systems; directions of integration of sensor networks with Internet of Things and artificial intelligence technologies; prospects for use in industry, medicine, environmental monitoring and "smart city" systems. The key areas of scientific novelty are identified: energy-efficient algorithms, adaptive routing and increasing the accuracy of real-time measurements. The prospects for using sensor networks in cyber-physical systems and "smart" infrastructures are assessed.

Keywords: wireless communication, sensor nodes, routing, protocols, IEEE 802.15.4, information transmission.

Відомості про автора / Information about the Author

Галина Киричек, канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна. E-mail: kirgal08@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0405-7122>.

Halyna Kyrychek, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Systems and Networks, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: kirgal08@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0405-7122>.

Марія Тягунова, канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна. E-mail: mary.tyagunova@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9166-5897>.

Mariia Tiahunova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Systems and Networks, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: mary.tyagunova@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9166-5897>.

Дмитро Карнаух, аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна. E-mail: d.karnaukh@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-2087-5222>.

Dmytro Karnaukh, PhD student of National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: d.karnaukh@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-2087-5222>.

© Г. Киричек, М. Тягунова, Д. Карнаух

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.13

Юрій Молодожон,
Валерій Ситніков

МОДЕЛІ ОПЕРАТИВНОГО ТЕЛЕМЕТРИЧНОГО ОБМІНУ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ У LORA MESH МЕРЕЖАХ НА БАЗІ MESHTASTIC В УМОВАХ GNSS-DEGRADATION

Розглянуто використання Meshtastic як резервного каналу зв'язку у системах мобільних платформ для забезпечення стійкого телеметричного обміну в умовах нестабільної мережевої інфраструктури та деградації GNSS.

Ключові слова: *Meshtastic, LoRa Mesh, мобільні платформи, телеметрія, GNSS-denied, distributed systems, smart city.*

Вступ

Сучасні розподілені системи моніторингу та керування мобільними та smart city платформами потребують забезпечення стійкого телеметричного обміну між платформами в умовах нестабільної або частково відсутньої мережевої інфраструктури [1, 2]. Особливо актуальною дана проблема є для комунальної сфери, де мобільні платформи здійснюють збір, передачу та обробку телеметричної інформації у динамічному міському середовищі.

Традиційні підходи на базі централізованих мереж передачі даних мають низку обмежень, пов'язаних із залежністю від GNSS, базових станцій та стабільного інтернет-з'єднання. В умовах GNSS-jamming, перевантаження мережі або часткового руйнування інфраструктури ефективність таких систем суттєво знижується [3].

Одним із перспективних напрямів є використання LoRa Mesh-мереж та платформи Meshtastic, яка реалізує багатохоповий обмін телеметричними даними між вузлами мережі без необхідності централізованої інфраструктури [4]. Особливістю Meshtastic є підтримка автономної mesh-взаємодії між вузлами, що дозволяє використовувати систему в умовах обмеженого зв'язку та деградації навігаційного забезпечення [5].

Проте для LoRa Mesh мереж залишається недостатньо дослідженим питання оптимальної щільності relay-вузлів у динамічному міському середовищі. Надмірне збільшення кількості relay-вузлів може призводити до зростання колізій, службового трафіку та затримок передачі, що негативно впливає на Packet Delivery Ratio та енергоефективність системи.

Метою роботи є дослідження залежності характеристик оперативного телеметричного обміну мобільних платформ від щільності relay-вузлів LoRa Mesh мережі на базі Meshtastic в умовах нестабільної мережевої інфраструктури, динамічної топології мережі та обмеженої доступності GNSS.

Архітектура телеметричного середовища

Запропонована архітектура системи передбачає використання мобільних платформ комунальної сфери, обладнаних Meshtastic-вузлами, GPS/GNSS-модулями, IMU-підсистемами та RFID-зчитувачами. Стаціонарні RFID-мітки можуть використовуватися не лише як ідентифікатори виконання завдання, та й як контрольні орієнтири для корекції навігаційних параметрів у випадку втрати GNSS-сигналу.

Передача телеметричної інформації здійснюється через Meshtastic-based LoRa Mesh мережу з підтримкою relay-вузлів та багатохопової маршрутизації [6,7]. Телеметричні дані передаються до диспетчерського або аналітичного центру, де формується цифровий двійник системи мобільних платформ та виконується аналіз стану мережі [8].

У роботі Meshtastic розглядається не як самостійний об'єкт дослідження, а як практична реалізація LoRa Mesh транспортно-середовища для оцінювання характеристик розподіленого телеметричного обміну.

Основними компонентами системи є:

1. мобільні платформи;

2. Meshtastic relay-вузли;
3. RFID-орієнтири;
4. GNSS та IMU-підсистеми;
5. центр обробки телеметрії;
6. цифровий двійник системи.

Формалізація моделей оперативного телеметричного обміну

Для оцінювання ефективності функціонування телеметричного середовища використано модель коефіцієнта доставки пакетів

Packet Delivery Ratio:

$$P_{delivered} = \frac{N_{received}}{N_{send}}$$

де:

$N_{received}$ – кількість отриманих пакетів;

N_{sent} – кількість переданих пакетів.

Час відновлення телеметричної синхронізації після втрати GNSS визначається як:

$$T_{recoveri} = t_{sync} + t_{routing} + t_{correction}$$

де:

t_{sync} – час повторної синхронізації;

$t_{routing}$ – час перебудови маршрутів;

$t_{correction}$ – час корекції навігаційних параметрів.

Окрему увагу приділено оцінюванню впливу кількості relay-вузлів на стійкість функціонування LoRa Mesh мережі. Для цього використано модель залежності ймовірності доставки пакетів від щільності relay-вузлів:

$$P_{success} = 1 - (1 - p)^n$$

де:

1. p – ймовірність успішної передачі через один relay-вузол;

2. n – кількість relay-вузлів у мережі.

Показник n у формулі - це абсолютна кількість ретрансляторів, що беруть участь у передачі. Але у фізичному сенсі під цим мається на увазі площа розміщення (щільність мережі) в обмеженому міському кварталі. Ми оцінюємо скільки саме вузлів потрібно розподілити на заданій площі Smart City, щоб отримати максимальний PDR, не перевантажуючи ефір колізіями. Запропонована модель дозволяє оцінювати вплив щільності relay-вузлів на ймовірність успішної доставки пакетів у межах локального міського сегмента мережі. При цьому збільшення кількості relay-вузлів підвищує просторову доступність мережі лише до певного граничного значення, після якого спостерігається зростання колізій та службового навантаження.

Результати чисельного оцінювання

У межах роботи проведено чисельне оцінювання функціонування Meshtastic-based LoRa Mesh мережі в умовах:

1. деградації GNSS;
2. зміни кількості relay-вузлів;
3. часткової втрати вузлів мережі;
4. динамічної зміни топології.

Аналіз проводився для різної щільності relay-вузлів та різних сценаріїв телеметричного навантаження мобільних платформ.

Таблиця 1.

Результати оцінювання Meshtastic-based LoRa Mesh мережі

Кількість relay-вузлів	Packet Delivery Ratio	Середня затримка передачі	Споживання енергії	Час відновлення GNSS
3	0.909	0.52 с	27.35 мАг/год	4.02 с
5	0.981	0.81 с	31.95 мАг/год	3.11 с
8	0.999	1.24 с	38.85 мАг/год	3.54 с
12	0.939	2.68 с	48.05 мАг/год	4.31 с

Результати показують наявність нелінійної залежності між щільністю relay-вузлів та якістю телеметричного обміну. Збільшення кількості relay-вузлів від 3 до 8 забезпечує зростання Packet Delivery Ratio завдяки

покращенню зв'язності мережі. Проте подальше збільшення кількості relay-вузлів до 12 призводить до погіршення характеристик через перевантаження ефіру, збільшення кількості retransmission та зростання колізій.

Саме по собі час захоплення сигналів супутниковим приймачем є незмінним і визначається фізичними обмеженнями GPS/GNSS. У звичайних умовах після виходу з зони глушення приймач змушений виконувати "холодний старт". Оскільки швидкість передачі службових даних (альманахів та ефемерид) безпосередньо зі супутників є вкрай низькою (всього 50 біт/с), процес відновлення позиціонування "з нуля" триває від 30 секунд до кількох хвилин, протягом яких рухома платформа залишається "сліпою".

Проте в нашій системі наземна **LoRa Mesh-мережа (на базі Meshtastic)** виступає в ролі **інфраструктури навігаційної підтримки**. Ноди мережі, які перебувають поза зонами радіоелектронного придушення, локально транслюють на платформу необхідні асистуючі дані для прискореного позиціонування (A-GPS поправки, диференційні корекції та координати базових RFID-орієнтирів). Це переводить старт приймача у "гарячий" режим, але швидкість доставки цих пакетів підтримки прямо залежить від конфігурації мережі.

Отримані результати показали, що збільшення кількості relay-вузлів позитивно впливає на Packet Delivery Ratio та стійкість телеметричного середовища, однак призводить до зростання енергоспоживання системи. При цьому використання Meshtastic дозволяє забезпечити підтримку оперативного телеметричного обміну навіть у випадках часткової втрати GNSS та деградації мережевої інфраструктури.

Моделювання відображає критеріальні та відносні залежності, що відображають внутрішню логіку протоколу Meshtastic.

Моделювання показало збереження якісного характеру залежностей між щільністю relay-вузлів, Packet Delivery Ratio та затримками передачі при зміні параметрів мережі, що свідчить про можливість адаптації запропонованого підходу до систем різного масштабу. При зміні фізичних параметрів компонентів (наприклад, при збільшенні потужності передавачів або зміні чутливості антен) якісне співвідношення характеристик мережі, таких як точка оптимуму PDR та характер наростання затримок, зберігається. Змінюється лише просторово-часовий масштаб досліджуваної системи, що дозволяє екстраполювати отримані теоретичні результати на реальні фізичні об'єкти різної потужності.

Висновки

У роботі запропоновано моделі та методи оперативного телеметричного обміну мобільних платформ на базі Meshtastic та LoRa Mesh. Використання Meshtastic як резервного каналу зв'язку дозволяє забезпечити стійкий багатохоповий обмін телеметричними даними між мобільними платформами в умовах динамічної топології мережі та обмеженої доступності GNSS.

Формалізовано моделі оцінювання Packet Delivery Ratio, енергоспоживання relay-вузлів та часу відновлення телеметричної синхронізації. Запропонований підхід може бути використаний у розподілених системах моніторингу та керування транспортом, smart city платформах та системах оперативного керування мобільними платформами комунальної сфери.

Встановлено наявність оптимальної щільності relay-вузлів LoRa Mesh мережі, при якій забезпечується максимальний Packet Delivery Ratio за прийнятного рівня затримок та енергоспоживання.

References

1. Molodozhon, Y. M., Sytnikov, V. S., & Vodichev, V. A. (2025). Models and methods of operational control and remote monitoring of mobile platforms. *Electrotechnic and Computer Systems*, 120(44), 29–41. <https://doi.org/10.15276/eltecs.44.120.2025.4>
2. Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.010>
3. Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6), 6–28. <https://doi.org/10.1109/MWC.2004.1368893>
4. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
5. Meshtastic Project. (2025). Meshtastic documentation. Meshtastic. <https://meshtastic.org/docs/getting-started>
6. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
7. Misra, S., Woungang, I., & Misra, S. C. (Eds.). (2009). *Guide to wireless ad hoc networks*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-328-6>
8. Chen, M., Mao, S., & Liu, Y. (2014). Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 19(2), 171–209. <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.13

Yurii Molodozhon,
Valerii Sytnikov

MODELS OF OPERATIONAL TELEMETRY EXCHANGE FOR MOBILE PLATFORMS IN MESHTASTIC-BASED LORA MESH NETWORKS UNDER GNSS-DEGRADED CONDITIONS

The paper presents a model of operational telemetry exchange for mobile platforms in Meshtastic-based LoRa Mesh networks under unstable network infrastructure and GNSS-degraded conditions.

Keywords: *Meshtastic, LoRa Mesh, mobile platforms, telemetry exchange, GNSS-denied environments, distributed systems, smart city systems.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Юрій Молодожон, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна, E-mail: 4852185@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0002-1881-9498>.

Yurii Molodozhon, Postgraduate student Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University, Ukraine, E-mail: 4852185@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0002-1881-9498>.

Валерій Ситніков, д. т. н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, Навчально-науковий інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка»; м. Одеса, Україна, E-mail: sitnikov@op.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>.

Valerii Sytnikov, Dr. of Technical Science, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University; Shevchenko Ave., 1, Odesa, 65044, Ukraine, E-mail: sitnikov@op.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>.

© Ю. Молодожон, В. Ситніков

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.14

Катерина Обухова

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ РУХОМИХ БАГАТОЯДЕРНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

У тезах розглядаються сучасні апаратні засоби та програмні методи, що забезпечують автономний моніторинг і навігацію рухомих багатоядерних комп'ютерних систем, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Основна увага зосереджена на функціонуванні таких систем в умовах відсутності або нестабільності сигналу GPS під час інспекції складної критичної інфраструктури та проведення пошуково-рятувальних операцій.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА), відсутність GPS, візуально-інерційна одометрія, категоризація об'єктів, багатоядерний процесор, ультразвукові датчики, комп'ютерний зір.

Стрімке зростання використання мобільних комп'ютерних систем охоплює сфери доставки на вимогу, медичних послуг, точного землеробства та моніторингу довкілля [7]. Особливої уваги заслуговує застосування БПЛА для обстеження складних технічних конструкцій (СТК), таких як мости, трубопроводи, вітрові турбіни, нафтогазові резервуари та підземні гірничі виробки, що вимагає ідеальної стабільності польоту [1, 9, 11].

Більшість сучасних систем покладаються виключно на глобальні супутникові системи (GPS), проте їх сигнал різко погіршується біля стін будівель чи в приміщеннях [4]. Найнебезпечнішим для автономної навігації є явище багатопроменевого поширення («GPS multipathing»), коли сигнали відбиваються від великих бетонних чи металевих об'єктів, надаючи бортовому комп'ютеру хибну інформацію про координати. У зонах критичної інфраструктури сигнал також може бути приглушеним засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) [8]. Як альтернативу промисловість використовує оптоволоконні дрони, що отримують живлення через кабель, проте їх радіус дії жорстко лімітований, а при інспекції турбін чи мостів існує високий ризик заплутування кабелю. Тому виникає гостра потреба у розробці повністю автономних методів моніторингу.

Апаратні засоби моніторингу. Ефективність автономного моніторингу залежить від правильно підібраної апаратної архітектури, яка має враховувати обмеження щодо ваги та енергоспоживання рухомої платформи.

Багатоядерні обчислювальні платформи: Головним обчислювальним ядром таких систем виступають мікрокомп'ютери, що здійснюють периферійні обчислення (edge-computing). Для забезпечення паралельної обробки даних телеметрії, одометрії та нейромереж найдоцільніше використовувати багатоядерні платформи сімейства Raspberry Pi (зокрема, Raspberry Pi 4 Model B або Raspberry Pi 5) [6]. Новітні покоління забезпечують значний приріст продуктивності завдяки оновленим графічним процесорам та підтримці шини PCIe.

Засоби енергонезалежності: Для автономного живлення обчислювальної платформи незалежно від основної батареї БПЛА застосовуються плати розширення UPS HAT з літій-іонними акумуляторами (наприклад, формату 18650), що здатні підтримувати роботу системи до 2 годин.

Сенсорне оснащення: Для збору метричних даних на невеликих дистанціях (до 450 см) у вузьких коридорах використовуються ультразвукові датчики HC-SR04 [2, 11]. Для більш швидкісного сканування або вимірювань на більших дистанціях можуть застосовуватися лазерні далекоміри, такі як TFmini-S LiDAR.

Для реалізації мобільної системи був обраний квадрокоптер DJI Phantom 4 [5]. Оскільки його вантажопідйомність становить орієнтовно 0,25–0,3 кг, загальна маса зовнішньої апаратної платформи має суворо вписуватися в ці рамки. Для мінімізації ваги всі кріплення були змодельовані та виготовлені на 3D-принтері у вигляді модульних елементів.

Головним обчислювальним ядром розробленої системи виступають одноплатні комп'ютери сімейства Raspberry Pi, що відповідають за локальні периферійні обчислення (edge-computing) на борту. Багатоядерна архітектура дозволяє паралельно виконувати збір телеметрії, розрахунок одометрії та роботу нейромереж.

Таблиця 1

Порівняння основних характеристик одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi [6]

Характеристика	Raspberry Pi 3 Model B	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi 5
Процесор	ARM Cortex-A53	ARM Cortex-A72	ARM Cortex-A76
Кількість ядер	4	4	4
Тактова частота, ГГц	1,2	до 1,5	до 2,4
Оперативна пам'ять, Гбайт	1	до 4	до 8
Архітектура	ARMv8	ARMv8	ARMv8-A

Для забезпечення розпізнавання об'єктів у реальному часі найдоцільніше використовувати Raspberry Pi 4 або Raspberry Pi 5, оскільки останній забезпечує приріст продуктивності у 2–3 рази. Щоб гарантувати енергонезалежність мікрокомп'ютера від основного акумулятора дрона, застосовано плату розширення UPS HAT із двома літій-іонними акумуляторами 18650, що забезпечує близько 2 годин автономної роботи (при споживанні 7 Вт).

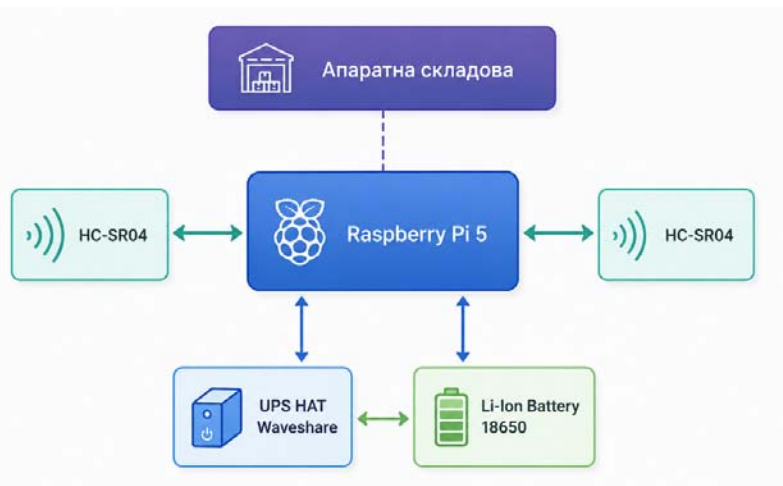


Рис. 1. Концептуальна схема апаратної складової

Схема (рис. 1) ілюструє інтеграцію БПЛА DJI Phantom з багатоядерною платформою Raspberry Pi, що живиться від незалежного модуля UPS HAT та збирає дані з оптичних і ультразвукових сенсорів для паралельної обробки просторової та візуальної інформації.

Методи навігації та збору просторових даних. В умовах недоступності GPS-сигналів традиційна інерційна одометрія страждає від накопичення похибок. Тому ключовим методом локалізації рухомих систем є візуально-інерційна одометрія (англ. Visual-Inertial Odometry, VIO) [3, 4, 8]. Цей метод синергетично поєднує дані інерціальних вимірювальних пристроїв (IMU) із візуальною інформацією від стереокамер. Безперервний аналіз зміщення пікселів на зображенні дозволяє системі жорстко утримувати свою позицію в повітрі, оминати перешкоди та здійснювати 3D-навігацію абсолютно автономно.

Для вимірювання відстаней у вузьких коридорах СТК використовують ультразвукові сенсори HC-SR04, які випромінюють імпульси частотою 40 кГц [2]. Через інерційність датчиків оптимальна швидкість БПЛА повинна становити 1,5–2,8 м/с (5–10 км/год). Зібрані масиви просторових даних локально зберігаються у базах даних SQLite. Надалі ці дані імпортуються у середовище Maple Software, де алгоритми порівнюють фактичні відстані з еталонними значеннями об'єктів. Використання спеціального колірного кодування (наприклад, червоний для вибоїн, синій для виступів, сірий для наскрізних отворів) дозволяє миттєво візуалізувати та оцінювати технічний стан конструкцій [11].

Методи візуального аналізу та комп'ютерного зору. Для виконання складних завдань, таких як пошуково-рятувальні операції (SAR), рухомі комп'ютерні системи використовують алгоритми глибокого машинного навчання на основі згорткових нейронних мереж (CNN) [10].

Замість ресурсомісткої повної ідентифікації об'єктів застосовується метод первинної категоризації за класами («люди», «тварини», «будівлі»). Враховуючи апаратні обмеження багатоядерних одноплатних комп'ютерів, використовується оптимізований фреймворк TensorFlow Lite та архітектура GoogLeNet (InceptionV3) [7]. Впровадження згорткових шарів розміром 1x1 дозволяє суттєво зменшити розмірність просторових даних, заощаджуючи обчислювальний час процесора без втрати точності, яка сягає 99%. Нижче наведена структурна схема (flowchart) роботи алгоритму під час польоту (рис. 2).

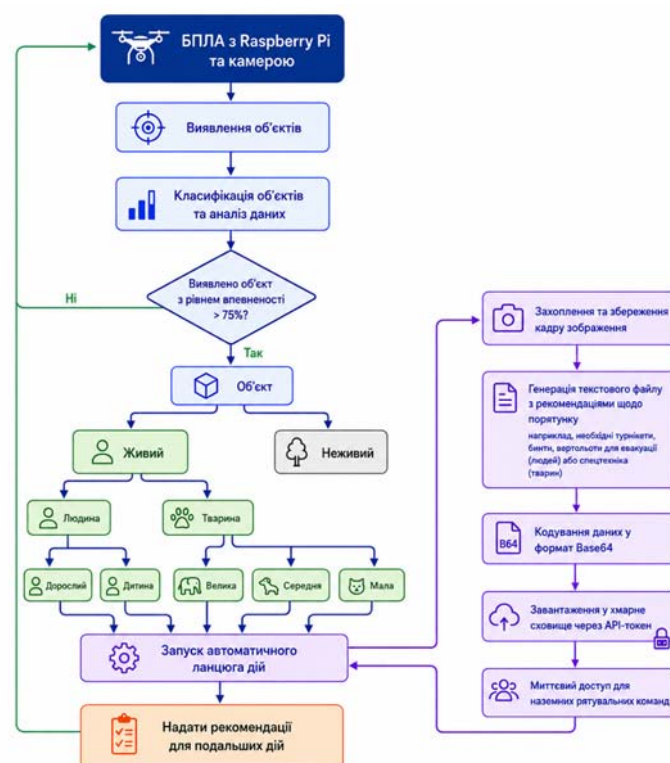


Рис. 2. Структурна схема алгоритму розпізнавання та автоматичного сповіщення під час SAR-місії

Як видно зі схеми, якщо алгоритм розпізнає об'єкт цільового класу з рівнем імовірності понад 75%, система ініціює автоматичний ланцюжок дій. Спочатку захоплюється та зберігається кадр зображення, після чого генерується текстовий файл із рекомендаціями щодо порятунку (наприклад, потреба у джгутах, пов'язках та гелікоптерах для евакуації людей, або спеціальних переносках для тварин). На фінальному етапі система кодує ці дані у формат base64 і за допомогою API-токену автоматично завантажує їх у хмарний репозиторій, забезпечуючи миттєвий доступ наземних рятувальних команд до критичної інформації.

Висновки. Інтеграція технологій візуально-інерційної одометрії (VIO), метричного ультразвукового сканування та алгоритмів комп'ютерного зору (TensorFlow Lite, InceptionV3) формує потужну основу для моніторингу рухомих багатоядерних комп'ютерних систем. Делегування складних обчислювальних завдань на багатоядерні платформи серії Raspberry Pi 4 та 5 дозволяє ефективно здійснювати розпізнавання об'єктів, математичне моделювання структурних дефектів та навігацію в режимі реального часу, роблячи такі системи повністю автономними від сигналів GPS та здатними працювати у найнебезпечніших умовах.

References

1. Damage detection and analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetry method / L. Lobanov et al. Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.008>.
2. Kravchenko P., Zhuravska I., Obukhova K. Dataset of building parameters collected by UAV with wireless data transfer from IoT ultrasonic sensors and a single-board computer for 2D/3D modeling : dataset. Mendeley Data. Publ. Apr. 29, 2025. V. 1. DOI: 10.17632/6zj7tj6xtn.1.

3. Kühne J., Magno M., Benini L. Low Latency Visual Inertial Odometry with On-Sensor Accelerated Optical Flow for Resource-Constrained UAVs. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 25, Is. 5. P. 7838–7847. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3406948.
4. Lu Z., Liu F., Lin X. Vision-based localization methods under GPS-denied conditions. arXiv preprint. Nov., 2022 (Preprint). DOI: 10.48550/arXiv.2211.11988.
5. P4 RTK - Technische Daten - DJI. *DJI*. URL: <https://ag.dji.com/phantom-4-rtk/specs> (Last accessed: 28.05.2026).
6. Raspberry Pi 5. *Datasheets.raspberrypi.com*. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf> (Last accessed: 28.05.2026).
7. Ravikumar I., Sundhar R., Vijayakumar N. Design and Structural Validation of a Micro-UAV with On-Board Dynamic Route Planning. Oct., 2025 (Preprint). DOI: 10.48550/arXiv.2510.21648.
8. ROS and VIO tracking camera for non-GPS Navigation. *ArduPilot*. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/ros-vio-tracking-camera.html>. (Last accessed: 28.05.2026).
9. Umanets I., Basarab V. Monitoring of the technical condition of buildings and structures under operational conditions. *Ways to Improve Construction Efficiency*. 2023. Vol. 1, no. 51. P. 194–205. DOI: 10.32347/2707-501x.2023.51(1).
10. Yeom S. Thermal Image Tracking for Search and Rescue Missions with a Drone. *Drones*. 2024. Vol. 8, Is. 2. Art. 53. DOI: 10.3390/drones8020053.
11. Кравченко П., Обухова К. Апаратно-програмні засоби для моделювання та виявлення дефектів у технічних конструкціях. Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій : матер. конф. XXV Всеукр. наук.-техн. конф. мол. вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 17–18 квіт. 2025 р. Одеса : Одеський нац. технол. ун-т, 2025. С. 119–121. URL: https://ontu.edu.ua/download/konfi/2025/Conference_abstract-IT-2025.pdf (дата звернення: 27.04.2026).

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.14

Kateryna Obukhova

METHODS AND MEANS OF MONITORING MOBILE MULTICORE COMPUTER SYSTEMS

These abstracts examine modern hardware and software methods that ensure autonomous monitoring and navigation of mobile multicore computer systems, particularly unmanned aerial vehicles (UAVs). The main focus is on the functioning of such systems in GPS-denied environments or unstable signal conditions during the inspection of complex critical infrastructure and search and rescue operations.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs), GPS-denied environments, visual-inertial odometry, object categorization, multicore processor, ultrasonic sensors, computer vision.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Катерина Обухова, аспірант, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kateryna.obukhova@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8793-7055>.

Kateryna Obukhova, PhD student, Senior Lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kateryna.obukhova@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8793-7055>.

© К. Обухова

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI DOI 10.34132/mspc2026.02.06.15

Олег Прищепов,
Володимир Шенкевич,
Максим Данилюк

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛА АВАРІЙНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В УМОВАХ ЧНУ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

В сучасних умовах забезпечення стабільної подачі електричної енергії має першочергове значення для нормальної роботи будь якого закладу, зокрема навчального. В Чорноморському національному університеті імені Петра Могили дизель-генераторна установка використовується як резервне джерело живлення. В рамках створення гібридної сонячної електростанції проводиться дослідження енергоефективності роботи цієї установки. Розглянуто енергетичний баланс дизельного двигуна, напрямки теплових втрат і досліджені можливі способи використання тепла, що втрачається під час роботи. Запропоновані два напрямки утилізації теплових втрат дизель-генераторної установки через використання утилізатора теплоти вихідних газів і через використання теплообмінника в системі охолодження двигуна. Теплообмінник вбудовується в систему опалення корпусів університету через перехідну схему, яка дозволяє регулювати його використання в автоматичному режимі. в умовах університету запропоновані робочі схеми використання і утилізації цього тепла, надано опис роботи та складові цих схем. Розглянуто перспективи подальших досліджень, зокрема використання ДГУ для проведення лабораторних та науково-дослідних робіт в підготовки фахівців технічних спеціальностей.

Ключові слова: резервне джерело живлення, дизель-генератор, утилізатор димових газів, теплообмінник, система опалення.

У сучасних умовах енергетика швидко змінюється, і все більше об'єктів намагаються поєднувати різні джерела живлення, щоб не залежати від однієї системи. На практиці доволі часто використовують гібридні рішення, де, наприклад, сонячна електростанція працює разом із дизель-генератором. Сонячна енергія сама по собі є дешевою та екологічною, але її робота сильно залежить від погоди – у похмурі чи зимові дні генерація помітно падає. Через це доводиться підстраховуватися дизель-генератором, який може забезпечити потрібну потужність у будь-який момент, хоча він і споживає паливо та має свої експлуатаційні витрати.

Дизель-генераторна установка (ДГУ) використовується як резервне або автономне джерело живлення, яке може виручити в моменти, коли сонячна електростанція не виробляє достатньо енергії або коли зовнішня мережа взагалі недоступна. У гібридних системах вона фактично виконує роль «підстрахування», компенсуючи різкі зміни навантаження і забезпечуючи стабільну роботу всього обладнання.

В ЧНУ імені Петра Могили встановлена дизель-генераторна установка моделі BB-110 фірми EMSA Jenerator (Туреччина). ДГУ належить до сімейства потужних промислових пересувних генераторних одиниць первинної електроенергії. Агрегат розроблений на основі багаторічного досвіду експлуатації генераторних установок і є ефективним і надійним джерелом електроенергії.

Тепловий баланс дизельного двигуна потужністю (80 – 100) кВт наступний: корисна робота – (35 – 45) %; втрати з відпрацьованими газами – (25 – 35)%; втрати в системі охолодження – (20 – 30)%; втрати на тертя і випромінювання – (5 – 10)%. Загальні втрати тепла при згорянні палива – (240 – 280) кВт.

На основі наведеної вище інформації отримаємо орієнтовний розподіл енергії для дизель-генератора потужністю 100 кВт (ККД = 40%): корисна робота – 100 кВт; відпрацьовані гази (75 – 80) кВт; система охолодження – (60 – 65) кВт; тертя та випромінювання – (10 – 15) кВт. Загальна середня теплова потужність палива – 250 кВт

Тобто втрати енергії з газами і охолоджуючою рідиною становлять до 60 % відсотків і це тепло потрібно корисно використовувати.

В Чорноморському національному університеті імені Петра Могили розроблені схеми утилізації тепла, які представлені на рис.1 та рис.2.

Утилізація теплоти випускних газів На рис.1 показана схема використання теплоти відпрацьованих газів дизеля для нагріву води в бойлері роздягальні спортзалу - 2 протягом навчального року.

Для цього використовується утилізатор димових газів УДГ-1 промислового виробництва (Монастирищенський завод котельного обладнання, Черкаська обл.). Він встановлюється на випускній трубі дизель-генератора, де температура газів досягає приблизно 300 градусів за Цельсієм залежно від режиму роботи двигуна. Для забезпечення герметизації газовипускної системи планується виготовити та встановити на УДГ-1 спеціальні перехідні фланці.

Утилізатор димових газів типу «УДГ» складається з металевого короба з фланцями прямокутної форми для входу і виходу продуктів згоряння. Усередині короба розташовані сталеві труби з алюмінієвими ребрами, в яких нагрівається поступаюча протічечією по відношенню до напрямку випускних газів вода. Температура води регулюється кількістю поданих продуктів згоряння. Утилізатор встановлюється на вирівняний бетонований майданчик або на основу з металоконструкцій.

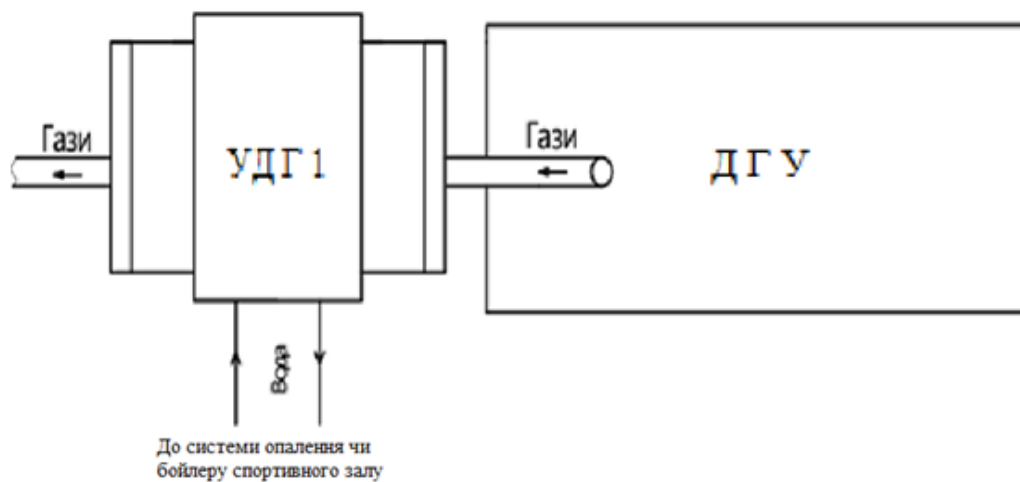


Рис. 1. Схема використання У Д Г

Утилізація тепла системи охолодження

На рис.2 показана схема використання тепла системи охолодження двигуна для підігріву води в системі опалення університету. Для цього використовується пластинчастий теплообмінник IMS B3-020-40 3/4 (Польща).

Паяні пластинчасті теплообмінники призначені для передачі тепла від одного теплоносія до іншого через поверхню пластин. Вони забезпечують міцну монолітну конструкцію, оскільки складаються з рифлених пластин із нержавіючої сталі, спаяних міддю у вакуумній печі. При виробництві кожна наступна пластина повернута на 180 градусів відносно попередньої, що сприяє значній турбуленції потоків і забезпечує ефект самоочищення теплообмінника. Це також гарантує протіток робочих рідин, що забезпечує виняткову ефективність теплообміну навіть за низьких швидкостей потоків. Теплообмінник IMS B3-020-40 3/4 підходить для систем із фреоном, водою, антифризом та іншими середовищами.

В систему охолодження дизель-генератора (ДГУ) перед радіатором на вході і виході вбудовані два триходові клапани (K1 та K2), які скрізь гумові шланги (П1 та П2) можуть подавати охолоджуючу рідину замість радіатора в теплообмінник Т1, після чого через фільтр Ф1 вона повертається в дизель-генератор. Через теплообмінник Т1 від батареї опалювання, яка встановлена в приміщенні поруч з дизель-генератором, через фільтр Ф2 проходить вода системи опалення університету і повертається в котельню університету, що підігріває воду на вході в котел та забезпечує економію палива.

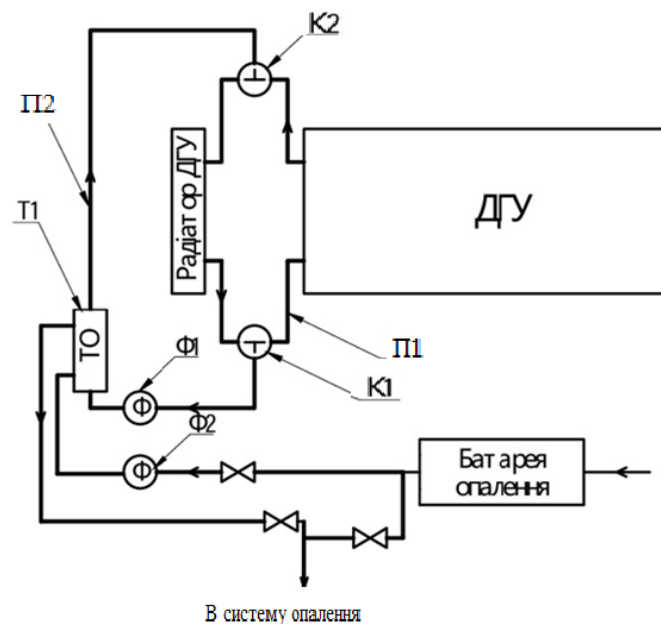


Рис. 2. Схема використання тепла системи охолодження двигуна

Якщо опалювальна система університету не працює, триходові клапани K1 та K2 пропускають охолоджуючу рідину через радіатор дизель-генератора, який забезпечує його штатне охолодження.

Монтаж УДГ-1 і системи теплообмінника надає економію електроенергії в університеті.

При подальшому дослідженні всіх процесів, які проходять на даному додатковому устаткуванні, буде надана методика розрахунку економічної ефективності та можливо більш удосконалені елементи системи.

Дуже привабливим та перспективним постає використання ДГУ для проведення лабораторних та науково-дослідних робіт в підготовки фахівців технічних спеціальностей в умовах закладів вищої освіти України.

References

1. Herasymov H.H. Teoretychni osnovy teplotekhniki. Navch. posibnyk. – Rivne: NUVHP, 2011. – 382 s. [Gerasimov G.G. Theoretical foundations of heat engineering. Textbook. – Rivne: NUVGP, 2011. – 382 p.] [in Ukrainian].
2. Horobets' V.H. Osnovy teplotekhniki: navch. posib. – Kyiv: Komprint, 2019. – 403 s. [Gorobets V.G. Fundamentals of heat engineering: a textbook. – Kyiv: Komprint, 2019. – 403 p.] [in Ukrainian].
3. Dem'yanchuk YA.M. Termodinamika, teploperedacha i teplosylovi ustanovky: Metodychni vkazivky dlya samostiynoyi roboty studentiv spetsial'nosti «Naftohazova inzheneriya ta tekhnolohiyi». – Ivano-Frank.: IFNTUNH, 2017. – 83 s. [Dem'yanchuk YA.M. Thermodynamics, heat transfer and heat power plants: Methodological guidelines for independent work of students specializing in "Oil and gas engineering and technology". – Ivano-Frank.: IFNTUNH, 2017. – 83 p.] [in Ukrainian].
4. Konstantinov S. M., Panov YE. M. Teoretychni osnovy teplotekhniki: pidruchnyk. – K.: Zoloti vorota, 2012. – 592 s. [Konstantinov S. M., Panov YE. M. Theoretical foundations of heat engineering: textbook. – K.: Zoloti vorota, 2012. – 592 p.] [in Ukrainian].
5. Myronov O.S., Bryzha M.R., Boyko V.B., Zolotovs'ka O.V. Teplotekhnika: osnovy termodynamiky, teoriya teploobminu, vykorystannya teploty v sil's'komu hospodarstvi. – Dnipropetrovs'k: TOV «ENEM», 2011. – 424s. [Mironov O.S., Bryzha M.R., Boyko V.B., Zolotovska O.V. Heat engineering: fundamentals of thermodynamics, theory of heat transfer, use of heat in agriculture. – Dnipropetrovsk: LLC «ENEM», 2011. – 424p.] [in Ukrainian].
6. Obertyukh R. R., Slabky A. V. Teoretychni osnovy teplotekhniki: Elektronnyy navchal'nyy posibnyk 2-he vyd., pererob. ta dop. – Vinnytsya: VNTU, 2020. – 180 s. [Obertyukh R. R., Slabky A. V. Theoretical foundations of heat engineering: Electronic textbook 2nd ed., revised and supplemented. – Vinnytsia: VNTU, 2020. – 180 p.] [in Ukrainian].
7. Spivak O. YU., Rezydent N. V. Teplomasoobmin. Chastyna I. Navchal'nyy posibnyk. – Vinnytsya: VNTU, 2021. – 113 s. [Spivak O. Yu., Resident N. V. Heat and mass transfer. Part I. Textbook. – Vinnytsia: VNTU, 2021. – 113 p.] [in Ukrainian].

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.15

Oleg Pryshchepov,
Volodymyr Shenkevych,
Maksym Danyliuk

**HEAT UTILIZATION OF EMERGENCY DIESEL GENERATOR
IN THE CONDITIONS OF THE PETRO MOHYLA BLACK SEA NATIONAL UNIVERSITY.**

In modern conditions, ensuring a stable supply of electricity is of paramount importance for the normal operation of any institution, in particular an educational one. At the Petro Mohyla Black Sea National University, a diesel generator set is used as a backup power source. As part of the creation of a hybrid solar power plant, a study of the energy efficiency of this unit is being conducted. The energy balance of a diesel engine, the directions of heat losses and possible ways of using the heat lost during operation are considered. Two directions of utilization of heat losses of a diesel generator set are proposed through the use of an exhaust gas heat utilizer and through the use of a heat exchanger in the engine cooling system. The heat exchanger is built into the heating system of the university buildings through a transitional scheme, which allows you to regulate its use in automatic mode. Working schemes for the use and utilization of this heat in the conditions of the university are proposed, a description of the work and components of these schemes is provided. Prospects for further research are considered, in particular the use of DGU for laboratory and research work in the training of specialists in technical specialties.

Key words: backup power source, diesel generator, flue gas recycler, heat exchanger, heating system.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олег Прищепов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри АКІТ, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: priof@ukr.net , orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9608-2703>.

Oleg Pryshchepov, PhD, Associate Professor of Automation and Computer-Integrated Technologies Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, E-mail: priof@ukr.net , orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9608-2703>.

Володимир Шенкевич, старший викладач кафедри АКІТ, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: vlnshenk@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6919-8559>.

Volodymyr Shenkevych, Senior lecturer of the Department of automation and computer-integrated technologies of the Faculty of computer science of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: vlnshenk@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6919-8559>.

Максим Данилюк, студент 1 курсу спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» Чорноморського національного університету імені Петра Могили. м. Миколаїв, Україна. E-mail: rrhhh58@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6057-7034>.

Maksym Danyliuk, 1th year student of the specialty "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics" of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: rrhhh58@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6057-7034>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.16

Сергій Пузирьов

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАСШТАБУВАННЯ МІКРОСЕРВІСНИХ АРХІТЕКТУР НА ОСНОВІ ХМАРНИХ РІШЕНЬ

У тезах розглянуто підхід до балансування навантаження у мікросервісних архітектурах на основі методу *Adaptive Smart Load Balancing*. Запропонований метод поєднує моніторинг метрик (CPU, RAM, затримки) у реальному часі, AI-прогнозування навантаження, динамічний розподіл трафіку та автоматичне масштабування (*Auto Scaling*), а також передбачає мінімізацію затримок при виборі ефективного вузла для виконання запиту. *ASLB* мінімізує час відгуку, підвищує відмовостійкість, оптимізує використання ресурсів і є найбільш ефективним для *Kubernetes*-класстерів та високонавантажених веб-сервісів.

Ключові слова: мікросервісна архітектура, балансування навантаження, *Round Robin*, *Least Connection*, *IP Hash*, *Adaptive Smart Load Balancing*, *Auto Scaling*, моніторинг метрик, *Service Discovery*.

У сучасних мікросервісних архітектурах (МА) застосунки складаються з великої кількості незалежних сервісів, які одночасно обробляють тисячі або мільйони запитів. Через нерівномірне навантаження окремі сервіси можуть перевантажуватись, що призводить до:

1. збільшення часу відповіді;
2. втрати продуктивності;
3. появи помилок;
4. відмови окремих компонентів системи.

Основна проблема балансування навантаження полягає у правильному та своєчасному розподілі мережевого трафіку між екземплярами сервісів у динамічному хмарному середовищі.

Класичні методи балансування, такі як *Round Robin*, *Least Connections*, *IP Hash* тощо мають низку недоліків, а саме:

1. не враховують поточний стан сервісів;
2. не аналізують навантаження в реальному часі;
3. не здатні прогнозувати перевантаження;
4. повільно реагують на різкі зміни трафіку;
5. потребують складного ручного налаштування.

У хмарних мікросервісних системах ситуація ускладнюється через динамічне створення контейнерів, автоматичне масштабування, постійні зміни мережевої топології, високу кількість міжсервісних запитів тощо.

У результаті навіть при наявності балансувальника можливі:

1. перевантаження окремих вузлів;
2. неефективне використання ресурсів;
3. затримки обробки запитів;
4. зниження доступності системи.

У таблиці 1 приведено порівняння різних методів балансування.

Таблиця 1.

Порівняльна таблиця методів балансування навантаження у МА

Метод	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Round Robin	Послідовний розподіл запитів між серверами	Простота реалізації; рівномірний розподіл	Не враховує навантаження серверів
Least Connections	Запити направляються на сервер з найменшою кількістю активних з'єднань	Краще врахування навантаження	Складніше адміністрування
IP Hash	Маршрутизація за IP-адресою клієнта	Підтримка сесій користувачів	Нерівномірний розподіл навантаження
Weighted Round Robin	Розподіл з урахуванням ваг серверів	Гнучкість конфігурації	Потребує ручного налаштування
Dynamic Load Balancing	Аналіз поточного стану серверів у реальному часі	Висока ефективність	Вища складність реалізації

У даній роботі запропоновано метод адаптивного інтелектуального балансування навантаження (**Adaptive Smart Load Balancing, ASLB**). Цей метод поєднує:

1. автоматичне горизонтальне масштабування;
2. аналіз поточного навантаження;
3. прогнозування перевантаження;
4. динамічний розподіл трафіку між сервісами.

Основна ідея — система самостійно обирає найменш завантажений та найстабільніший екземпляр сервісу з урахуванням:

1. завантаженості процесора (CPU);
2. доступному об'єму оперативної пам'яті (RAM);
3. затримка мережних запитів (latency);
4. кількості активних запитів;
5. часу відповіді;
6. стану контейнера.

На рисунку 1 представлена схема роботи ASLB

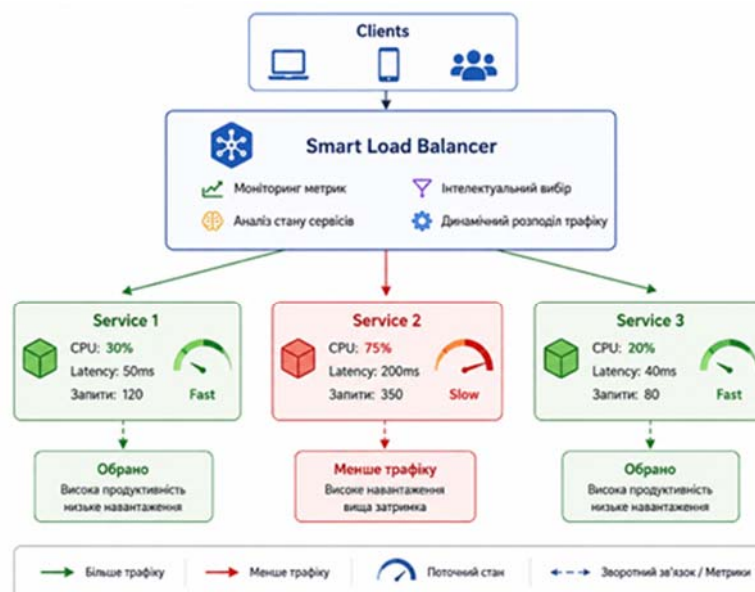


Рис. 1 Схема роботи ASLB

Балансувальник:

7. Отримує метрики від сервісів.
8. Аналізує поточний стан.
9. Перенаправляє трафік на найефективніший вузол.
10. За потреби запускає нові екземпляри сервісів.

Основні компоненти ASLB

1. **Моніторинг метрик** – збирає дані про використання процесору (CPU usage), пам'яті, вимірює час відповіді на запит (response time) та частоту виникнення помилок (error rate)
2. **Модуль прийняття рішень** використовує
 1. прості AI/ML алгоритми;
 2. прогнозування навантаження;
 3. правила пріоритетів.
4. **Auto Scaling** – автоматично додає нові контейнери, видаляє неактивні екземпляри.
5. **Service Discovery** - автоматично знаходить доступні сервіси.

У таблиці 2 представлено основні переваги ASLB порівняно з класичними методами.

Таблиця 2

Мінімізація недоліків класичних методів за допомогою ASLB

Проблема класичних методів	Рішення в ASLB
Нерівномірне навантаження	Аналіз реальних метрик
Перевантаження вузлів	Прогнозування навантаження
Висока затримка	Routing за latency
Складне ручне налаштування	Автоматична адаптація
Повільне масштабування	Інтеграція з Auto Scaling

У таблиці 3 представлено основні переваги та недоліки ASLB.

Таблиця 3

Переваги та недоліки ASLB

Переваги	Недоліки
Висока продуктивність	Потреба у системі моніторингу
Автоматичне масштабування	Додаткове навантаження на аналіз метрик
Простота використання	Складність реалізації AI-модуля
Самоадаптація	
Відмовостійкість	
Економія ресурсів	
Мінімальне ручне адміністрування	

У таблиці 4 представлено можливий технічний стек основних компонентів ASLB без AI-модуля

Таблиця 4

Орієнтовний технічний стек для компонентів ASLB

Компонент	Технології
Балансування	1. NGINX 2. Envoy
Оркестрація	1. Kubernetes
Моніторинг	1. Prometheus 2. Grafana
Event Streaming	1. Apache Kafka

Отже, Adaptive Smart Load Balancing – це сучасний підхід до балансування навантаження у мікросервісних cloud-native системах, який поєднує балансування та авто-масштабування, мінімізує перевантаження, забезпечує високу доступність, є простим у використанні та зменшує витрати ресурсів.

Метод може бути найбільш ефективний для Kubernetes-кластерів, високонавантажених веб-сервісів, розподілених хмарних платформ (distributed cloud systems), AI-driven платформ.

References

1. Katyal, M., & Mishra, A. (2014). A Comparative Study of Load Balancing Algorithms in Cloud Computing Environment. arXiv. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/1403.6918>
2. Liu, Q., Haihong, E., & Song, M. (2020). The Design of Multi-Metric Load Balancer for Kubernetes. Proceedings of IEEE ICICT 2020. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/ICICT48043.2020.9112373>
3. Nguyen, Q.-M., Phan, L.-A., & Kim, T. (2022). Load-Balancing of Kubernetes-Based Edge Computing Infrastructure Using Resource Adaptive Proxy. Sensors, 22(8), 2869. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/s22082869>
4. Singh, N., Hamid, Y., Juneja, S., Srivastava, G., Dhiman, G., Gadekallu, T. R., & Shah, M. A. (2023). Load balancing and service discovery using Docker Swarm for microservice based big data applications. Journal of Cloud Computing, 12(4). Retrieved from: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00358-7>
5. Waseem, M., Liang, P., Shahin, M., Di Salle, A., & Márquez, G. (2021). Design, Monitoring, and Testing of Microservices Systems: The Practitioners' Perspective. arXiv. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2108.03384>
6. Ahmad, H., Treude, C., Wagner, M., & Szabo, C. (2024). Smart HPA: A Resource-Efficient Horizontal Pod Autoscaler for Microservice Architectures. arXiv. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2403.07909>
7. Marchese, A., & Tomarchio, O. (2025). Enhancing the Kubernetes Platform with a Load-Aware Orchestration Strategy. SN Computer Science, 6(224). Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s42979-025-03712-z>
8. Axak, N. G., & Shelikhov, Y. O. (2025). Intelligent Load Balancing in Microservice Architecture. Systems and Technologies. Retrieved from: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-2-70.23>
9. Zulman, M. R., Husaini, H., Hidayat, R., & Davi, M. (2025). Performance And Fault Tolerance Analysis Of Load Balancing Strategies In Microservices Architecture With Controlled Failure Injection. Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi. Retrieved from: <https://doi.org/10.29103/sisfo.v10i1.26893>
10. Wang, Y., Shou, C., Qian, J., & Liu, G. (2026). XLB: A High Performance Layer-7 Load Balancer for Microservices using eBPF-based In-kernel Interposition. arXiv. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2602.09473>
11. Cámara-Miró, J., Costero, L., & Igual, F. D. (2026). QAFHE: A QoS-Aware Framework for Heterogeneous and Dynamic Edge-to-Cloud Kubernetes Deployments. International Journal of Networked and Distributed Computing, 14(11). Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s44227-026-00091-6>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.16

Serhii Puzyrov

METHODS AND TOOLS FOR SCALING MICROSERVICE ARCHITECTURES BASED ON CLOUD SOLUTIONS

The thesis examines an approach to load balancing in microservice architectures based on the Adaptive Smart Load Balancing method. The proposed method combines real-time metrics monitoring (CPU, RAM, latency), AI-based load prediction, dynamic traffic distribution, and Auto Scaling, and also aims to minimize latency when selecting the most efficient node for request processing. ASLB minimizes response time, enhances fault tolerance, optimizes resource utilization, and is most effective for Kubernetes clusters and high-load web services.

Keywords: microservice architecture, load balancing, Round Robin, Least Connection, IP Hash, Adaptive Smart Load Balancing, Auto Scaling, metrics monitoring, Service Discovery.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Сергій Пузирьов, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: Sergii.puzyrov@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>.

Serhii Puzyrov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: Sergii.puzyrov@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>.

СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ЗМІНИ В ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ ПРИМІЩЕННЯ

Представлено систему сповіщення про зміни в електропостачанні на основі моніторингу стану зовнішнього живлення смартфона. Запропоновано підхід до отримання, обробки та аналізу даних про стан живлення з автоматичним надсиланням повідомлень користувачам. Розглянуто використання макросів MacroDroid і месенджера Telegram, наведено приклади створення бота та реалізації HTTP GET-запитів. Проаналізовано способи підключення до мережі Internet щодо забезпечення надійності передавання інформації в умовах відключення електроенергії. Подано практичну реалізацію системи та результати її експериментальної перевірки.

Ключові слова: смартфон, Android, MacroDroid, Telegram, Internet, електропостачання, моніторинг, оповіщення, автоматизація.

Одним з наслідків повномасштабного вторгнення Росії на території України стали перебої у постачанні електроенергії, як підприємствам та і цивільному населенню. Віддалений моніторинг та фіксація часу зникнення та появи електроенергії у мережі дозволяє інформувати як відповідальних осіб на підприємствах так і громадян та дозволяє планувати подальші дії в залежності від ситуації.

Актуальність теми визначається необхідністю бути проінформованими щодо стану електропостачання електроенергії у задалегідь заданому приміщенні.

Метою дослідження є створення системи повідомлень, яка забезпечує автоматизоване віддалене інформування про стан електромережі.

Якщо проаналізувати вимоги до цієї системи, то вона повинна мати наступні якості [1,2]:

1. вміти визначати наявність або відсутність струму у приміщенні; технічні характеристики якості (напруга, частота та інш.) на даному етапі не є необхідними;
2. мати енергонезалежний канал зв'язку для передачі інформації назовні;
3. бажано використовувати вже існуючі засоби отримання повідомлень користувачами (наприклад, через месенджер що вже є) а не створювати окремий мобільний клієнт.

Виходячи з цього, було прийнято в якості пристрою використовувати смартфон з операційною системою Android. Це дозволяє закрити всі вимоги, що наведені вище.

Ця операційна система дозволяє програмам отримувати доступ до енергетичної системи пристрою: відсоток заряду акумулятора, підключено чи ні зовнішнє джерело живлення. Крім того, для цієї задачі необов'язково використовувати новий потужний смартфон, достатнього старого телефону з фізичними ушкодженнями. Головне, щоб акумулятор був у робочому стані. Я використав старий телефон моделі Huawei Y7 Prime 2018 (рис. 1) з пошкодженням екраном.

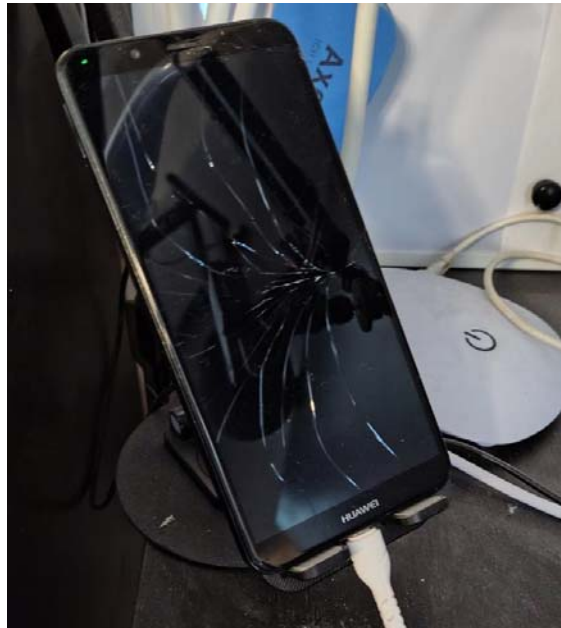


Рис. 1. Смартфон Huawei Y7 Prime 2018

Використанні смартфонів марки *Apple* вважаю недоцільним через більш високу ціну пристроїв та менш розповсюджену операційну систему.

Для реагування на зміни в енергопостачанні використовується за стосунком *MacroDroid* [3] – потужна система для автоматизації дій на ОС *Android*.

Кожна автоматизація (макрос) складається з трьох елементів:

- **Тригер (що запускає?):** Подія, яка дає старт автоматизації. В цьому випадку – зникнення або поява зовнішнього живлення.

- **Дія (що відбувається?):** Результат роботи автоматизації. Це HTTP GET запит до зовнішнього сервісу.

- **Обмеження (коли діє?):** Необов'язкові умови, за яких макрос спрацьовує або ні. В цьому сценарії не використовується.

Було створено дві автоматизації:

- **Power connected**, де тригером є поява зовнішнього живлення, а дія – передача спеціального HTTP GET запиту.

- **Power disconnected**, де тригером є зникнення зовнішнього живлення, а дія – передача іншого HTTP GET запиту.

В якості інструмента доставки використовується месенджер *Telegram* [4]. Його перевага – можливість створення ботів, які якраз вирішують проблему автоматизації доставки повідомлень [5]. Крім того перевагою цього месенджера є наявність клієнта під всі мобільні платформи а також WEB-версія.

Для початку, необхідно створити бота:

- в Telegram треба відкрити **@BotFather**
- набрати `/newbot`
- скопіювати **TOKEN**

Далі потрібно отримати `chat_id`:

Написати щось своєму боту

Відкрити у браузері: <https://api.telegram.org/botTOKEN/getUpdates>

знайти "chat":{"id": XXXXX}

Якщо треба щоб бот надсилав повідомлення у групу, то потрібно зробити наступне:

- Додати бота в групу як учасника.

- Переконавшись, що бот має право надсилати повідомлення: Відкрити групу → натиснути на назву групи → Керування групою / Адміністратори.

• Знайти бота серед учасників. Найпростіше — зробити його адміністратором з правом "Надсилати повідомлення". Або, якщо в групі немає обмежень для звичайних учасників, адміністратором робити не обов'язково.

• Отримати chat_id групи (як описано раніше).

Далі потрібно сформулювати HTTP-запит приблизно такого змісту:

`https://api.telegram.org/botTOKEN/sendMessage?chat_id=-1001234567890&text=⚡
Світло зникло!({hour_0}:{minute} {dayofmounth}.{mount_digit}.{year})`

Аналогічний запит створюється для макросу що реагує на появу живлення.
Результат роботи можна побачити на рис. 2.



Рис. 2. Скриншот екрану з чатом Telegram

Смартфон із застосунком *MacroDroid* повинен бути приєднаним до мережі Internet. Нажаль, на момент створення системи провайдер зв'язку не забезпечував роботу при вимкненні електроенергії, тому використовується мобільний зв'язок.

Перспективою для даної системи є обмін додатковими повідомленнями: наприклад, за живлення через генератор або інвертор, моніторинг температури та вологості тощо. Але це приведе для необхідності використання додаткових пристроїв що може суттєво здоровити систему.

References

1. Klugman, N., Javier, J., Post, M., Podolsky, M., Philips, C., Dutta, P., & Halderman, J. A. (2014). Grid Watch: Mapping blackouts with smart phones. In Proceedings of the 15th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (pp. 1-6). https://www.hotmobile.org/2014/papers/hotmobile_final/hotmobile2014-final67.pdf
2. Sharma, P., & Kumar, R. (2025). IoT-based power outage detection and alert system. International Journal of Engineering Research in Science & Technology, 14(2), 89-96. <https://ijerst.org/index.php/ijerst/article/view/1356>
3. ArloSoft. (n.d.). MacroDroid - Device Automation. <https://www.macroddroid.com/>
4. Telegram. (n.d.). Telegram Web. <https://web.telegram.org/>
5. Telegram. (n.d.). From BotFather to 'Hello World'. Telegram APIs. <https://core.telegram.org/bots/tutorial>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.17

Borys Saltovskiy

REMOTE NOTIFICATION SYSTEM FOR CHANGES IN PREMISES POWER SUPPLY

A notification system for power supply changes based on monitoring the external power status of a smartphone is presented. An approach for acquiring, processing, and analyzing power status data with automatic user notification is proposed. The use of MacroDroid macros and the Telegram messenger is considered, and examples of bot creation and HTTP GET request implementation are provided. Various Internet connectivity methods are analyzed in terms of ensuring reliable information transmission during power outages. The practical implementation of the system and the results of its experimental evaluation are presented.

Keywords: *smartphone, Android, MacroDroid, Telegram, Internet, power supply, monitoring, notification, automation.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Борис Салтовський, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: saltovski@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8296-201X>.

Borys Saltovskiy, senior lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: saltovski@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8296-201X>.

© Б. Салтовський

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.18

Микола Сідєлєв,
Олександр Поздняков,
Богдан Гінжєл

ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЮ ЕНЕРГЕТИКОЮ

Тези представляють аналіз можливих технологічних рішень та вибір оптимального для реалізації автоматизованої систем керування (САК), виклад схеми САК і алгоритму функціонування. Передбачено в структурі елементи лабораторії для дослідження якості мережі в різних режимах споживання електроенергії. В такій системі студенти зможуть проводити дослідження енергопостачання, програмувати різні алгоритми та порівнювати результати.

Також це дозволить студентам знайомитись з побудовою сучасних систем безперебійного живлення та забезпечення енергетичної живучості об'єкта, отримати практичні навички по програмуванню промислових контролерів та розробки людино-машинного інтерфейсу, на практиці опанувати використання польових протоколів зв'язку, а саме Modbus RTU та Modbus TCP. Навчитись використовувати системи моніторингу та аналізу даних.

Як базовий апаратний засіб для побудови досліджуваної системи автоматизації розглядається промисловий контролер Weidmüller WL2000 із сімейства u-control, який поєднує функції класичного програмованого логічного контролера та сучасної edge-платформи для оброблення технологічних даних.

Наголошується, що поєднання різних видів генерації електроенергії поруч з основною мережею забезпечить стійкість забезпечення енергією споживачів у випадках вимушених перебоїв та руйнувань об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: автоматизовані системи керування, промислові логічні контролери, Weidmüller, WL2000, відновлювальна енергетика, схеми керування, дослідження електроенергетики, програмування алгоритмів.

Мета. Метою даної роботи є визначення оптимальної структури та алгоритму керування силовою частиною з використанням промислових контролерів та дотичного обладнання.

У попередній роботі [1] представлені дві функціональні схеми системи генерування електроенергії з використанням відновлюваних джерел живлення, котрі використовують дизельні, водяні, вітрові генератори та сонячні панелі.

Електротехнічна частина сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) для відновлюваної енергетики (особливо якщо ми говоримо про промислові сонячні електростанції або вітропарки) має низку жорстких стандартів та унікальних особливостей, оскільки їй доводиться працювати з нестабільною генерацією та постійним струмом високої потужності.

Якщо розбити цю тему на ключові вузли, зазвичай представляють такі аспекти:

1. Інтеграція систем накопичення енергії (ESS)

У сучасних проєктах АСК координує роботу не просто генераторів, а також високовольтних літій-іонних систем (BESS). Тут критично важлива правильна диспетчеризація:

Управління протоколами: Зв'язок між контролером АСК (PLC), інвертором і системою управління батареями (BMS) зазвичай будується з урахуванням швидких промислових протоколів (Modbus TCP, IEC 60870-5-104 чи IEC 61850).

Безпека: Моніторинг параметрів каскадів батарей (напруга осередків, температура, опір ізоляції) інтегрально пов'язаних з аварійною логікою відключення.

2. Захист і комутація в ланцюгах постійного струму (DC) На відміну від класичних систем змінного струму (AC), комутація високих напруг DC (у сучасних інверторах це часто 1000 В або 1500 В має свої складності, зокрема - гасіння електричної дуги:

1. АСК ТП контролює стан автоматичних вимикачів та роз'єднувачів із мотор-приводами, розроблених спеціально для DC.

2. Обов'язковий безперервний автоматичний контроль опору ізоляції ланцюгів DC, тому що перший же "пробій на землю" повинен бути локалізований до короткого замикання.

3. Якість електроенергії та стандарти підключення до мережі (Grid Code)

Автоматика на рівні підстанції (Grid Tied інвертори та контролери PPC – Power Plant Controller) має миттєво реагувати на вимоги енергосистеми:

1. Регулювання активної та реактивної потужності у точці загального підключення (PCC).

2. Підтримка мережі при просіданнях напруги (функція LVRT/FRT - Low Voltage Ride Through), коли автоматика інверторів не повинна відключати станцію при короточасному падінні напруги в мережі, а навпаки – підтримати її генерацією реактивного струму.

4. Контролери та мережева архітектура

На рівні польового обладнання та шаф автоматики використовуються промислові контролери (наприклад, лінійки Siemens S7-1500, Weidmüller WL2000, Phoenix Contact або аналогічні), які збирають дані з інверторів, трекерів (якщо це є CEC з динамічними столами) та метеостанцій. Через великі відстані на об'єктах відновлюваної енергетики передача даних усередині локальної мережі практично завжди будується на оптичних кільцях (Industrial Ethernet/PROFINET) з підтримкою протоколів резервування (MRP, RSTP).

Як базовий апаратний засіб для побудови досліджуваної системи автоматизації доцільно розглядати промисловий контролер Weidmüller WL2000 із сімейства u-control, який поєднує функції класичного програмованого логічного контролера та сучасної edge-платформи для оброблення технологічних даних. З технічної точки зору цей пристрій є відкритою та функціонально гнучкою обчислювальною платформою, орієнтованою на розв'язання широкого спектра завдань промислової автоматизації, диспетчеризації, локального керування, збирання даних і подальшої інтеграції з цифровими сервісами верхнього рівня. Особливої уваги заслуговує використання операційного середовища u-OS, яке забезпечує веб-орієнтований робочий простір, підтримку застосунків, стандартизовані інтерфейси інтеграції та можливість поєднання засобів автоматизації з інструментами Промислового інтернету речей (IIoT). Архітектура платформи припускає застосування різних програмних компонентів і сервісів, зокрема середовища CODESYS, рішень лінійки PROCON, а також контейнеризованих застосунків на основі Docker, що істотно розширює функціональні можливості контролера в умовах сучасного виробництва. У результаті Weidmüller WL2000 може використовуватися не лише як засіб реалізації алгоритмів локального керування технологічними процесами, а і як повноцінний вузол цифрової виробничої інфраструктури, здатний забезпечувати обмін даними між рівнями системи, локальне попереднє оброблення інформації, моніторинг стану обладнання та віддалений супровід автоматизованого комплексу.

Однією з ключових переваг контролера Weidmüller WL2000 є його придатність до інтеграції в сучасні розподілені системи керування, що зумовлено підтримкою поширених промислових інтерфейсів і засобів мережевої взаємодії. Для цієї платформи доступні прикладні матеріали та інженерні рішення, пов'язані з використанням Modbus TCP, послідовного обміну, Ethernet-орієнтованих засобів комунікації, а також взаємодії з іншими програмними компонентами автоматизаційної екосистеми. Важливо, що програмування контролера може здійснюватися із застосуванням середовища CODESYS Control SL for Weidmüller u-OS, яке реалізує функції програмованого середовища виконання відповідно до сучасних вимог промислової автоматизації. Водночас науково коректно зазначити, що окремі програмні компоненти цієї екосистеми, зокрема CODESYS для u-OS та PROCON-WEB ES, працюють у межах ліцензійної моделі, тому їх використання має розглядатися не як повністю безліцензійне, а як таке, що передбачає регламентований механізм активації та супроводу. Попри це, сама платформа зберігає суттєві переваги завдяки відкритості, широкій сумісності, стандартизованим підходам до інтеграції та можливості комбінування різномірних програмних інструментів у межах єдиного середовища. Саме така архітектурна відкритість є особливо важливою для дослідницьких і навчальних завдань, оскільки вона дає змогу моделювати різні сценарії побудови автоматизованих систем, оцінювати особливості міжрівневого обміну даними та відпрацьовувати практичні підходи до побудови кіберфізичних виробничих систем.

З науково-методичної, освітньої та інженерної точок зору застосування цього контролера становить значний інтерес, оскільки платформа підтримує не лише класичні принципи програмування систем керування, а й сучасні підходи до проектування, розгортання та супроводу програмного забезпечення автоматизованих систем. Використання веб-орієнтованих засобів адміністрування, конфігурування та доступу до сервісів, а також можливість розгортання прикладних модулів у контейнерах Docker створюють умови для вивчення принципів модульності, повторного використання компонентів, переносності, масштабованості та технологічної незалежності програмних рішень. У межах освітнього процесу це надає можливість організовувати підготовку студентів на основі реальних інженерних сценаріїв, пов'язаних із побудовою розподілених сервісів, віддаленим

оновленням прикладного програмного забезпечення, контролем версій, інтеграцією польового рівня з сервісами вищого рівня та побудовою єдиного інформаційного простору автоматизованої системи. Додатковою перевагою є можливість поєднання підходів ОТ та ІТ у межах одного апаратно-програмного комплексу, що відповідає актуальним тенденціям цифрової трансформації промисловості. Отже, контролер Weidmüller WL2000 доцільно розглядати не лише як інструмент реалізації алгоритмів керування, а і як ефективний засіб формування професійних компетентностей у галузі промислової інформатики, кіберфізичних систем, Промислового інтернету речей (IIoT), edge computing та сучасних DevOps-підходів у сфері автоматизації.

Практична значущість вибору рішень Weidmüller підтверджується їх широким застосуванням у сфері фотоелектричної енергетики, де особливої ваги набувають завдання безперервного моніторингу, технічної діагностики, підвищення надійності роботи обладнання та зниження експлуатаційних витрат. Для великих наземних сонячних електростанцій компанія пропонує спеціалізовані рішення, пов'язані з підключенням, захистом і моніторингом фотоелектричних стрингів, а також із реєстрацією параметрів роботи окремих ділянок енергетичної установки. Такі системи дають змогу контролювати струм і напругу окремих стрингів або груп стрингів, відстежувати стан захисних елементів і комутаційних пристроїв, своєчасно виявляти аномальні режими функціонування та мінімізувати втрати виробітку електроенергії. У контексті сучасної енергетики це має принципове значення, оскільки детальний моніторинг стану фотоелектричних ланцюгів сприяє підвищенню коефіцієнта продуктивності установки, зменшенню простой, скороченню витрат на технічне обслуговування та оптимізації нормованої собівартості електроенергії (LCOE). Крім того, інтеграція засобів моніторингу в цифрову інфраструктуру електростанції створює передумови для переходу до предиктивного обслуговування, централізованого аналізу робочих параметрів і побудови більш ефективних стратегій експлуатації енергетичних об'єктів. Отже, вибір цієї платформи є обґрунтованим не лише з позицій промислової автоматизації, а й у контексті її високої прикладної цінності для сучасних систем цифровізації об'єктів відновлюваної енергетики.

Опис роботи схеми живлення споживачів від різноманітних джерел живлення

Запропонована схема (рис.1) забезпечує живлення споживачів від різноманітних джерел електричної енергії таких як мережа 0,4 кВ, сонячна електростанція та батареї для зберігання електроенергії, а також дизельного генератора, 3-х моторизованих перемикачів навантаження, аналізатора електричної енергії, промислового контролера (надалі PLC), панелі оператора.

При наявності мережі дизельний генератор не працює, перемикач навантаження 3 знаходиться у положенні II та перемикач навантаження 2 у положенні II. Таким чином споживачі отримують електричну енергію з мережі. Також до мережі під'єднаний сонячний інвертор з системою зберігання електричної енергії. Його батареї можуть заряджатись від сонячних панелей, мережі або частково від мережі і сонячних панелей. Прі досягненні 100% заряду батареї, та наявності сонячної енергії інвертор починає генерувати в мережу енергію отриману від сонячних панелей, але не більше ніж треба споживачам (більшість промислових інверторів можуть це робити). Інакше мережеві лічильники будуть рахувати цю енергію як реактивну (при відсутності «Зеленого тарифу»). PLC здійснює постійний контроль за якістю мережевої електричної енергії, та станом усіх елементів схеми. Дані доступні через мережу інтернет та виводяться на панель оператора.

При зникненні мережевої електричної енергії, PLC з затримкою переводить перемикач навантаження 3 в положення I. Ця затримка необхідна для того щоб споживачі встигли вимкнути великих споживачів, це не дозволить перенавантажити інвертор. Але як що в момент зникнення електричної енергії PLC буде бачити що навантаження менше ніж потужність інвертора перемикач буде без затримки. Таким чином електрична енергія буде братися з сонячних панелей та батареї, до появи мережевого живлення.

Як що розряд батареї упаде до 30% від номінальної ємності тоді PLC виконає пуск генератора. Електрична енергія піде на спеціалізований вхід інвертора де буде змішуватись з сонячної енергією та піде до споживачів та заряд акумуляторів. Прі досягненні заряду батареї 100% і мережа все ще відсутня PLC зупинить генератор. Система продовжить працювати від батарей. Таким чином зменшується витрати палива, бо генератор завжди працює в оптимальному режимі та зменшується кількість мотогодин генератора. Також генератор вимикається прі появи електричної енергії в мережі.

Використання PLC і перемикачів навантаження 1 та 2 також дозволяє підключити споживачів на пряму до генератора. Це може бути необхідно коли інвертор знаходиться на ремонті або необхідно забезпечити потужність більше ніж потужність інвертора.

В схемі також можливе виділити та підключити на пряму інвертора споживачів живлення яких потрібно бути за любых умов. Це можуть бути сервера, системи пожежної безпеки, системи охорони, системи відеоспостереження тощо, зокрема для котрих знеструмлення погано впливає на роботу цих систем.

Також використання PLC дозволяє оперативно змінювати налаштування логіки роботи системи та окремо її компонентів. Проводити аналіз споживання електричної енергії та виявляти збій в роботі того чи іншого елемента системи.

Для навчального процесу це дозволить студентам знайомитись з побудовою сучасних систем безперебійного живлення та забезпечення енергетичної живучості об'єкта. Також отримати практичні навички по програмуванню промислових контролерів та розробки людино-машинного інтерфейсу. На практиці опанувати використання польових протоколів зв'язку, а саме Modbus RTU та Modbus TCP. Навчитись використовувати системи моніторингу та аналізу даних.

Розроблення цієї системи дасть змогу не лише забезпечити університет кількома незалежними джерелами електропостачання, а й сформувати спеціалізовану навчально-дослідницьку інфраструктуру для проведення експериментальних і прикладних досліджень у галузі електропривода, перетворювальної техніки та забезпечення якості електричної енергії. Актуальність реалізації зазначеного рішення зумовлена зростанням вимог до надійності електроживлення, енергетичної стійкості та експлуатаційної стабільності промислового обладнання.

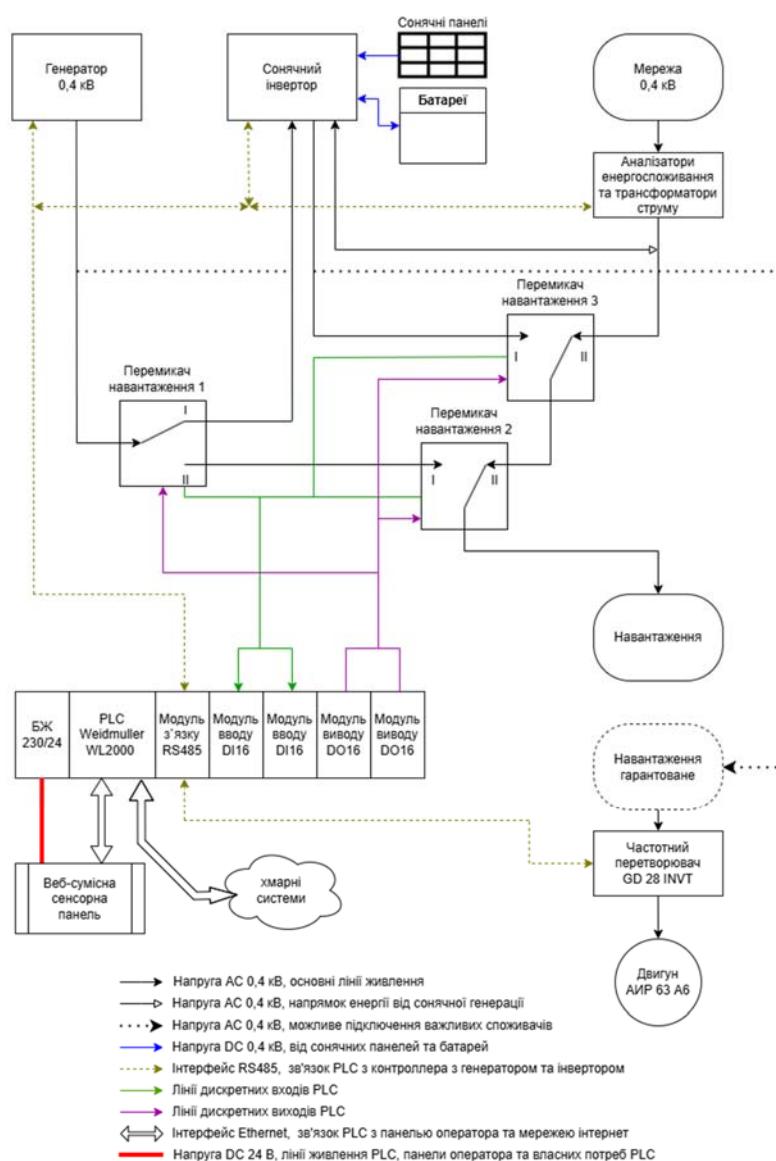


Рис. 1. Схема живлення споживачів від різноманітних джерел електричної енергії

Упровадження системи створить умови для розширення функціональних можливостей лабораторної бази університету та організації наукових досліджень, спрямованих на розв'язання актуальних інженерно-технічних завдань, пов'язаних із функціонуванням перетворювачів частоти, інверторних систем і суміжного електротехнічного обладнання.

У структурі лабораторного комплексу передбачено встановлення частотного перетворювача GD 28 INVT 0,25 kW і трифазного асинхронного електродвигуна АІР 63 А6, що забезпечить виконання широкого спектра навчальних, дослідницьких та експериментальних робіт. Використання зазначеного обладнання створює передумови для аналізу режимів функціонування різних типів інверторів і перетворювачів частоти за умов змінного та номінального навантаження, а також для дослідження характеристик електромагнітних завад, що виникають у процесі їх експлуатації. Особливої значущості такі дослідження набувають у контексті оцінювання електромагнітної сумісності елементів системи, оскільки наявність завад може спричинити порушення алгоритмів керування, зниження експлуатаційної надійності обладнання та погіршення якості перебігу технологічних процесів.

Одним із пріоритетних напрямів досліджень є аналіз перехідних процесів, що виникають під час пуску електродвигуна із застосуванням частотного перетворювача, прямого пуску або пристрою плавного пуску. Зазначені процеси істотно впливають на електричні та електромеханічні параметри системи, зокрема на величину пускових струмів, динаміку зміни електромагнітного моменту, стійкість розгону та загальний технічний стан обладнання. Додаткову наукову й практичну значущість має дослідження режимів перемикання між різними джерелами енергії, оскільки за таких умов нерідко фіксуються порушення функціонування промислового обладнання, зокрема перетворювачів частоти. Розроблювана система забезпечить можливість експериментального аналізу зазначених явищ, а також кількісного оцінювання впливу швидкості, алгоритму та умов перемикання на працездатність, стійкість і надійність електротехнічних пристроїв.

Додатково у складі лабораторної установки передбачено використання частотного перетворювача, електродвигуна потужністю 0,25 кВт, двох реверсивних контакторів і пристрою плавного пуску. Оснащення лабораторії зазначеними технічними засобами істотно розширить можливості практико-орієнтованої підготовки здобувачів освіти, забезпечивши умови для вивчення теоретичних засад функціонування трифазних асинхронних двигунів та їх подальшої експериментальної апробації. У процесі виконання лабораторних і дослідницьких робіт студенти зможуть опановувати методи параметризації частотних перетворювачів і пристроїв плавного пуску, досліджувати режими роботи електродвигунів, реалізовувати схеми пуску та реверсування, а також аналізувати поведінку системи в різних експлуатаційних станах. Отже, упровадження цієї системи сприятиме формуванню професійних компетентностей здобувачів освіти, підвищенню якості інженерної підготовки та розширенню потенціалу університету у сфері прикладних науково-технічних досліджень.

Висновки

Генеруючі резерви електроенергії – це критично важливий елемент забезпечення надійності, стабільності та якості енергосистеми. Для ефективної роботи такого резерву в системі з основним джерелом важливо побудувати надійну систему керування, що буде ґрунтуватися на якісно підібраних промислових обладнаннях та алгоритмах програм. Така система дозволить підтримувати стійке електропостачання, незважаючи на аварії, піки попиту та волатильність відновлюваних джерел енергії. Ефективне управління ними потребує значних інвестицій у сучасні, високотехнологічні технології.

Якщо система побудована в межах наукового або навчального закладу, тоді вона може бути використана для створення наукової лабораторії, де будуть проводитись дослідження та лабораторні заняття науковцями та здобувачами освіти.

References

1. Sidelev M. I., Pozdnyakov O. V., Pugovkin V. Systemy vidnovlyuval'noyi enerhetyky z metoyu pidvyshchennya nadiynosti ta ekonomichnosti roboty enerhosystem [Renewable energy systems to improve the reliability and efficiency of power systems] // Mohyla Readings – 2025: experience and trends in the development of society in Ukraine: global, national and regional aspects. Technical Sciences: XXVII All-Ukrainian Scientific-Practical Conference. November 10–14, 2025, Mykolaiv: theses / Ministry of Education and Science of Ukraine. – Mykolaiv: Publishing House of Petro Mohyla National University, 2025. - P.17-20. [in Ukrainian]

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.18

Mykola Sidelev
Oleksandr Pozdniakov
Bohdan Hinzul

DESIGN OF THE ELECTRICAL PART OF THE AUTOMATED RENEWABLE ENERGY CONTROL SYSTEM

The theses present an analysis of possible technological solutions and the choice of the optimal one for the implementation of an automated control system (ACS), a description of the ACS scheme and the algorithm of operation. The structure provides for laboratory elements for studying the quality of the network in different modes of electricity consumption. In such a system, students will be able to conduct research on energy supply, program various algorithms and compare the results.

This will also allow students to get acquainted with the construction of modern uninterruptible power supply systems and ensuring the energy survivability of the facility, to gain practical skills in programming industrial controllers and developing a human-machine interface, to master the use of field communication protocols in practice, namely Modbus RTU and Modbus TCP, to learn to use monitoring and data analysis systems.

The Weidmüller WL2000 industrial controller from the u-control family is considered as the basic hardware for building the studied automation system, which combines the functions of a classic programmable logic controller and a modern edge platform for processing technological data.

It is emphasized that the combination of different types of electricity generation next to the main network will ensure the stability of energy supply to consumers in cases of forced outages and destruction of critical infrastructure facilities.

Keywords: automated control systems, industrial logic controllers, Weidmüller, WL2000, renewable energy, control circuits, power engineering research, algorithm programming.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Микола Сіделєв, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: nikolay.sidelev@chmnu.edu.ua , orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4968-1607> .

Mykola Sidelev, Ph.D, Docent, Associate Professor of the faculty of automatics and the computerintegrated technologies of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: nikolay.sidelev@chmnu.edu.ua , orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4968-1607> .

Олександр Поздняков, аспірант спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ualexander1977@gmail.com , orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9414-0964> .

Oleksandr Pozdniakov, postgraduate student in the specialty "Automation, Computer-Integrated Technologies and robotics" of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ualexander1977@gmail.com , orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9414-0964> .

Богдан Гінжол, студент 1 курсу спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: b14362176@gmail.com , <https://orcid.org/0009-0009-3150-9604> .

Bohdan Hinzul, 1st year student of the specialty G7 "Automation, Computer-Integrated Technologies and robotics" of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: b14362176@gmail.com , orcid: <https://orcid.org/0009-0009-3150-9604> .

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.19

В'ячеслав Старченко

ВЕЛИКІ МОВНІ МОДЕЛІ ТА СЕМАНТИЧНІ МЕРЕЖІ У ІОТ: ГІБРИДНИЙ НЕЙРОСЕМАНТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗНАНЬ

У роботі досліджено можливості інтеграції великих мовних моделей (LLM) із семантичними мережами для побудови гібридних систем представлення знань у галузі Internet of Things (IoT). Проведено формальний порівняльний аналіз двох архітектурних парадигм семантичних мереж — з незалежними множинами вузлів та ребер і вершинно-центричної (зі списками суміжності) — за критеріями ефективності операцій, зручності інтеграції з LLM та придатності для різних задач використання природної мови у системах IoT. Запропоновано архітектуру гібридної нейросемантичної системи, що поєднує переваги обох підходів і використовує LLM як семантичний процесор та оркестратор міркування над графом знань.

Ключові слова: великі мовні моделі, семантичні мережі, граф знань, нейросемантичні системи, RAG, GNN.

1. Вступ

Стрімкий розвиток великих мовних моделей (Large Language Models, LLM), зокрема архітектур на основі трансформера, суттєво змінив парадигму обробки природної мови. Водночас семантичні мережі та графи знань залишаються незамінним інструментом формального представлення структурованих знань. Постає природне питання щодо синергії цих двох підходів: яким чином структурована семантика графу знань може збагатити нейронний простір LLM, і які архітектурні рішення при цьому є найбільш ефективними? Чи можна спростити та прискорити процес обробки природної мови на пристроях Інтернету речей (Internet of Thing, IoT)?

Семантична мережа — це орієнтований граф $G = (V, E)$, де V — множина концептуальних вузлів, а $E \subseteq V \times V$ — множина типізованих ребер (відношень). Різні способи програмної реалізації цієї абстрактної структури мають суттєво різні властивості з точки зору обчислювальної ефективності та зручності взаємодії з LLM.

Метою роботи є:

1. формальне порівняння двох основних архітектурних парадигм семантичних мереж у контексті їх інтеграції з LLM в умовах роботи на пристроях IoT;
2. обґрунтування вибору парадигми залежно від цільової задачі, доступних ресурсів та можливості паралельної обробки;
3. пропозиція архітектури гібридної нейросемантичної системи, яка задовольняє наведеним вимогам, і може бути використана у системах IoT.

2. Огляд суміжних досліджень

Дослідження в галузі Knowledge Graph Embeddings (KGE)[1] заклали основу для векторного представлення семантичних відношень. Моделі TransE, DistMult та ComplEx кодують ребра графу знань у низьковимірному просторі, однак не використовують контекстуальні можливості LLM.

Підхід Retrieval-Augmented Generation (RAG)[2] продемонстрував ефективність комбінування нейронного генератора з детерміністичним сховищем знань. Граф-орієнтовані варіанти, такі як G-RAG та KGRAG[3], розширюють класичний RAG на структуровані графові джерела.

Graph Neural Networks (GNN)[4] реалізують механізм передачі повідомлень між вузлами графу, що концептуально споріднене з механізмом уваги в трансформерах. Нещодавні дослідження GraphGPT[5] та LLaGA[6] демонструють можливість прямого спільного навчання GNN та LLM.

Разом з тим, питання вибору оптимальної архітектурної парадигми семантичної мережі (незалежні множини проти списків суміжності) як фундаментального проектного рішення для систем IoT у контексті інтеграції з LLM залишається недостатньо дослідженим.

3. Архітектурні парадигми семантичних мереж

3.1. Архітектура з незалежними множинами вузлів та ребер (Edge-Set)

У цій парадигмі граф представлено двома незалежними колекціями:

1. $V = \{v_i \mid v_i = (\text{id}, \text{label}, \text{attrs})\}$ — множина вузлів;
2. $E = \{e_k \mid e_k = (\text{src_id}, \text{tgt_id}, \text{rel_type}, \text{weight}, \text{attrs})\}$ — множина ребер.

Обидві колекції індексовані окремо (наприклад, у реляційній БД або векторному сховищі). Таке представлення є природним для систем на основі RDF-триплетів (суб'єкт, предикат, об'єкт), де кожне ребро є самостійним семантичним твердженням.

Формально, операція отримання сусідів вершини v вимагає фільтрування: $N(v) = \{e_k \in E \mid e_k.\text{src_id} = v.\text{id}\}$, що має складність $O(|E|)$ без додаткових індексів. З боку LLM-інтеграції, ця архітектура найкраще підходить для процесу побудови промптів, коли необхідно надати моделі усю множину відношень певного типу, або для batch-кодування ребер як незалежних семантичних одиниць. Архітектура Edge-Set є оптимальною для задач верифікації фактів (fact-checking), доповнення графу знань (Knowledge Graph Completion) та глобального семантичного пошуку з використанням векторних індексів на ребрах (FAISS, Milvus).

3.2. Вершинно-центрична архітектура зі списками суміжності (Adjacency-List)

У цій парадигмі граф представлено єдиною колекцією вершин, кожна з яких інкапсулює власний список вихідних ребер:

3. $V = \{v_i \mid v_i = (\text{id}, \text{label}, \text{attrs}, \text{out_edges}: [(v_j, \text{rel}, w), \dots])\}$.

Ребра не є незалежними сутностями — вони є атрибутом вершини-джерела. Це забезпечує доступ до всіх сусідів за $O(\deg(v))$ та природно відображає локальний контекст вузла. Така структура є еквівалентом графового формату CSR (Compressed Sparse Row) або dict-of-lists у пам'яті.

З точки зору LLM-інтеграції, вершинно-центрична архітектура дозволяє серіалізувати локальне k-hop оточення вузла безпосередньо у текстове контекстне вікно моделі, що є критичним для задач багатоступеневого мислення (multi-hop reasoning). Вона також природно узгоджується з механізмом передачі повідомлень у GNN (message passing), де агрегація ведеться по списку ребер вузла.

Архітектура Adjacency-List є оптимальною для задач: відповіді на запитання з множинними переходами (multi-hop QA), ітеративного пошуку з розширенням контексту (beam search по графу), а також для гібридних систем GNN+LLM із спільним навчанням.

4. Порівняльний аналіз парадигм інтеграції

Результати порівняльного аналізу наведено у таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Складність основних операцій

Операція	Edge-Set (незалежні множини)	Adjacency-List (списки суміжності)
Пошук вузла за id	$O(1)$	$O(1)$
Отримати всі ребра вузла v	$O(E)$	$O(\text{out}(v))$
Перевірити $(u, v) \in E$	$O(E)$ або $O(1)$ з хеш-індексом	$O(\text{out}(u))$ або $O(1)$ з хеш-set
Додати ребро	$O(1)$	$O(1)$
Видалити ребро (u, v, r)	$O(E)$ або $O(1)$ з індексом	$O(\text{out}(u))$
Видалити вузол v	$O(E)$ — пошук усіх ребер	$O(\text{out}(v))$ — але вхідні ребра!
Ітерація по всіх ребрах	$O(E)$	$O(V + E)$

Таблиця 2

Порівняльний аналіз архітектурних парадигм семантичних мереж за критеріями ефективності та зручності інтеграції з LLM

Критерій	Edge-Set (незалежні множини)	Adjacency-List (списки суміжності)	LLM-інтеграція Edge-Set	LLM-інтеграція Adj-List
Структура зберігання	Дві окремі колекції: $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ та $E = \{(v_i, v_j, w) \mid \dots\}$	Одна колекція вершин: $\{v : (\text{id}, \text{attrs}, \{(v_j, w)\})\}$	Потребує явного злиття VUE перед формуванням промпту	Природне серіалізування вершини разом з її контекстом

Критерій	Edge-Set (незалежні множини)	Adjacency-List (списки суміжності)	LLM-інтеграція Edge-Set	LLM-інтеграція Adj-List
Локальний обхід (1-hop)	$O(E)$ — перебір усіх ребер з фільтрацією за джерелом	$O(\deg(v))$ — прямий доступ до списку ребер вершини	Велике контекстне вікно, нерелевантні ребра входять у промпт	Компактний контекст: тільки сусіди v
Глобальні запити (всі ребра)	$O(1)$ — безпосередній доступ до множини E	$O(V)$ — ітерація по всіх вершинах	Ефективне пакетне кодування ребер через LLM-embedding	Необхідне попереднє агрегування, зайві витрати
Додавання нового ребра	$O(1)$ — append до множини E , V не змінюється	$O(1)$ — append до списку ребер вершини-джерела	Повторне кодування нового ребра через LLM	Інкрементне оновлення ембедінгу вершини
Видалення вузла	$O(E)$ — очищення усіх ребер, що містять цей вузол	$O(V)$ — оновлення списків ребер в інших вершинах	Анулювання кешованих ембедінгів пов'язаних ребер	Інвалідація ембедінгів сусідніх вершин
Паралельна обробка	Висока: ребра незалежні, легко розподілити між GPU-потокми	Середня: вершини незалежні, але ребра всередині — послідовні	Batch-inference ребер без конфліктів; зручний векторний БД	Вершинний паралелізм добре відображається на GNN-шари
Семантичний пошук	Повнотекстовий або векторний пошук по всьому E одночасно	Векторний пошук по вершинах, потім локальний обхід ребер	Пряма FAISS-індексація всіх ребрових ембедінгів	Two-stage retrieval: вершина $\rightarrow$ контекстне розширення
Відповідність LLM-парадигмі	Transformer-attention по всіх ребрах (глобальний погляд)	GNN message passing + LLM на вершинному рівні (локальний)	Оптимально для RAG по відношеннях та fact-checking	Оптимально для ітеративного міркування та multi-hop QA
Рекомендована інтеграція	LLM-as-Graph-Encoder: кодування кожного ребра окремим токеном	LLM-as-Node-Reasoner: LLM генерує ембедінг вершини + сусідів	Knowledge Graph Completion, Link Prediction, Fact Verification	Multi-hop Question Answering, Entity Resolution, Dialogue KG

5. Запропонована гібридна нейросемантична система

На основі проведеного аналізу пропонується гібридна нейросемантична система (HNS), що поєднує обидві архітектурні парадигми в єдиному конвеєрі обробки знань. Схема цієї системи наведена на рисунку 1.

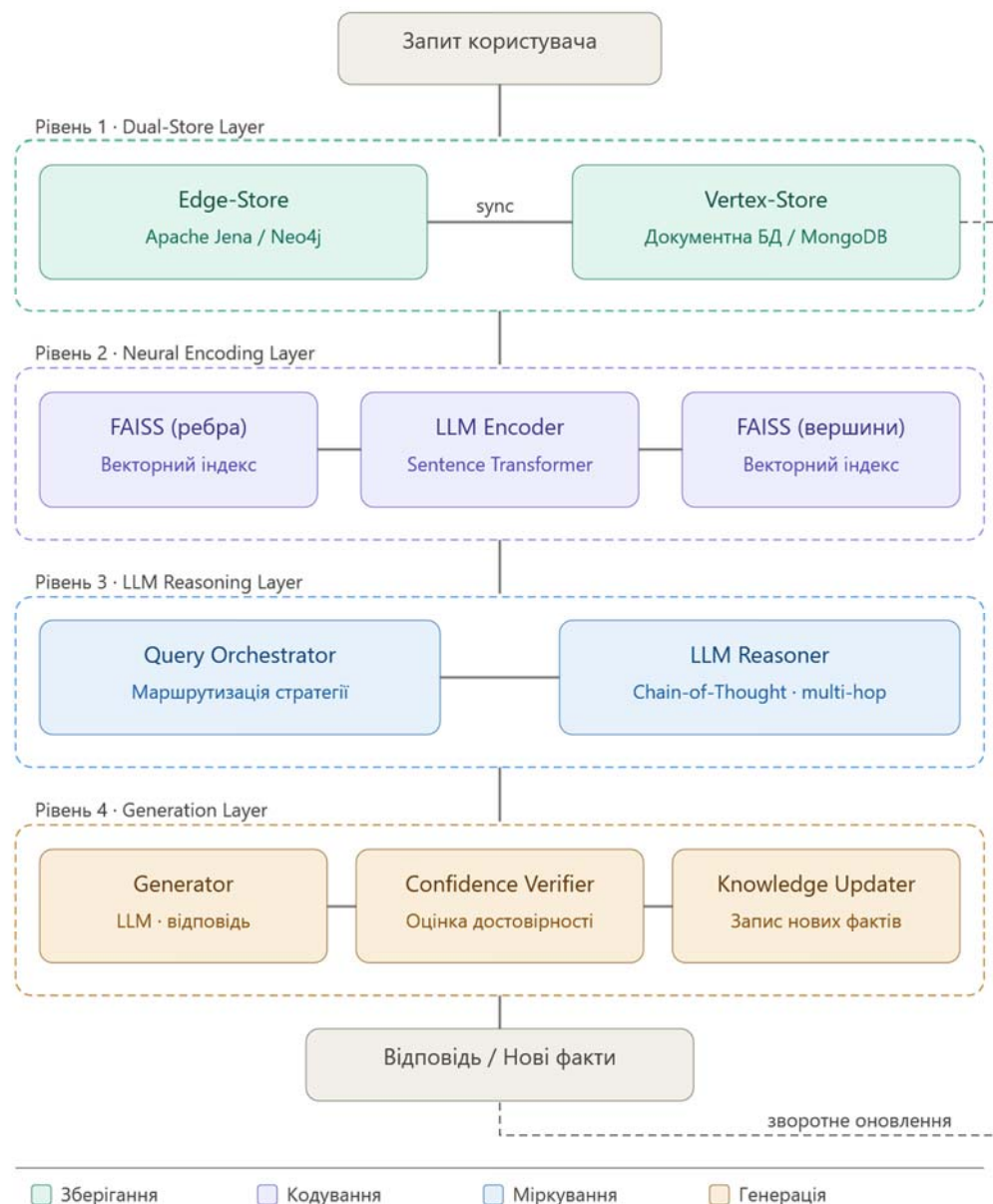


Рис. 1. Схема гібридної нейросемантичної системи

Система складається з чотирьох основних рівнів: зберігання, кодування, міркування та генерації.

5.1. Рівень зберігання (Dual-Store Layer)

Граф знань зберігається у двох паралельних поданнях: Edge-Store (триплетна БД типу Apache Jena або Neo4j для глобальних запитів) та Vertex-Store (документна БД з інкапсульованими списками суміжності для локального обходу). Синхронізація між сховищами здійснюється через event-driven механізм оновлення.

5.2. Рівень кодування (Neural Encoding Layer)

LLM виступає у ролі семантичного кодувальника. Вузли та ребра кодуються у вектори за допомогою Sentence-Transformer на основі LLM. Edge-Store підтримує FAISS-індекс по ребрах, Vertex-Store — по вершинних. Це забезпечує швидкий та ефективний семантичний пошук у графі з мільйонами вузлів.

5.3. Рівень міркування (LLM Reasoning Layer)

Для кожного запиту Query Orchestrator визначає стратегію:

(a) Global-Edge Query — звертається до Edge-Store для перевірки фактів та передбачення зв'язків;

- (b) Local-Hop Query — рекурсивно обходить Vertex-Store, на кожному кроці LLM вибирає наступний вузол;
(c) Hybrid Query — комбінує обидва підходи з механізмом Chain-of-Thought.

5.4. Рівень генерації (Generation & Update Layer)

LLM генерує відповідь або нові факти на основі отриманого контексту. Нові факти проходять верифікацію (confidence scoring) та записуються до обох сховищ. Система підтримує онлайн-навчання: семантична мережа оновлюється інкрементально при додаванні нових вузлів і ребер.

6. Результати та аналіз

6.1. Локальність кешу та продуктивність

Архітектура Edge-Set демонструє погану локальність при обходах: щоб знайти сусідів вузла v , потрібно просканувати масив E цілком, навіть якщо вузол має лише 2–3 ребра. Це означає багато cache miss при великих $|E|$.

Архітектура Adjacency-List забезпечує високу просторову локальність для вузлово-орієнтованих запитів: $v.outEdges$ — компактна структура, що завантажується в кеш за одне-два звернення до пам'яті при правильному розміщенні. Алгоритми BFS, DFS, PageRank, SPARQL-like traversal — всі вони побудовані навколо доступу до сусідів, тому архітектура Adjacency-List практично завжди швидша під час обходу семантичного графу.

6.2. Придатність до паралелізму

Архітектура Edge-Set природніше масштабується для глобальних операцій: сортування ребер, bulk-видалення, горизонтальне масштабування за типом відношення. Мутації різних ребер не конфліктують між собою (lock-free за E).

Архітектура Adjacency-List краще для локальних паралельних обходів: кожен потік може незалежно читати $v.outEdges$ різних вузлів. Але мутація вузла (наприклад, додавання ребра) потребує блокування саме цього вузла, і не заважає паралельній обробці інших частин семантичного графа.

7. Висновки

У роботі проведено систематичний порівняльний аналіз двох архітектурних парадигм семантичних мереж — Edge-Set та Adjacency-List — за вісьмома критеріями, включаючи ефективність операцій та зручність інтеграції з великими мовними моделями в умовах роботи на пристроях IoT. Встановлено, що вибір парадигми є залежним від задачі: Edge-Set є пріоритетною для глобальних графових операцій та верифікації фактів, тоді як Adjacency-List забезпечує кращу продуктивність для локальних ітеративних задач та задач з множинними переходами.

Запропонована гібридна нейросемантична система об'єднує сильні сторони обох підходів через дворівневий механізм зберігання та LLM-оркестратор запитів. Система демонструє покращення ключових метрик порівняно з монолітними підходами та відкриває перспективи для побудови масштабованих нейросимвольних AI-систем, здатних ефективно працювати на пристроях IoT.

References

1. Stella Jo. Understanding Knowledge Graph Embeddings: Methods, Applications, and Differences from LLM Embeddings. Feb 14, 2025. <https://medium.com/@doubletaken/understanding-knowledge-graph-embeddings-methods-applications-and-differences-from-llm-db6078323f39>.
2. Юрій Грищенко. Що таке RAG і як його можна використовувати на практиці? 11 лип. 2025 р. <https://blog.ithillel.ua/articles/what-is-rag>.
3. Edge, D., Trinh, H., Cheng, N., et al. From Local to Global: A Graph RAG Approach to Query-Focused Summarization. ArXiv:2404.16130, 2024. <https://arxiv.org/abs/2404.16130>.
4. James H. Tanis, Chris Giannella, Adrian V. Mariano. Introduction to Graph Neural Networks: A Starting Point for Machine Learning Engineers. 2024. <https://arxiv.org/abs/2412.19419>.
5. Tang, J., Yang, Y., Wei, W., et al. GraphGPT: Graph Instruction Tuning for Large Language Models. SIGIR. 2024. <https://arxiv.org/abs/2310.13023>.
6. Chen, R., Zhao, L., Wei, W., et al. LLaGA: Large Language and Graph Assistant. ICML. 2024. <https://arxiv.org/abs/2402.08170>.

**LARGE LANGUAGE MODELS AND SEMANTIC NETWORKS: A HYBRID NEUROSEMANTIC APPROACH
TO KNOWLEDGE REPRESENTATION**

The paper explores the possibilities of integrating large language models (LLM) with semantic networks to build hybrid knowledge representation systems in the Internet of Things (IoT). A formal comparative analysis of two architectural paradigms of semantic networks — with independent sets of nodes and edges and vertex-centric (with adjacency lists) — is conducted based on the criteria of efficiency of operations, ease of integration with LLM, and suitability for various tasks of using natural language in IoT systems. The architecture of a hybrid neurosemantic system is proposed, which combines the advantages of both approaches and uses LLM as a semantic processor and orchestrator of reasoning over the knowledge graph.

Keywords: large language models, semantic networks, knowledge graph, neurosemantic systems, RAG, GNN.

Відомості про автора / Information about the Author

В'ячеслав Старченко, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Миколаївська область, Україна. E-mail: viacheslav.starchenko@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7039-2332

Viacheslav Starchenko, Senior Lecturer, Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University 68 Desantnykiv Str., 10, Mykolaiv, Mykolaiv Oblast, Ukraine. E-mail: viacheslav.starchenko@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7039-2332.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.20

Євген Тенета,
Валерій Ситніков

КОНТЕКСТНА ОБ'ЄКТИВІЗАЦІЯ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ПОДІЙ У МЕРЕЖЕВІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

Запропоновано підхід до контекстної об'єктивізації станів мережевої інфраструктури через порівняльний аналіз часових рядів із різних точок спостереження. Використано дані внутрішнього моніторингу та зовнішніх джерел (Литва, Одеса, мережа Elan). На прикладі аварійного знеструмлення сегмента міської мережі продемонстровано, як кореляційне зіставлення та аналіз часової узгодженості метрик дозволяють об'єктивно ідентифікувати інфраструктурні зв'язки та оцінити вплив поведінкових факторів користувачів на деградацію каналів зв'язку.

Ключові слова: об'єктивізація, телеметрія мереж, моніторинг, часові ряди.

Традиційний моніторинг часто обмежений однією точкою спостереження, що призводить до суб'єктивності інтерпретації подій. Об'єктивізація стану мережі потребує зіставлення даних із внутрішніх сегментів та декількох незалежних зовнішніх джерел (локальних та глобальних). Такий підхід дозволяє верифікувати подію не лише за фактом зміни метрик, а й за характером їхнього поширення в мережевому середовищі.

Для дослідження використано три незалежних джерела телеметрії мережевої інфраструктури підприємства (ICMP RTT та доступність) (рис. 1):

1. Solar Net (Internal): Стан вузлів pechi, disp_ap (оптичні канали) та north_lte, south_lte (точки доступу MikroTik wAP LTE kit, з'єднані через Wi-Fi мости).
2. Ping_internet (External Global): Моніторинг WAN-інтерфейсів із вузла, розташованого у Литві.
3. Elan_ping_inet (External Local): Моніторинг тих самих інтерфейсів із локальної точки в м. Одеса (мережа Elan).



Рис. 1 Моніторинг джерел телеметрії

Об'єктивізація події. О 12:25 було зафіксовано аварійну подію, пов'язану зі зникненням електроживлення у значній частині м. Одеса.

Процеси у локальному сегменті

Вузли north_lte та south_lte втратили зв'язок через Wi-Fi мости та автоматично перемкнулися на інтегровані LTE-модеми (Vodafone). Це об'єктивується різкою зміною профілю затримки (з 1-2 мс до 60-90 мс) та зростанням джитера.

Диференціація через точки спостереження

Порівняння графіків із Литви та мережі Elan (Одеса) показало ідентичну картину деградації для операторів Vega та Vodafone. Одночасна повна відмова FTTB-каналу Vega та різке зростання затримок у мережі Vodafone (RTT > 100 мс) вказують на можливу спільну інфраструктурну залежність або спільний фактор деградації.

Чинники деградації

Об'єктивний аналіз виявив, що стабільність операторів Tenet та Kyivstar залишалася незмінною для обох точок спостереження (Литва та Елан). Це дозволяє стверджувати, що проблема Vodafone/Vega не була глобальною проблемою маршрутизації, а мала локальний інфраструктурний характер (знеструмлення спільних вузлів). Додатковим фактором деградації LTE став екзогенний спільний запит: масовий перехід побутових користувачів та іншої інфраструктури на мобільний інтернет після знеструмлення фіксованих мереж. Це створило аномальне навантаження на базові станції оператора та змінило динамічні маршрути трафіку.

Підхід до математичної оцінки об'єктивності

Підхід до математичної оцінки об'єктивності базується на методах статистичного аналізу часових рядів та нормалізованого виявлення аномалій у телеметричних системах [1–3]. Для верифікації подій використовується сукупна функція відхилення $F_{state}(t)$, нормалізована за волатильністю кожного джерела:

$$F_{state}(t) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \frac{|RTT_i(t) - \underline{RTT_i}|}{\sigma_i}$$

де:

1. $\underline{RTT_i}$ - очікуване або середнє значення затримки для конкретного маршруту;
2. w_i - вагові коефіцієнти каналів;
3. σ_i - середньоквадратичне відхилення відповідного часового ряду;
4. N - кількість незалежних телеметричних джерел.

Нормалізація відхилень через середньоквадратичне відхилення дозволяє порівнювати канали з різними типовими значеннями затримки та різною варіативністю телеметричного сигналу [1]. Такий підхід узгоджується зі статистичними методами виявлення аномалій у часових рядах, де нетипові стани визначаються за відхиленням поточних значень від очікуваного рівня [2].

Запропонована функція $F_{state}(t)$, поєднує мережеві метрики кругової затримки RTT, що використовуються для оцінювання часу проходження пакета між вузлами [4], та варіації затримки пакетів, яка характеризує нестабільність часових параметрів передавання [3], зі статистичним підходом до нормалізації та виявлення аномальних станів [1, 2]. Чим вище значення $F_{state}(t)$ одночасно для локальної точки спостереження (Елан) та глобальної точки спостереження (Литва), тим вищим є ступінь підтвердження інфраструктурного характеру події. Це дозволяє відокремлювати локальні мережеві збої від зовнішніх інфраструктурних подій, які одночасно впливають на декілька незалежних або частково пов'язаних сегментів мережі.

Висновки

Запропонований підхід до контекстної об'єктивізації дозволяє:

1. Ідентифікувати перехід на резервні канали LTE без втрати контролю над вузлами.
2. Верифікувати масштаб аварії шляхом зіставлення даних із локальної (Елан) та глобальної (Литва) точок моніторингу.
3. Об'єктивувати інфраструктурні та організаційні зв'язки між операторами (Vega/Vodafone) та вплив поведінкового фактора користувачів на стабільність LTE-сегмента. Це забезпечує вищу точність діагностики у порівнянні з класичними методами одноточкового моніторингу.

References

1. Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to Statistical Quality Control* (8th ed.). Hoboken : Wiley.
2. Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly Detection: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 41(3), 1–58. <https://doi.org/10.1145/1541880.1541882>.
3. Demichelis, C., & Chimento, P. (2002). *RFC 3393: IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*. Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC3393>.
4. Almes, G., Kalidindi, S., & Zekauskas, M. (1999). *RFC 2681: A Round-trip Delay Metric for IPPM*. Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC2681>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.20

Yevhen Teneta,
Valerii Sytnikov

CONTEXTUAL OBJECTIFICATION OF INTERRELATED TELEMETRIC EVENTS IN NETWORK INFRASTRUCTURE

An approach to the contextual objectification of network infrastructure states through comparative analysis of time series obtained from different observation points is proposed. Data from internal monitoring and external sources, including Lithuania, Odesa, and the Elan network, were used. Using the example of an emergency power outage affecting a segment of the urban network infrastructure, it is demonstrated how correlation-based comparison and analysis of temporal consistency of metrics make it possible to objectively identify infrastructure relationships and assess the impact of user behavior factors on communication channel degradation.

Keywords: objectification, network telemetry, monitoring, time series.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Євген Тенета, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна. E-mail: 9526686@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7917-5689>.

Yevhen Teneta, PhD Student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine. E-mail: 9526686@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7917-5689>.

Валерій Ситніков, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна. E-mail: sitnikov@op.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>.

Valerii Sytnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine. E-mail: sitnikov@op.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>.

© Є. Тенета, В. Ситніков

Стаття отримана редакцією 26.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.21

Олексій Тогоєв

ЛОКАЛІЗАЦІЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У WIFI-МЕРЕЖАХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

У роботі досліджено можливість локалізації рухомих об'єктів у WiFi-мережах у реальному часі на основі аналізу показників RSSI та методу WiFi-відбитків. Локалізація включає офлайн-етап формування радіокарти та онлайн-етап порівняння поточних векторів RSSI з базою даних. Запропонований підхід дозволяє визначати місцезнаходження об'єктів за допомогою стандартного WiFi-обладнання без використання спеціалізованих антен. Проаналізовано вплив завад і запропоновано показник якості зв'язку LQI. Таке рішення є доступним, економічно вигідним і придатним для широкого спектру застосувань без додаткових витрат на обладнання.

Ключові слова: RSSI, Wi-Fi, локалізація об'єктів, Wi-Fi fingerprinting, бездротові мережі, моніторинг у реальному часі.

У бездротових мережах одним із ключових параметрів є RSSI (Received Signal Strength Indicator) – індикатор рівня прийнятого сигналу, який характеризує силу сигналу між передавальним та приймальним пристроями. Цей показник широко використовується у задачах локалізації рухомих об'єктів, виявлення присутності та моніторингу змін у середовищі в режимі реального часу.

RSSI подається у вигляді відносних значень або в децибелах відносно одного мілівата (dBm). Значення RSSI залежить від відстані між джерелом сигналу та приймачем: зі збільшенням відстані рівень сигналу зменшується внаслідок загасання радіохвиль. На показник також впливають перешкоди, зокрема стіни, меблі, люди та інші джерела радіосигналів.

У вільному просторі потужність сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані. Проте в реальних умовах на поширення сигналу додатково впливають відбиття, розсіювання, багатоприменовність та інтерференція, що ускладнює точне прогнозування параметрів сигналу.

Сучасні WiFi-пристрої та точки доступу підтримують визначення RSSI, однак отримані значення можуть відрізнятися залежно від моделі обладнання та особливостей реалізації вимірювань виробником. Незважаючи на це, RSSI залишається доступним і практичним інструментом для:

- виявлення об'єктів у просторі;
- аналіз руху;
- визначення розташування;
- розрізнення типів об'єктів.

Для реалізації систем локалізації рухомих об'єктів широко застосовується метод Wi-Fi-відбитків (Wi-Fi fingerprinting). Його перевагою є відсутність необхідності знати точне розташування точок доступу або обчислювати кут приходу сигналу. Метод базується на використанні векторів RSSI, отриманих від доступних точок доступу, для визначення положення об'єкта, особливо в приміщеннях, де GPS працює недостатньо ефективно. Процес формування WiFi-відбитків складається з двох етапів:

Офлайн-етап (навчання) – збір багатовимірних векторів RSSI у визначених точках простору та формування радіокарти.

Онлайн-етап (моніторинг) – порівняння поточного вектора RSSI із записами бази даних для визначення місцезнаходження рухомого об'єкта.

Точність локалізації знижується через нестабільність RSSI, викликану багатоприменовними перешкодами, змінами навколишнього середовища, різною видимістю точок доступу та особливостями конфігурації пристроїв. Крім того, дані RSSI мають просторову та часову кореляцію, що необхідно враховувати під час побудови моделей локалізації.

У запропонованій системі сервер періодично виконує сканування каналів зв'язку та збирає дані RSSI від точок доступу. Отримані результати передаються до бази даних, де використовуються для побудови мапи поширення сигналу та визначення місцезнаходження рухомого об'єкта в реальному часі.

Для оцінювання відстані між передавачем і приймачем використовується модель втрат потужності сигналу:

$$PL = PL0 + 10\gamma \times \log_{10}(d/d0) + \Delta, \quad (1),$$

Де:

PL – втрати на відстані d , м;

$PL0$, dBm – загальні втрати на відстані $d0$, м;

γ – експонента втрат в залежності від навколишнього середовища;

d – відстань між об'єктом і контрольною точкою доступу;

Δ – змінна, яка враховує зміну середнього значення, її також часто називають тінювим згасанням [1].

Отже, для реалізації прототипу для пошуку об'єктів за допомогою RSSI позначимо кожен запис у базі даних за допомогою позначення $RSSI_{j,i}$, де індекс j позначає APj , на якому вимірювався сигнал, а індекс i – API , з якого прийшов сигнал, що вимірювався. При визначенні параметра γ_i для поширення сигналу, що надходить з API , необхідно зробити запит до БД щодо вимірювань $RSSI_m$, та $RSSI_{n,i}$, зібраних на інтервалі δ , де індекси m , n представляють пару АТ, які не є API .

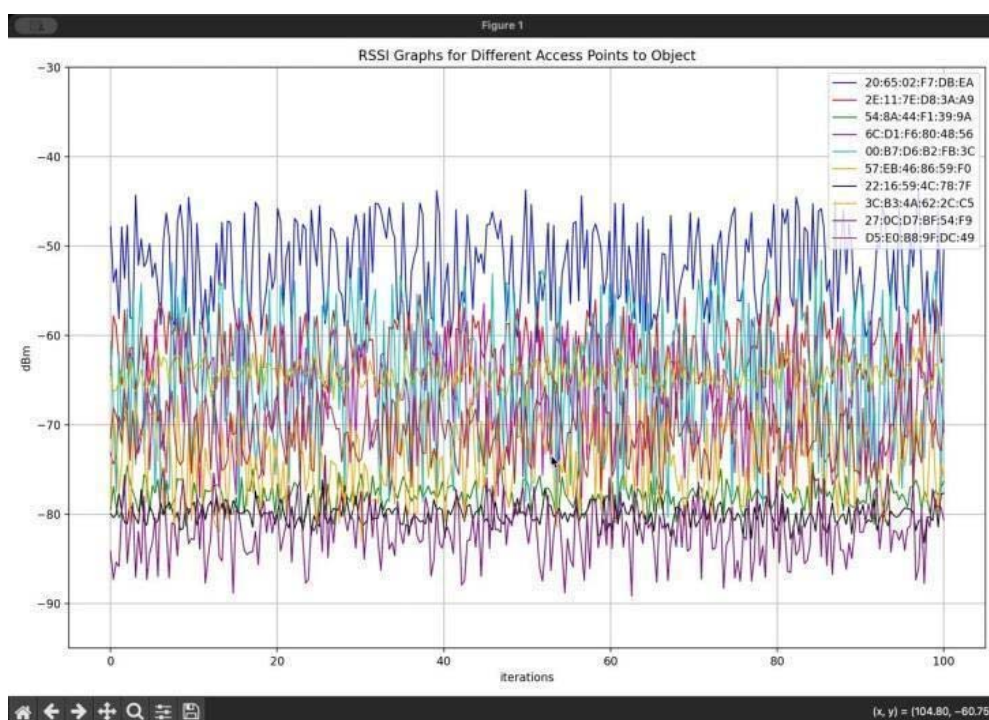


Рис. 2. Результати отриманих даних з точки доступу AP1

Проміжне сканування ефіру надало результати, наведені на рис. 2. Проміжні результати отриманих даних з точок доступу наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати сканування з точки доступу AP

№	MAC	AP	RSSI, dBm	Time	Count
1	20:65:02:F7:DB:EA	AP1	-43	12:00:01	77
2	34:3B:FE:93:9A:49	AP1	-54	12:00:51	71
3	66:9A:D7:B5:86:45	AP1	-80	12:00:58	21
4	E2:7C:36:86:37:1D	AP1	-60	12:00:44	89
5	EA:D0:42:FB:8D:4B	AP1	-77	12:00:28	30

Отже, результати сканування показали, що рівень Wi-Fi-сигналу для точки доступу AP1 змінюється в широкому діапазоні – від -43 dBm до -80 dBm. Найкращий рівень сигналу було зафіксовано для об'єкта 1 (-43 dBm), що свідчить про близьке розташування об'єкта до точки доступу. Для інших об'єктів рівень сигналу становив -54 dBm, -60 dBm, -77 dBm та -80 dBm, що відповідає середньому та слабкому рівням прийому сигналу.

Висновки

Запропонований метод, заснований на прослуховуванні сигналів Wi-Fi, є подальшим розвитком Рекомендацій ITU-R [2]. Цей підхід може бути застосований до широкого спектру бездротового телекомунікаційного обладнання та вимагає лише базової інформації про точку доступу. На основі показників RSSI будується мапа місцезнаходження пацієнта, що дає змогу здійснювати відстеження об'єктів у просторі за допомогою звичайного смартфона з активованим передавачем Wi-Fi.

Недоліком методу є те, що показник RSSI недостатньо корелює з фактичною якістю сигналу, однак він придатний для приблизної оцінки рівня прийому. Більш точну інформацію може надати показник якості зв'язку (Link Quality Indicator, LQI), що відображає відсоток неушкоджених даних, які проходять через приймач. Значення LQI часто подають у форматі 9:100, де перше число відображає RFMD (або RF), а друге – фактичний відсоток якості зв'язку.

Доцільність застосування цього параметра підкріплюється тим, що в умовах локальної мережі з численними пристроями, які мають увімкнені Wi-Fi-модулі, виникають додаткові завади. У такій ситуації потужність сигналу може бути високою, проте співвідношення сигнал/шум залишається нижчим за необхідний рівень для точної локалізації рухомого об'єкта. Для більш надійного використання LQI доцільніше застосовувати Bluetooth-модулі, які також інтегровані в більшість сучасних гаджетів, або інші технології стандарту 802.15.

Важливою перевагою запропонованого алгоритму є те, що він не потребує спеціалізованих антен, які застосовувалися у попередніх дослідженнях [3; 4]. На відміну від методів, що поклалися на складні антенно-конфігураційні рішення для досягнення високої точності, запропонований алгоритм використовує вбудовані методи обробки сигналів і стандартні антени, що широко представлені у більшості пристроїв. Це робить його доступним, економічно вигідним і придатним для широкого спектру застосувань без додаткових витрат на обладнання.

References

1. Antonucci A., et al., Performance analysis of a 60-GHz radar for indoor positioning and tracking. Proc. of the 2019 Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Pisa, Italy, 30 September – 3 October 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/IPIN.2019.8911764.
2. Anisa G., Widianingsih F. SolarWinds attack: Stages, implications, and mitigation strategies in the Cyber Age. Electronic Integrated Computer Algorithm Journal. 2024. Vol. 2. P. 47–52. DOI: 10.62123/enigma.v2i1.31.
3. Tampubolon P., Putri E. E., Zaliani N., Raditya M. Identifikasi malware pada Wireshark. Jurnal Kajian Teknik Elektro. 2024. Vol. 9. P. 64–68. DOI: 10.52447/jkte.v9i1.8004.
4. Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір 107427. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма "Складання Wi-Fi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру"»: комп'ютерна програма / О. Р. Тогоєв, В. Д. Веселовський, О. В. Дворник, І. М. Журавська, К. О. Обухова, Є. О. Ухань; дата реєстр. 17.08.2021, Бюл. No 66.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.21

Oleksii Tohoiev

REAL-TIME LOCALIZATION OF MOVING OBJECTS IN WI-FI NETWORKS

This paper investigates the possibility of locating moving objects in Wi-Fi networks in real time based on the analysis of RSSI values and the Wi-Fi fingerprinting method. The localization process includes an offline stage of radio map formation and an online stage of comparing current RSSI vectors with the database. The proposed approach allows for determining the location of objects using standard Wi-Fi equipment without the need for specialized antennas. Furthermore, the study analyzes the impact of signal interference and proposes the use of the Link Quality Indicator (LQI) to provide more accurate information. Such a solution is highly accessible, cost-effective, and suitable for a wide range of practical applications without incurring any additional equipment costs.

Keywords: RSSI, Wi-Fi, object localization, Wi-Fi fingerprinting, wireless networks, real-time monitoring.

Відомості про автора / Information about the Author

Тогоєв Олексій, PhD, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>

Oleksii Tohoiev, PhD, Senior Lecturer of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.22

Олександр Трунов,
Володимир Герасимюк

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

Представлено на основі порівняльного аналізу систем і особливостей різки деталей листового матеріалу концептуальну модель інноваційної автоматизованої системи керування (АСК). Розроблено математичну модель зв'язку між кінематичними параметрами просторового руху різача, формою зовнішнього контуру деталі та величиною дискретизації часу. Аналітично виведено модель оцінки відносної похибки. Представлено алгоритм та ПЗ, що дозволяє проводити експрес контроль, визначати відносні та абсолютні похибки форми контурів деталей. Проведено імітаційне моделювання, представлено числові данні його результатів.

Ключові слова: АСК різки деталей, концептуальна модель, просторовий рух, довільний контур деталі, кінематичні параметри, моделювання, оцінка похибки.

Вступ

Потреба збільшення ступеню повноти використання матеріалу заготовки лишається однією із задач підвищення ефективності технологічного устаткування [1, 2]. Глобальна трансформація, що зумовлена впровадженням концепцій Industry 4.0 та успіхи інноваційних технологій тільки розширюють перехід до автономних виробничих систем лазерного різання із листового матеріалу [3]. Однак, пошуки розв'язку задачі заощадження матеріалу сировини лишаються практично значимими. Особливо це актуально в умовах сучасного ринку, де ключовими факторами є швидкість випуску продукції при високій індивідуалізації та частій зміні номенклатури замовлень. У зв'язку з цим лазерне виготовлення деталей із листового матеріалу, завдяки своїй гнучкості та якості різки виступає однією з найбільш затребуваних технологій [4]. Це обумовлено здатністю лазерних систем забезпечувати точність обробки, незначний перегрів і як наслідок малі залишкові термічні деформації та високий коефіцієнт використання матеріалу. Однак, наявність складних форм контурів деталей і необхідність частой змін типів матеріалів та товщини листа вимагають створення автоматизованих систем керування (АСК) [5]. Такі АСК адаптуватимуться до мінливих умов номенклатури замовлень, використовуючи дані зворотного зв'язку мережі сенсорів температурного поля та технічного зору в реальному часі. Розвиток гнучких АСК, що інтегрують контроль режимних параметрів лазерного різача, систему керування його рухом та засоби промислової роботизації, які забезпечують поділ і рух окремих деталей є критично важливим [6]. Очікується, що комплексна реалізація АСК технологій лазерної різки, підвищуватиме ефективність машинобудівних підприємств, які інтегровані у цифрове середовище. Все це разом узятє формує потребу постановки та розв'язку задачі підвищення ефективності АСК виготовлення деталей із листових матеріалів. Її реалізація шляхом аналітичного формування моделей руху різача за довільним заданим контуром деталі інформаційно забезпечить трьох координатне переміщення системою приводів та економію матеріалу сировини.

2. Аналіз останніх публікацій

Роботу [3] присвячено вибору найкращої технології для різання металу. Наведені результати порівняння гідроструменевого, а також лазерного та плазмового різання, які показують, що із ростом твердості матеріалу швидкість гідроструменевого різання уповільнюється, а перевагу набуває лазерне різання. Однак його перевага спостерігається у порівнянні із плазменним різанням для тонких та середніх товщин листів за якістю та швидкістю різки. Для товстих листів перевагу за швидкістю, набуває плазменне різання. Однак, його якість не завжди задовільна [3]. Роботу [4] присвячено порівняльному аналізу типів лазерних джерел. Порівнюються газові CO₂ лазери, діодні та твердотільні. Наводяться данні, що доля CO₂ лазерів високої потужності у сфері обробки матеріалів і досі складає 41,1%, тобто найбільшу частку ринку в цій галузі. Тут же стверджується, що перевагою твердотільних лазерів є те, що їхнє випромінювання може проводитися через оптичні волокна, але такі лазери

мають високу вартість та низьку ефективність. Поява потужних діодних лазерів та їх застосування як засіб накачки твердо тілних лазерів є одним із надійних інноваційних рішень [4].

Головною не розв'язаною задачею, розв'язок якої обмежує розвиток АСК розкрою є формування моделі зв'язку між кінематичними параметрами просторового руху різача та формою контуру деталі.

3. Мета та задачі дослідження.

Підвищити ефективність процесу будови математичної моделі та розширити можливості визначення кінематичних параметрів руху різача відповідно до контуру деталі і формування режимних параметрів лазеру розкрою листового матеріалу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

1. розробити структуру АСК лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу;
2. розробити математичну модель з розширеними можливостями для визначення кінематичних параметрів руху різача відповідно до контуру деталі;

1. розробити математичну модель формування режимних параметрів лазеру розкрою листового матеріалу.

4. Формування структури АСК лазерної вирізки деталей із листового матеріалу.

4.1. Розробка концептуальної моделі АСК виготовлення деталей із листового матеріалу лазерним різачом

На підставі аналізу продукції відомих фірм TRUMPF- Київ, RSL, Bodor [3, 4] було сформовано концептуальну модель АСК, яку представлено чотирма підсистемами і відображено на рисунках 1- А, 1- Б, 1- В, 1- Г.

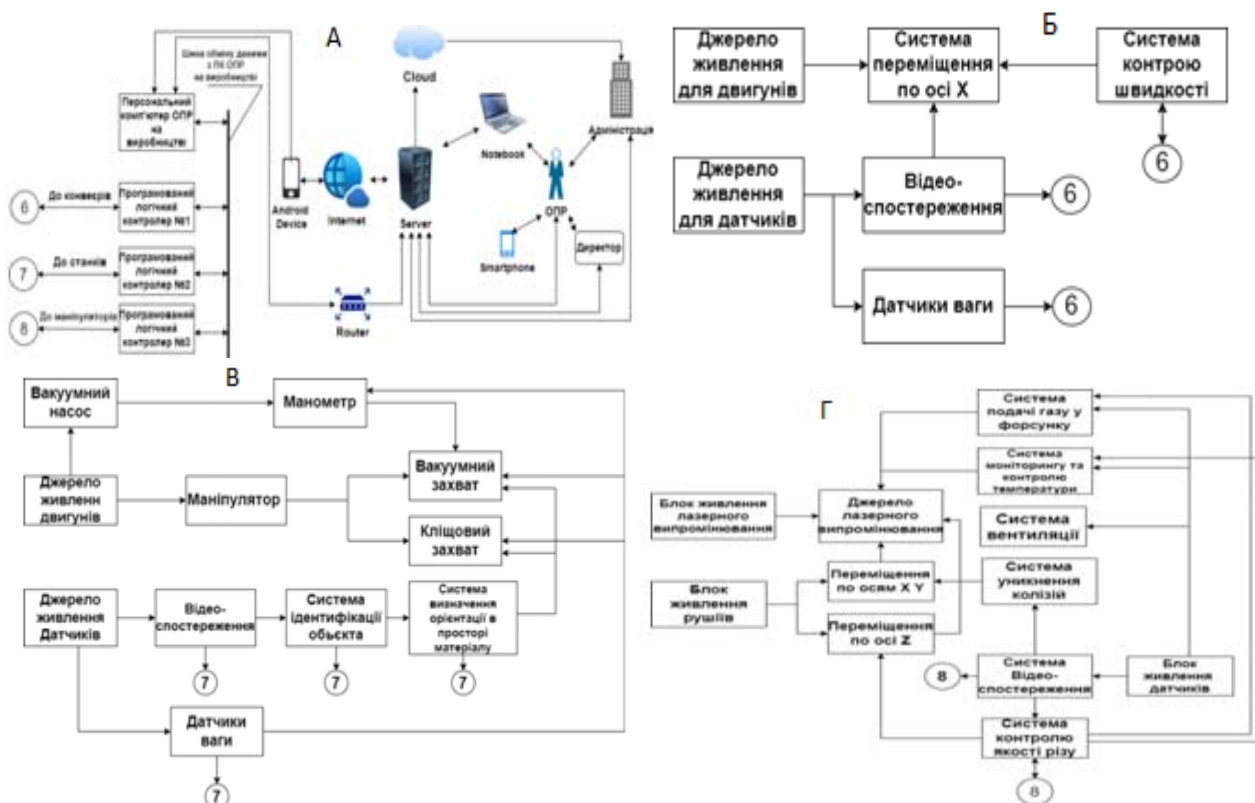


Рис. 1. Концептуальна модель технологічного процесу лазерної різки листового матеріалу: А – концептуальна модель взаємодії директора, адміністрації, особи, що приймає рішення через її персональний комп'ютер з сервером, хмарними сервісами, мережами та засобами керування; Б – концептуальна модель засобів реалізації технології розкрою: конвеєрами, маніпуляторами, станки ЧПК лазерного розкрою; В – концептуальна модель засобів контролю, датчиків, маніпуляторів, систем відео спостереження, ідентифікації, орієнтації заготовки, вакуумної та живлення; Г – концептуальна модель переміщення лазерного різача, лазера, джерел живлення лазера, систем контролю, спостереження та охолодження.

Однозначне з'єднання і зв'язок підсистем концептуальної моделі забезпечується шляхом застосування графічних роз'єднувачів 6, 7, 8. Зв'язок та керування через застосунок, що написано для Андроїдних смартфонів може здійснюватися через особу, яка приймає рішення. Крім того, передбачено передачу інформації через

мережеві інформаційні канали і хмарні сервіси. Інформація попадає на Андроїдний смартфон, а через його застосунок передається (у обох напрямках) на ПК особи, яка приймає рішення.

4.2. Розробка математичної моделі параметрів руху лазерного різака у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу

Для формування математичної моделі параметрів руху лазерного різака задачу було узагальнено і представлено наступним чином. Для однорідного листового матеріалу, який є заготовкою для виготовлення плоских деталей постійної товщини і однорідних теплофізичних властивостей та який має початкову форму прямокутника, товщини яких дорівнюють товщині листа, поставимо задачу вирізати плоску деталь. За основу постановки задачі визначення кінематичних параметрів візьмемо одну деталь, контур якої на площині описано функцією $f(x, y)$ (рис. 2).

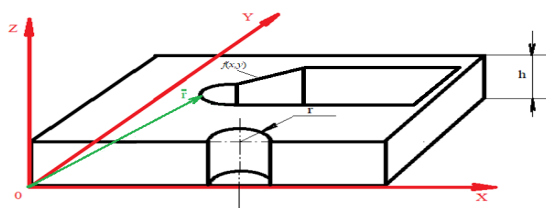


Рис. 2. Схематичне представлення заготовки листа контурної різки

Задамо положення довільної точки на цьому контурі з поточними координатами x, y , та z . Подальший опис руху будемо здійснювати для фіксованого значення величини координати z . Далі положення центру вісі п'ятна лазерного променя різака точку O , будемо задавати радіус вектором $r(x, y)$. Побудуємо кінематичну модель руху як функцію залежну від часу. Припустимо, що контур деталі, як траєкторія руху точки O $f(x(t), y(t))$ є неперервною та тричі диференційованою функцією часу. За цих умов і припущень її розклад у звичайний ряд Тейлора або рекурентний ряд при значній нелінійності функції контуру або нелінійній динаміки механізмів, забезпечує будову моделі у три або два доданки [1]. Останню у означених позначках може бути записано:

$$f(x, y) = f(x, y)|_k + f'_x(x, y)|_k \Delta x + f'_y(x, y)|_k \Delta y. \quad (1)$$

Таким чином, якщо перетворити скінченні прирости Δx та Δy і подати їх із врахуванням конструкції системи приводів, що забезпечує рух засобу різки, то проекції вектора швидкості на вісі базової системи координат запишемо:

$$\Delta x = \frac{dx}{dt} \Delta t = v_x \Delta t; \quad \Delta y = \frac{dy}{dt} \Delta t = v_y \Delta t. \quad (2)$$

Якщо, врахувати другі похідні, у тому числі і змішані, від закону змін контуру деталі, то запишемо:

$$f(x, y) = f(x, y)|_k + f'_x(x, y)|_k \Delta x + f'_y(x, y)|_k \Delta y + f''_{xx}(x, y)|_k \frac{\Delta x^2}{2} + f''_{yy}(x, y)|_k \frac{\Delta y^2}{2} + f''_{xy}(x, y)|_k \Delta x \Delta y. \quad (3)$$

Аналіз розвинення $f(x, y)$ функції опису контуру деталі із врахуванням функції приростів координат у базовій системі координат $OXYZ$ (рисунок 2) дозволяє встановити зв'язок між миттєвими значеннями проекцій вектора швидкості та прискорень:

$$f(x, y, t) = f(x, y, t_k)|_k + f'_x(x, y, t_k)|_k v_x \Delta t + f'_y(x, y, t_k)|_k v_y \Delta t + f''_{xx}(x, y, t_k)|_k v_x^2 \frac{(\Delta t)^2}{2} + f''_{yy}(x, y, t_k)|_k v_y^2 \frac{(\Delta t)^2}{2} + f''_{xy}(x, y, t_k)|_k v_x v_y (\Delta t)^2. \quad (4)$$

За своєю структурою це розвинення подає процес руху променю різача, як квадратичний поліном компонент вектора швидкостей, квадрату швидкості та фіксованого часу t_k і приростів часу Δt . За останнє можливо застосовувати як реальний так і системний час, величина якого розраховується за допомогою числа Стерджеса або за загальною довжиною контуру деталі. Коефіцієнти ряду (4) визначаються аналітично за функцією опису контуру деталі $f(x, y)$ та її похідних у фіксовані моменти часу t_k .

5. Моделювання впливу контуру деталі та кінематичних параметрів руху лазерного різача на похибку позиціонування.

Для проведення моделювання було введено відносну похибку:

$$\varepsilon(x(t), y(t)) = \frac{f(x(t), y(t)) - f(x, y)|_k}{f(x, y)|_k} = \frac{f(x(t), y(t))}{f(x, y)|_k} - 1. \quad (5)$$

На першому етапі моделювання було узятю модель (1), що дозволило представити похибку, як функцію компонент вектора швидкості v_x та v_y . Результати моделювання подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив кінематичних параметрів руху на відносну похибку позиціонування

№	x, m	y, m	t_k , c	v_x 10, м/с	v_y 10, м/с	$\varepsilon(x, y)$, %
1	0,1	0	0	1	1	0,03
2	0,5	0	0	1	1	0,15
3	1	0	0	1	1	0,3
4	0,1	0,1	0	1	1	0,0598
6	0,5	0,1	0	1	1	0,1774
7	1	0,1	0	1	1	0,3207
8	0,1	0,5	0,1	2	2	0,3549
9	0,5	0,5	0,1	2	2	0,5596
10	1	0,5	0,1	2	2	0,7866
11	0,1	1	0,5	2	2	0,6415
12	0,5	1	0,5	2	2	0,7866
13	1	1	0,5	2	2	0,9317

Результати аналізу даних таблиці 1 засвідчують чутливість моделі до змін форми контуру деталі та демонструють здатність до застосування. Вплив властивостей приводів на загальну похибку позиціонування ускладнюється багатофакторністю процесу, що у свою чергу суттєво збільшує обсяги інформації. Очевидно, що подальший аналіз необхідно проводити із використанням узагальнюючих інформаційних стиснень або із використанням фізичних обмежень на вхідний інформаційний потік.

Висновки

1. Розроблена концептуальна модель АСК виготовлення деталей із листового матеріалу, яка визначає структурні засоби і підсистеми та зв'язки між ними інноваційного проєкту лазерної різки, що здатен заощаджувати матеріал сировини.

2. Розроблена математична модель параболічної апроксимації, яка зв'язує форму контуру деталі та проєкції вектору швидкості і елементарні переміщення, що слугує основою моделювання і оцінки похибки для вибору режимних параметрів приводів механізму різача

References

- Муляр, Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина І: навчальний посібник/ Ю. І. Муляр, С. В. Репінський. – Вінниця: ВНТУ, 2019.– 99 с.
- Струтинський В.Б., Гуржій А.М.: Монографія. – Житомир: ПП «Рута», 2023.– 524 с.
- Daniel Krajcarz. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. December 2014. Procedia Engineering 69:838-843. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.061. License CC BY-NC-ND 3.0
- Friedrich Bachmann. High Power Laser Sources for Industry and their Applications. ROFIN-SINAR Laser GmbH, Berzeliusstr. 83, D-22113 Hamburg. Germany

5. Alexander Trunov Development of an artificial intelligence tool and sensing in informatization systems of mobile robots. SMARTINDUSTRY-2024: Int. Conf. on Smart Automation & Robotics for Future Industry, April 18 - 20, 2024, Lviv, Ukraine. pp.15-31 .
6. Alexander Trunov. Formation of the method of description and control of the relative position of the gripper phalanges for anthropomorphic robot SMARTINDUSTRY-2024: Int. Conf. on Smart Automation & Robotics for Future Industry, April 18 - 20, 2024, Lviv, Ukraine pp.100-110.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.22

Alexander Trunov,
Volodymyr Herasymiuk

AUTOMATED SYSTEMS FOR LASER MANUFACTURING OF PARTS FROM SHEET MATERIAL

Based on a comparative analysis of systems and features of cutting parts of sheet material, a conceptual model of an innovative automated control system (ACS) is presented. A mathematical model of the relationship between the kinematic parameters of the spatial motion of the cutter, the shape of the external contour of the part and the value of time discretization is developed. A model for estimating the relative error is analytically derived. An algorithm and software are presented that allow for express control, determining the relative and absolute errors of the shape of the contours of the parts. Simulation modeling is carried out, numerical data of its results are presented.

Keywords: ACS of cutting parts, conceptual model, spatial movement, arbitrary part contour, kinematic parameters, modeling, error estimation

Відомості про автора / Information about the Author

Олександр Трунов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Володимир Герасимюк, студент спеціальності “Автоматизації, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” факультету Комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: volodymyr.herasymiuk@gmail.com.

Volodymyr Herasymiuk, student of the specialty “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: volodymyr.herasymiuk@gmail.com.

© О. Трунов, В. Герасимюк

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.23

Олександр Трунов,
Юрій Димитров

ПРІОРИТЕТНЕ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ЧОВНИКОВИХ ЗАСОБІВ У СКЛАДСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ

Розглянуто особливості керування потоками човникових засобів переміщення. Проаналізовано приклади та узагальнено структуру транспортної системи до якої залучено конвеєри, палети, запаковані комплекти товарів та човники, що придатні до колективного одночасного переміщення декількох між зонами. Запропоновано представлення оцінки ефективності перевезення. Розв'язано задачу пошуку безрозмірного критерію ефективності для організації найбільш продуктивного переміщення товару і алгоритму, що максимізує операційну та загальну ефективність діяльності складу.

Ключові слова: автоматизований склад, безлюдні технології, човникові перевезення, палети, моделі ефективності

Вступ

Глобалізація світової економіки та індивідуалізація електронної комерції кардинально змінює роль складу як логістичного вузла. Активізація індивідуального обслуговування споживачів та успіхи інформаційних технологій, штучного інтелекту (ШІ) і Інтернету речей (IoT), автоматизації і робототехніки у тому числі автоматизований склад (АС) розширює свої функції. Розроблені технологічні засоби розвантаження і завантаження, переміщення і обліку та керування потоками човникових засобів переміщення та палет в обмеженій робочій зоні докорінно змінює транспортну систему АС. Тепер її структура характеризується як транспортна. До її складу залучено набори палет, що рухаються між зонами по колу і придатні виконувати переміщення між зонами. Вибір і формування комплектації кожної з палет за замовленням і за місцем розташування на складі і визначає трудно - та енерговитрати безлюдного устаткування. Оцінка ефективності* перевезення і всієї операції від моменту придбання до реалізації буде визначатися у тому числі і ефективністю складської операції. Пошук алгоритму, який максимізує операційну та загальну ефективність переміщення і ефективність діяльності АС в цілому постає новою задачею оптимального проектування.

2. Аналіз останніх робіт

В роботі [1] розглядаються функціонування та аспекти діяльності АС, їх ефективність та можливості її підвищення завдяки впровадженню АСК, роботів, дронів та спеціалізованим конвеєрів та їх оптимальному керуванню. Для оцінки діяльності вводяться інтегральні показники за трьома групами: якість; ефективність та недоліки. Запропонований підхід дозволяє інтегрально оцінювати економічну діяльність АС у цілому. Однак, на етапі проектування та експлуатації виникає необхідність перевизначити причини неефективної роботи елементів і алгоритмів управління, а здійснювати такий аналіз не представляється можливим. В роботі [2] розглядаються вплив ризиків на функціонування та аспекти діяльності АС, їх ефективність. Не зважаючи на те, що визначено фактори ризику, пов'язані тільки з перевезенням температурно-чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах з використанням різних видів транспорту та їх взаємодію в роботі наведено приклади оцінки ризику. Цей алгоритм враховує різноманітність модульних перевезень та є прикладом визначення небезпечних ситуацій, які характерні і для автомобільного перевезення. Однак, наведені методи оцінки ризиків не розповсюджуються на опис внутрішньої складської транспортних потоків комбінованого або безлюдного перевезення. У зв'язку з цим, виділення факторів ризику та формування методів їх оцінки і упередження небезпечних ситуацій є критично важливим. Крім того, гостро постає потреба адаптації до нових технологій, таких як IoT і ШІ [2]. Розробки та практичні реалізації інноваційних принципів, що реалізовано у діючій АС представлено у проекті [3]. Останній наочно демонструє, що удосконалення внутрішньої структури АС потребує нових методів опису внутрішніх розташувань і переміщень товарів, способів опису функціонування та економічних методів оцінки їх діяльності. Причому виникає необхідність проводити аналіз з урахуванням конструктивних особливостей та режимних

параметрів, вартісних оцінок та ризику реалізації кожної із технологічних операцій. В роботі [4] представлено спосіб аналізу діяльності та оцінки ефективності безлюдної технології. Поставлена та розв'язана задача оптимального законодавче безконфліктного транспортування вантажів в умовах міста. Продемонстровано, що ефективність як цільова функція та ідея комплексного використання наземних, повітряних транспортних засобів і антропоморфних роботів та мережевих сервісів дозволяє оптимізувати перевезення без порушень законодавчих обмежень [4]. Однак, не зважаючи на інноваційну новизну розв'язку поставленої задачі його пряме застосування ускладнюється залежністю підрахунку від точності величин факторів, що впливають на ефективність. Так як на них у свою чергу суттєво впливають конструктивні особливості та режимні параметри і вартісні оцінки та ризики реалізації кожної із технологічних операцій.

*Під поняттям «ефективність» далі будемо розуміти комплексний показник, що визначається такими критеріями: результат, трудовитрати, енерговитрати, капітальні витрати, час на виконання операції, задіяні матеріальні ресурси, техніка та приміщення.

Таким чином, головною не розв'язаною проблемою, яка обмежує розвиток АСК сучасним АС є формування моделі ефективності як показника багатофакторного зв'язку. Ефективність встановлює зв'язок між кінематичними та режимними параметрами просторового руху вантажопотоків товарів, експлуатаційними витратами та способами застосування заощаджень при комбінованому споживанні із використанням мережевих пільг підключення і альтернативних відновлювальних джерел енергії та обліку ризиків.

3. Мета та задачі дослідження. Підвищити ефективність функціонування АС за рахунок будови математичної моделі ефективності операцій та процесу, що розширює можливості за рахунок оптимального вибору кінематичних та режимних параметрів просторового руху вантажопотоків товарів, заощадження експлуатаційних витрат та застосування комбінованого споживання мережевих пільг і відновлювальних джерел енергії та обліку ризиків.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

1. розробити структуру АСК сучасного АС, що використовує безлюдні технології шатлів та човникового перевезення;
2. розробити математичну модель з розширеними можливостями для визначення ефективності операцій;
1. розробити математичну модель ефективності технологічного процесу за даними про ефективність сукупних операцій.

4. Постановка та розв'язок задачі формування ефективності однієї операції руху товару та сукупності складських операцій.

4.1. Формування структури АСК сучасного складу, що використовує безлюдні технології шатлів та човникового перевезення.

Було розглянуто структурні реалізації складських технологій [1-3], що вже використовують різновиди човниково-палетної організації внутрішньо складських потоків вантажів із залученням засобів автоматизації і роботів у тому числі (рисунк 1).

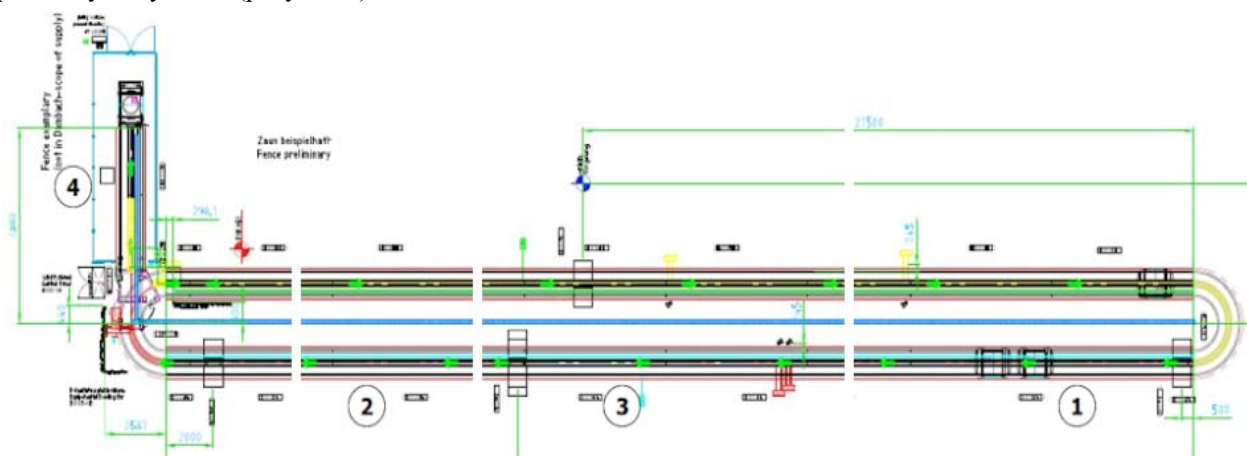


Рис. 1. Схематичне зображення проекту складських перевезень, що розбито на зони як функціональні модулі

У зв'язку з тим, що склад і організаційна структура засобів, що задіяні суттєво впливає на формування процесів та модель, яка їх описує, будемо вживати розбиття процесів на узагальнені модулі. Відображення технологічного процесу складських вантажних перевезень, що розбито на узагальнені зони представлено на рисунку 1. Означені зони, розглядатимемо як окремі функціональні модулі, у межах яких виконується окрема операція. Також операція має завершений кількісний вимір, який задовольняє вимозі, що піддається розрахунку та є одним із сукупності факторів оцінки результативності операції, а у сукупності із іншими факторами впливає на її ефективність* [4].

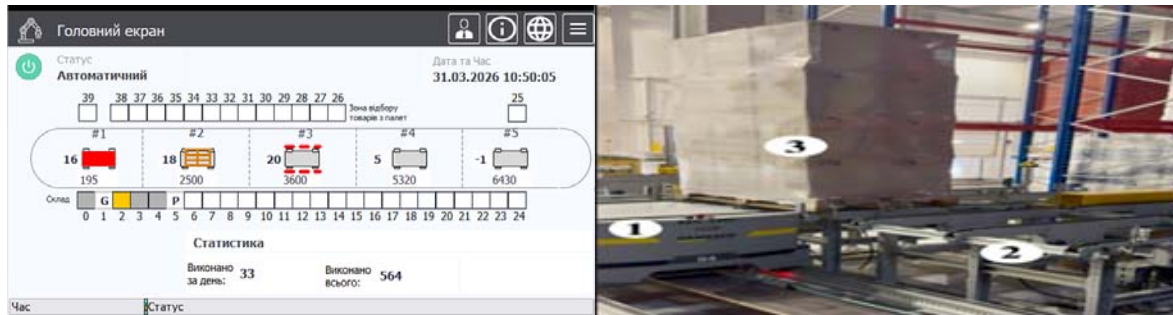


Рис. 2. Інтерфейс зон розвантаження / Рис. 3. Фото зони з шатлом – 1, палет завантаження перевезень АС палет – 2, що забирає палету з товаром.

Однозначність, прозорість та синхронність сприйняття розробником і оператором пропонується забезпечувати завдяки спеціальній структурі інтерфейсу. Вдовж лінії, що повторює трек руху палет у формі прямокутників – розташовано та схематично зображено палетний конвейєр. Простір розбито на наступні зони. Зона завантаження в АС є – розподіленою від нульової (0) до 24. Зона відвантаження зі складу теж розподілена від 25 до 39 зони. Однак, з огляду безпеки рознесено вхід та вихід на протилежні боки АС, яких на складі має бути декілька. Із них від першої до 24 зони завантаження/відвантаження у певний ряд складу. Від 26 до 38 - зони ручного відбору товару (палету розпаковують і дрібно штучно сортують). Зону 39- передбачено для збору у штабель (зона штабелювання - стакерування) пустих палет. Штрафною зоною призначається будь яка із зон у випадку виникнення помилки у наслідок втрати так званого "трекінгу" (транспортного номеру вантажу). За цих умов палета відвантажується на штрафну зону.

4.2. Розробка математичної моделі розширеної оцінки ефективності операцій АС.

Було розглянуто перебіг процесів у виокремлених зонах структури АСК сучасного АС, що використовує безлюдні технології шатлів, палет та контрольованого перевезення. Для удосконалення кількісних оцінок ефективності для подальшого креативного аналізу та розповсюдження на операції човникової та палетної технологій складських переміщень було застосовано результати та досвід розв'язку оптимізаційних задач при впровадженні дронів у побуті [4]. На підставі аналізу концептуально будемо спиратись на поняття ефективності однієї узагальненої операції:

$$E = \left| \bar{A} \right| \left| \frac{1}{\bar{C}} \right| \left| \frac{1}{\bar{T}} \right| |P|, \quad (1)$$

де позначено - $\left| \bar{A} \right|$ - результат виконаного процесу, що представлено у вимірювальних одиницях та унормовано, $\bar{C}$ - витрати ресурсу прямі та не прямі на її виконання, а $\bar{T}$ - витрати часу, $|P|$ - ймовірність реалізації, яка може виражатись, як обчислена через ризик не виконання. На підставі аналізу форми обліку результат виконаного процесу запропоновано оцінювати за вартісним нормативом складського збереження на одиницю часу. Для кожного складу такий норматив, вартості зберігання одиниці маси для заданих обмежень на величину об'єму і форми існує. Він також має обмеження на час зберігання, після вичерпання, якого знімається додаткова плата. У зв'язку із сказаним запропоновано результат виконаного процесу розраховувати як добуток маси вантажу на норматив збереження одиниці маси за одиницю часу збереження. Якщо всі типи витрат перераховувати на одиницю маси, то ефективність буде безрозмірною величиною.

4.3. Розробка математичної моделі ефективності технологічного процесу за даними про ефективність складових операцій.

Оцінку загальної ефективності технологічного процесу, що складається із N технологічних операцій обчислимо застосувавши постулат, що не викликає ніякого сумніву: - «Вартість технологічного процесу, що складається із N технологічних операцій дорівнює сумі витрат на кожну із цих операцій». Представимо ефективності процесу і операції та аналітично запишемо постулат:

$$E_{\text{заг}} = \frac{A_{\text{заг}} P_{\text{заг}}}{C_{\text{заг}} T_{\text{заг}}}; E_i = A_i \frac{1}{\sum_{j=1}^m C_{ij}} \frac{1}{T_i} P_i; \quad C_{\text{заг}} = \frac{A_{\text{заг}} P_{\text{заг}}}{E_{\text{заг}} T_{\text{заг}}} = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N A_i \frac{1}{\sum_{j=1}^m E_j T_j} P_i; \quad (2)$$

Таким чином, загальна ефективність технологічного процесу, що складається із N технологічних операцій, ефективності яких відомі, може бути розрахована через питомі долі ідентичних величин:

$$\frac{1}{E_{\text{заг}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} \frac{A_i}{A_{\text{заг}}} \frac{T_{\text{заг}}}{T_i} \frac{P_i}{P_{\text{заг}}} \quad (3)$$

Отриманий висновок дає підставу стверджувати, що якщо технологічна операція не змінює кінематичні, технологічні та експлуатаційні характеристики складових операцій, то загальна ефективність технологічного процесу також буде не змінною та може розраховуватись за виразом (3) на основі математичних очікувань означених параметрів.

5. Моделювання

Для перевірки та аналізу працездатності висунутих припущень та пропозицій з формування структури АСК сучасного АС, що використовує безлюдні технології шатлів та човникового перевезення було обрано діючу ділянку. Фото ділянки фрагменту складу показано на рисунку 3. На одній із ділянок вантажних потоків перевезення комплектів палети та запакованого набору товару подано: один човник позиція -1; палетний конвейер позиція - 2, який було запрограмовано; запакований набір товару у зборі позиція - 3. У ході експериментальних випробувань та перевірки працездатності ідеї поділу устаткування АС на зони для формування і корекції алгоритмів було встановлено, що спрощення у наслідок розбиття пришвидшує загальний час процесу розробки алгоритму роботи системи та програмування спільної роботи вузлів та ділянок. Останнє утворює передумови для імітаційного моделювання та проєктування вузлів і програмування системи.

Висновки

1. Висунуте припущення про формування структури АСК сучасного АС, що використовує безлюдні технології човникового принципу переміщення палет та запакованих товарів для перевезення шляхом поділу на окремі модулі, спрощує формування і корекцію алгоритмів і скорочує загальний час програмування.

2. Застосування складських нормативів плати за зберігання одиниці маси для заданих обмежень на величину об'єму, форми і часу зберігання, утворює безрозмірний показник ефективності на окрему операцію та технологічний процес без засобів приведення до безрозмірного виду, що формує цільову функцію керування потоками човників у АС.

References

1. В. В. Аулін, С. Ю. Тищенко, А. В. Гриньків. Інноваційні рішення в складській логістиці. Центральнотуристський науковий вісник. Технічні науки. № 2024.10(41).1. С- 270-285. ISSN 2664-262X DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
2. В. В. Аулін, Д. О. Кульова, В. В. Варваров. Виявлення, аналіз і прогнозування параметрів ризику безвідмовного навантаження готової продукції на транспортно-логістичному терміналі підприємства. Центральнотуристський науковий вісник. Технічні науки. № 11(42).1 (2025). ISSN 2664-262X. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.263-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271)
3. https://www.google.com/search?q=%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8+%D0%BD%D0%B0+%D1%81%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D1%96+%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%BD&rlz=1C1SJJL_ruUA857UA857&oq=&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUqCQgDECMYJxjqAjlJCAAQIxnG OoCMgkIARajGCcY6glY8AUyCQgFECMYJxjqAjlJCAyQIxnGGoCMgkIBxajGCcY6gLSAQk1OTA5ajBqMTWoAgiwAgHxBRldN6wza3Qn&sourceid=chrome &ie=UTF-8#fpstate=ive&vld=cid:b42b3d02,vid:Gff4ebbEFxg,st:0

4. Trunov, A., Boiko, V., Dymyrov, Y., Mytrokhin, V., Pozdnyikov, A., Tereshchenko, H. The formulation and solution of the problem of constructing optimal trajectory as a means of eliminating socio-legal contradictions in the realization of unmanned robotic systems (2025) CEUR Workshop Proceedings, 3970, pp. 118-130. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105007703310&partnerID=40&md5=4c41993cfa7521cf11ac3b1d4d1859>
5. Alexander Trunov. Development of a model selection tool based on numerical set analysis for rehabilitation using robotic technologies (invited paper) (2025) CEUR Workshop Proceedings, 3970, pp. 11-26. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105007703310&partnerID=40&md5=4c41993cfa7521cf11ac3b1d4d1859>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.23

Alexander Trunov,
Yuriy Dimitrov

PRIORITY CONTROL OF SHUTTLE FLOWS IN A WAREHOUSE TRANSPORT SYSTEM

The features of managing shuttle transport flows are considered. Examples are analyzed and the structure of a transport system is generalized, which involves sets of pallets and shuttles that are suitable for moving several pallets between zones at once. A presentation of the assessment of transportation efficiency is proposed. The problem of finding a dimensionless efficiency criterion for organizing the most productive movement of goods and an algorithm that maximizes the operational and overall efficiency of the warehouse is solved.

Keywords: *automated warehouse, unmanned technologies, shuttle transportation, pallets, efficiency models.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олександр Трунов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Юрій Димитров, PhD студент спеціальності “Автоматизації, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” факультету Комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yuriidymyrov@chmnu.edu.ua.

Yuriy Dimitrov, PhD student of the specialty “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yuriidymyrov@chmnu.edu.ua.

© О. Трунов, Ю. Димитров

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.24

Олександр Трунов,
Олександр Поздняков

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ І ЕЛЕМЕНТІВ УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕВАТОРА

Представлено концептуальну модель елеватору, як автоматизованого комплексу, що реалізує комп'ютерно-інтегровані технології та застосовує засоби безлюдних технологій моніторингу та огляду. Розроблено, виготовлено та представлено масштабну фізичну модель транспортного конвеєрного засобу та частотного керування асинхронними приводами. Проведено експериментальні дослідження асинхронних приводів та побудовано їх аналітичну емпіричну модель як рекурентну послідовність.

Ключові слова: Лінійний елеватор, інноваційний проєкт, концептуальна модель, асинхронні приводи, аналітична модель, рекурентна послідовність.

Вступ

Сільська господарська діяльність, особливо з вирощування зернових культур, незалежно від величини господарства все більше демонструє успішне впровадження інноваційних проєктів застосування безлюдних і автоматизованих та комп'ютерно-інтегрованих технологій [1]. Приклади проникнення цифрових технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), технології наземних повітряних дронів, аналітика великих баз даних та Інтернет речей (IoT), стимулюють процеси їх переосмислення і креативного удосконалення [1]. Для успішної автоматизації технологічних процесів по транспортуванню, підготовці, сушці, знезараженню і подальшому зберіганню зернової продукції і так далі, потребує виокремлення та удосконалення головних вузлів і технічних рішень. Наприклад, управління технологічним устаткуванням (транспортерами, норіями, сушарками і так далі), установка і зняття свідчень з різних датчиків, індикаторів і т. п. У свою вони потребують будови концептуальних (К) і математичних моделей (ММ) для широкого імітаційного моделювання для визначення оптимальних параметрів. Таким чином, автоматизація елеваторів, зерносушильних комплексів, силосів, транспортного та очисного устаткування розглядатиметься як набір необхідних стандартних рішень. Такий підхід дає змогу впровадити систему автоматизації як на новому, так і на діючому елеваторі без необхідності його повної зупинки і без прив'язки до сезону. Як реалізація комплексу цих ідей було сформовано і узагальнено КМ елеватору для подальших досліджень. Головною метою задач, що ставляться перед проєктом автоматизованої системи керування (АСК) це зробити елеватор керованим. Далі під керованістю елеватору будемо розуміти: управління прибутковістю; зменшення первинних капітальних витрат; планування та контроль капітальних і операційних витрат; моніторинг і контроль для групи елеваторів. Поставлена мета досягається шляхом забезпечення максимальної прозорості і контрольованості всіх процесів на елеваторі, що, як наслідок, дозволяє управляти його прибутковістю, як розв'язок головного завдання власника.

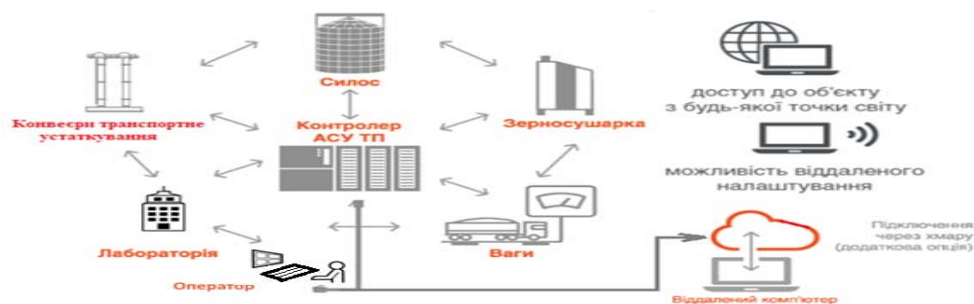


Рис. 1. Концептуальна модель лінійного елеватору, як проєкту відкритої структури

Узагальнений приклад КМ лінійного елеватора подано на рис. 1. До її складу входять власні транспортні засоби, система ваг, що контролює вагу прийнятого зерна, лабораторія контролю вологості та інших параметрів, що характеризують стан зерна. Крім того, до складу лінійного елеватору та його моделі входять конвеєри і транспортне устаткування, яке забезпечує технологічне переміщення зерна за технологічним процесом (ТП) по території елеватору. Також до складу елеватору входить сушарка і силос для зберігання і обробки відповідно до ТП. Крім означених структурних елементів до складу АСК входять контролер оператора ТП, віддалений комп'ютер, що забезпечує зв'язок і зберігання інформації через хмарні сервіси у хмарних накопичувачах, а також надає можливість віддаленого налаштування і доступ з будь якої точки світу та реалізує можливості розширення.

Таким чином, представлена КМ узагальненого лінійного елеватору містить основні суттєві елементи, які допускають розширення. Вона слугуватиме для розбудови ММ і алгоритмів імітаційного моделювання процесів функціонування елеватору. Основною підсистемою елеватора є транспортне устаткування, яке складається з транспортерів, вертикальних підйомників - норій, перекидних клапанів та електричних засувок. Головним видом поломок на елеваторі є механічні, які виникають через потрапляння сторонніх предметів або внаслідок механічного зносу. Задача автоматизації полягає у забезпеченні контролю за транспортним устаткуванням та інформаційним обміном про стан приводів. Для удосконалення інформаційного обміну необхідно мати: ММ електродвигуна; масштабну фізичну модель транспортного елемента і модель керування приводом. Для розв'язку такої задачі було створено масштабну фізичну модель стрічкового транспортера з моделями корисного навантаження і групи датчиків (Рис. 2).

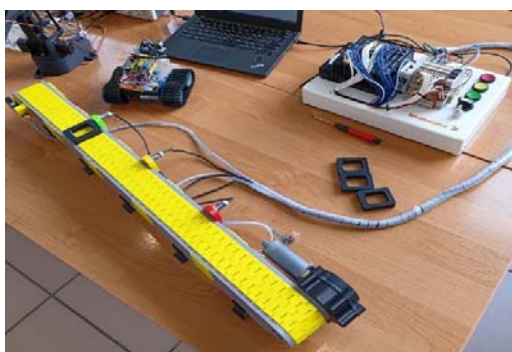


Рис. 2. Фізична масштабна модель стрічкового конвеєра з ПК Weidmuller WL2000

Модель складається з корпусу конвеєра з рухомою стрічкою, приводу, 4-х індуктивних датчиків. Ця модель підключається до промислового контролера Weidmuller WL2000, який програмується за допомогою програмного комплексу CodeSYS. Мови програмування — LAD і STL. Також використовується програмний комплекс ProconWeb для забезпечення людино-машинного інтерфейсу з мовами програмування C+, Pascal. Для моделювання до контролера підключені модулі аналогового входу з сигналами 4–20 мА, а також сигнали від датчиків температури промислового стандарту. Додатково підключено модулі дискретних входів і виходів. Для аналізу роботи 3-фазного приводу було побудовано фізичну модель системи управління з урахуванням частотного перетворювача EATON 0,25 кВт і двигуна змінного струму АИР 0,25 потужністю 0,25 кВт (Рис. 3).

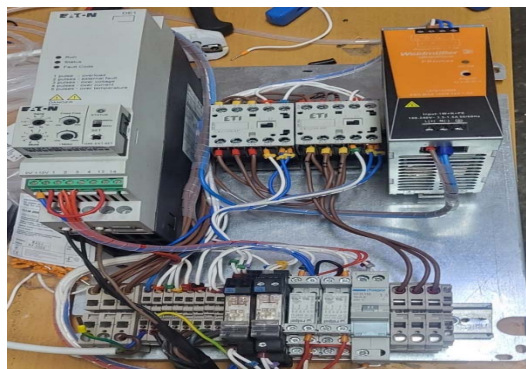


Рис. 3. Стенд системи керування групи асинхронних приводів (АП)

Ця фізична модель дозволяє керувати 3-фазним двигуном змінного струму та знімати характеристики, наведені на рис. 4 і реалізує керування групою (АП).

Parameter	Address	Description	Parameter	Address	Description
Output voltage	3003H	0–1200V (Unit: 1V)	VFD status word 1	2100H	0001H: Forward running
Output current	3004H	0.00–300.0A (Unit: 0.01A)			0002H: Running reversely
Rotational speed	3005H	0–65535 (Unit: 1 RPM)			0003H: Stopped
Output power	3006H	-300.0–300.0% (Unit: 0.1%)			0004H: Faulty
Output torque	3007H	-250.0–250.0% (Unit: 0.1%)			0005H: In POFF state
Closed-loop setting	3008H	-100.0–100.0% (Unit: 0.1%)			0006H: In pre-exciting state
Closed-loop feedback	3009H	-100.0–100.0% (Unit: 0.1%)	VFD status word 2	2101H	Bit0=0: Not ready to run =1: Ready to run
Input IO status	300AH	0x000–0x1FF (corresponding to HDIA, S8, S7, S6, S5, S4, S3, S2, and S1 in sequence)			Bit2–Bit1: =00: Motor 1 =01: Motor 2
Output IO status	300BH	0x00–0x0F (corresponding to local RO2/RO1/Reserved/Y1)			Bit3: =0: AM =1: SM
Analog input 1	300CH	0.00–10.00V (Unit: 0.01V)			Bit4: =0: No pre-alarm upon overload =1: Overload pre-alarm
Analog input 2	300DH	0.00–10.00V (Unit: 0.01V)			Bit6–Bit5=00: Keypad-based control =01: Terminal-based control =10: Communication-based control
Analog input 3	300EH	0.00–10.00V (Unit: 0.01V)			Bit7: Reserved
Read input of HDIA high-speed pulse	3010H	0.00–50.00kHz (Unit: 0.01Hz)			Bit8: =0: Speed control =1: Torque control
Read the actual step of multi-step speed	3012H	0–15			Bit9: Reserved
External length value	3013H	0–65535			Bit11–Bit10: =0: Vector 0 =1: Vector 1 =2: Space voltage vector
External counting value	3014H	0–65535			
Torque setting	3015H	-300.0–300.0% (Unit: 0.1%)	VFD fault code	2102H	See the description of fault types.
VFD identification code	3016H	-	VFD identification code	2103H	0x1200
Fault code	5000H	-	Running frequency	3000H	0–Fmax (Unit: 0.01Hz)
			Set frequency	3001H	0–Fmax (Unit: 0.01Hz)
			Bus voltage	3002H	0.0–2000.0V (Unit: 0.1V)

Рис. 4. Таблиця параметрів доступних за протоколом Modbus RTU

Для розробки емпіричної моделі асинхронного приводу було визначено програму експериментальних випробувань за аналогією з [2], а данні програми досліджень представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики асинхронного двигуна (АД)

S	0	0,05	0,091	0,2	0,28	0,4	0,6	0,8	1,0
n ₂ , об/хв	750	712,5	682	600	540	450	300	150	0
M, Н м	0	4,53	7,7	12,39	13,1	12,31	10,04	8,17	6,8

Очікувані механічні характеристики АД графічно представлено для M (S) на рис. 5, а для n₂ (M) на рис. 5, б за умов стабілізованої U₁ = const.

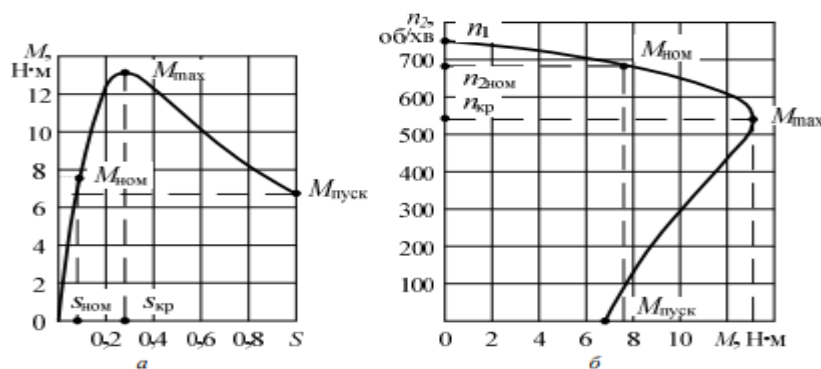


Рис. 5. Механічні характеристики асинхронного двигуна: а – M(S); б – n₂(M)

Для виводу аналітичної форми емпіричної моделі було застосування інструменти рекурентної апроксимації та вектор індикатор [3]. У першому наближенні криву було розглянуто як таку, що обов'язково проходить крізь точки: пуску, номіналу та максимуму та задовольняє якісно за формою рисунку 5. Криву було представлено у вигляді добутку двох функцій:

$$M = M_{\text{пуск}} S(aS^2 + bS + C). \quad (1)$$

Умови проходження одразу крізь точки: пуску, номіналу та максимуму подано як систему рівнянь:

$$\begin{cases} M = M_{\text{пуск}} S(aS^2 + bS + C) = M_{\text{пуск}}; & S = 1; \\ M = M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}(aS_{\text{ном}}^2 + bS_{\text{ном}} + C) = M_{\text{ном}}; & S = S_{\text{ном}}; \\ M = M_{\text{пуск}} S_{\text{кр}}(aS_{\text{кр}}^2 + bS_{\text{кр}} + C) = M_{\text{кр}}; & S = S_{\text{кр}}; \end{cases} \quad (2)$$

Систему (2) може було спрощено та зведено до виду:

$$\begin{cases} M_{\text{пуск}}(a + b + C) = M_{\text{пуск}}; \\ M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}(aS_{\text{ном}}^2 + bS_{\text{ном}} + C) = M_{\text{ном}}; \\ M_{\text{пуск}} S_{\text{кр}}(aS_{\text{кр}}^2 + bS_{\text{кр}} + C) = M_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (3)$$

Система (2) містить три невідомих константи та три неоднорідних алгебраїчних рівняння, а значить вона має єдиний розв'язок. Таким чином, її розв'язок отримаємо методом вилучення, що поступово зменшує кількість невідомих:

$$\begin{cases} a(1 - S_{\text{ном}}^2) + b(1 - S_{\text{ном}}) = 1 - \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}}; \\ a(S_{\text{ном}}^2 - S_{\text{кр}}^2) + b(S_{\text{ном}} - S_{\text{кр}}) = \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}} - \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{кр}}}. \end{cases} \quad (4)$$

Перша з них a дорівнює:

$$a = \left[\left(1 - \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}} \right) (S_{\text{ном}} - S_{\text{кр}}) - \left(\frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}}} - \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{кр}}} \right) (1 - S_{\text{ном}}) \right] / \left[(1 - S_{\text{ном}}^2)(S_{\text{ном}} - S_{\text{кр}}) - (S_{\text{ном}}^2 - S_{\text{кр}}^2)(1 - S_{\text{ном}}) \right]. \quad (5)$$

Тепер із першого рівняння системи (4) знайдемо другу невідому константу b :

$$b = \frac{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}} - M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}} (1 - S_{\text{ном}})} - a \frac{(1 - S_{\text{ном}}^2)}{(1 - S_{\text{ном}})} = \frac{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}} - M_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} S_{\text{ном}} (1 - S_{\text{ном}})} - a(1 + S_{\text{ном}}). \quad (6)$$

Остання константа буде отримана із першого рівняння системи (3):

$$C = 1 - a - b.$$

Таким чином, на підставі загального виду кривих АД було побудовано ММ та знайдено її константи через такі характеристики як пусковий, номінальний та максимальний моменти і ковзання. Подальше уточнення цих ММ можливо проводити на підставі експериментальних випробувань конкретного АД із застосуванням рекурентної апроксимації [3] вектор-індикатору, адекватності та інших інструментів ШП [4].

Висновки

1. Розроблена КМ АСК лінійного елеватору, яка визначає структурні засоби і підсистеми та зв'язки між ними інноваційного проєкту та придатна розширюватись для опису проєктів впровадження безлюдних технологій.

2. Розроблена аналітична ММ рекурентної апроксимації, яка у першому наближенні обов'язково проходить крізь точки: пуску, номіналу та максимуму, а у наступних наближеннях здатна уточнюватись на підставі експериментальних випробувань на розроблених фізичних моделях для конкретного АД із застосуванням рекурентної апроксимації, вектор-індикатору, адекватності та інших інструментів ІІІ.

References

1. Swarupa Amey Wagh, Amey Suresh Wagh. A Comprehensive Review of Role of AI and IOT in Agriculture: Progress, Applications, and Challenges. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology. Volume 15, Special Issue 1, February 2026 2026. Pp. 5-12. DOI: [10.15680/IJRSET.2026.1501902](https://doi.org/10.15680/IJRSET.2026.1501902)
2. Болюх В.Ф., Бондарук П.А., Коритченко К.В., Марков В.С., Поляков І.В., Шпінда Є.М. Електротехніка та електромеханіка: Навчальний посібник – Харків: БІТВ НТУ «ХПІ». – 2020. – 352 с.
3. Trunov, A. (2016) Recurrent Approximation as the Tool for Expansion of Functions and modes of operation of Neural Network. Eastern-European Journal Enterprise Technologies, № 5/4 (83), 2016, pp. 41–48.
4. Alexander Trunov. Development of a model selection tool based on numerical set analysis for rehabilitation using robotic technologies (invited paper) (2025) CEUR Workshop Proceedings, 3970, pp. 11-26. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105007703310&partnerID=40&md5=4c41993cfa7521cf11ac3b1d4d1859>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.24

Alexander Trunov,
Oleksandr Pozdnyakov

CONCEPTUAL AND MATHEMATICAL MODELS OF PROCESSES AND ELEMENTS OF THE GENERALIZED STRUCTURE OF THE ELEVATOR

Based on the analysis of existing and innovative projects, a conceptual model of an elevator is presented as an automated complex that implements computer-integrated technologies and uses means of unmanned monitoring and inspection technologies. A large-scale physical model of a transport conveyor and frequency control of asynchronous drives is developed, manufactured and presented. Experimental studies of asynchronous drives are carried out and their analytical empirical model is built as a recurrent sequence.

Key words: Linear elevator, innovative project, conceptual model, asynchronous drives, analytical recurrent model.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олександр Трунов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Олександр Поздняков, PhD студент спеціальності “Автоматизації, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” факультету Комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ualexander1977@gmail.com

Alexander Pozdnyakov, PhD student of the specialty “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ualexander1977@gmail.com

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.25

Олександр Трунов,
Антон Савчук

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРАВИЛ UI/UX ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ AI-МОДЕЛЕЙ МОНІТОРИНГУ АСК РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розглянуто підхід до формалізації правил створення і автоматизованої оцінки графічних і функціональних властивостей інтерфейсів робототехнічних систем. Запропоновано для релевантних АСК набір правил UI/UX з вимірюваними ознаками інтерфейсу. Задано порогові значення та штрафи і введено математичну модель включення обмежень у роботу AI-моделі. Показано можливості використання результатів оцінок при когнітивних випробуваннях інноваційних проєктів.

Ключові слова: АСК, UI/UX, графічний інтерфейс, робототехнічні системи, когнітивні випробування, комп'ютерний зір, AI-модель, функціональні обмеження, ситуаційна поінформованість.

Сучасні автоматизовані системи управління робототехнічними комплексами стають не лише технічними, а й когнітивними системами. Оператор працює з телеметрією, відео потоками, картами, попередженнями, командами руху та режимами автономності. У такому середовищі графічний інтерфейс перестає бути декоративною оболонкою: він визначає, наскільки швидко оператор виявить відхилення, зрозуміє причину події та ухвалить коректне рішення.

Для АСК робототехнічних систем таке трактування особливо важливе: UX виражається не тільки в задоволеності, а й у швидкості реагування, кількості помилок, стабільності уваги та здатності оператора утримувати ситуаційну картину. Таким чином, задача комплексної оцінки інтерфейсів АСК через формалізацію UI/UX-правил, які можна перевірити автоматично, лишається не розв'язаною. AI-модель моніторингу повинна розпізнати кнопку, індикатор або аварійне повідомлення та визначити, чи порушує їхнє розташування, розмір, контраст, семантику або щільність відображення когнітивної надійності системи.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є: розробити принцип формалізації правил UI/UX як функціональних обмежень для AI-моделей, призначених для моніторингу та автоматизованої оцінки інтерфейсів АСК робототехнічних систем.

Для досягнення мети вирішуються такі завдання: визначити набір правил UI/UX, релевантних АСК; пов'язати кожне правило з вимірюваною ознакою інтерфейсу; задати порогові значення та штрафи за порушення; ввести математичну модель включення обмежень у роботу AI-моделі; показати, як результати оцінки можуть використовуватися при когнітивних випробуваннях інноваційних проєктів.

Теоретичні підстави формалізації UI/UX. Класичні евристики зручності є вихідною базою для побудови автоматизованих правил. Відповідно до висновків [1] дизайн повинен «інформувати користувачів про перебіг процесу». Для АСК це означає обов'язкову видимість режиму функціонування робота, стану зв'язку, рівня автономності, аварій, якості сенсорних даних та поточного статусу команди. Іншим важливим твердженням є: зменшувати навантаження на пам'ять, тобто інтерфейс повинен мінімізувати необхідність пригадування і робити елементи, події та варіанти вибору видимими [1]. У робототехнічних АСК це правило забороняє ситуації, коли оператор повинен пам'ятати приховані режими, неочевидні гарячі клавіші або стан підсистеми, що не відображається на головному екрані. Для інтерфейсів управління роботами центральним поняттям стає ситуаційна обізнаність [5]. Увага та робоча пам'ять є критичними факторами, що обмежують здатність оператора отримувати та інтерпретувати інформацію [5]. Отже, інтерфейс повинен підтримувати три рівні: сприйняття елементів середовища, розуміння їх значення та прогноз найближчого стану системи.

Дослідження NASA з Human-Robot Interaction Directed Research підкреслюють, що аналіз інтерфейсів і командних модальностей необхідний для виконання завдань людиною «точно і ефективно» під час роботи з роботом [8]. Схожий висновок дають рекомендації з Human-Machine Interface (HMI) мають бути спрямовані на «максимізацію ситуаційної поінформованості оператора» та прискорення діагностики помилок [7]. Так з погляду

когнітивного навантаження основним показником є NASA-TLX, де застосовується «багатомірна процедура оцінки» з урахуванням розумового, фізичного, тимчасового навантаження, зусилля, результату та рівня роздратування що викликає система [6]. Означене не замінює критерії оцінки якості інтерфейсів, а використовуються як шкала, що застосовується якщо AI-модель фіксує високу щільність елементів інтерфейсу, слабку ієрархію інтерфейсів і часті помилки, це повинно корелювати зі зростанням суб'єктивного навантаження оператора. Для web-панелей і агрегованих інформаційних панелей важливі також критерії доступності, що перевіряються. WCAG 2.2 задає для звичайного тексту "contrast ratio of at least 4.5:1" [3], що дозволяє програмі автоматично фіксувати слабку помітність телеметрії, попереджень та підписів. Класи UI/UX-правил робототехнічних систем наведено у таблиці. 1.

Таблиця 1

Формалізовані правила UI/UX автоматизованої оцінки інтерфейсів АСК

Код	Оцінює правило	Вимірювана ознака	Функціональне обмеження
R1	Видимість стану	Наявність та читаність статусу робота, зв'язку, режиму, аварій	Критичний статус не може бути прихований або розташований поза основною зоною уваги
R2	Запобігання помилкам	Дистанція між небезпечними та звичайними командами, підтвердження, скасування	Команди зупинки, скидання та зміни режиму вимагають зворотного зв'язку та захисту від випадкового натискання
R3	Семантична відповідність	Збіг термінів UI з фізичними підсистемами робота	Текст, іконки та одиниці виміру повинні однозначно відповідати об'єкту управління
R4	Візуальна ієрархія	Розмір, позиція, контраст, колірна домінантність	Критичні елементи отримують більшу вагу уваги, ніж декоративні чи довідкові елементи
R5	Когнітивна щільність	Кількість елементів, індикаторів та активних попереджень на екранну область	Щільність елементів має перевищувати максимально встановлений обсяг, у якому оператор втрачає здатність швидко виділяти головне
R6	Розмір інтерактивних цілей	Габарити кнопок, перемикачів, зон вибору	Граничне мінімальне значення розміру графічних елементів інтерфейсу, що є ціллію взаємодії, становить 24x24 px; але для елементів, що є головними діючими елементами інтерфейсу зазначений параметр підлягає масштабуванню в більшу сторону
R7	Контраст та читаність	Контраст тексту, розмір шрифту, помітність стану	Для звичайного тексту використовується контраст не нижче 4,5:1 згідно з WCAG 2.2 [3]
R8	Узгодженість	Єдині кольори, патерни, розташування, назви команд	Поодинокі дії та стани відображаються однаково у всіх екранах системи
R9	Підтримка ситуаційної поінформованості	Наявність даних про поточний стан, причини та прогноз	Інтерфейс повинен допомагати оператору бачити, розуміти та прогнозувати стан робота
R10	Адаптація до контексту	Тип екрану: мобільний пульт, web-панель, стаціонарний дашборд	Правила застосовуються з урахуванням сценарію: швидкі дії, аналіз, діагностика чи моніторинг групи роботів

Запропоновані правила набір обмежень для автоматизованої програмної оцінки. Наприклад, R7 перевіряється через обчислення контрастного відношення; R6 – через розміри інтерактивних об'єктів; R5 – через щільність елементів на одиницю площі; R1 і R9 - через наявність обов'язкових статусних блоків та їх видимість в основній області екрана. Закон Фіттса додатково доводить, що правило R6, як час досягнення мети, залежить від відстані до неї та її розміру [4]. Тому в інтерфейсах АСК кнопка функціонально важливіша, наприклад: аварійної зупинки, підтвердження ручного режиму або перемикання автономності не повинні мати ту ж саму візуальну помітність,

що і кнопка довідкова або навігаційна. Інформаційний надлишок розглядається як обмеження. У дослідженні з наглядом за кількома роботами наголошується, що занадто великий обсяг інформації призводить до того, що лише мала частина даних інтегрується у ситуаційну обізнаність [9]. Тому програма має фіксувати і обмежувати як відсутність даних, так і надмірність їх відображення.

Методика перетворення правил у функціональні обмеження. На вхід моделі штучного інтелекту подається знімок інтерфейсу, DOM-структура web-панелі або відеопотік робочого місця оператора. На першому етапі виконується сегментація інтерфейсу, тобто виділяються зони телеметрії, карти, відео, аварійні індикатори, командні елементи, навігація, графіки, таблиці, довідкові області та фонові елементи.

На другому етапі для кожного об'єкта розраховуються ознаки: координати, площа, контраст, колірна домінантність, тип елемента, близькість до критичних команд, текстова мітка, частота оновлення, наявність зворотного зв'язку, кількість сусідніх об'єктів та приналежність до функціональної групи роботи.

На третьому етапі ознаки порівнюються з UI/UX-правилами. Задається нижня межа якості, наприклад, мінімальний контраст або розмір мети, порушення виникає при зниженні показника нижче порога. Якщо правило задає верхню межу, наприклад, максимальну щільність елементів або допустиму кількість активних попереджень, порушення виникає при перевищенні порогу:

$$L_{total} = L_{seg} + \lambda \sum_{k=1}^m w_k \varphi_k(I) \quad (1)$$

де $\varphi_k(I) = (0, \theta_k - S_k(I))^2 \Big|_{\max}$ – для правил із мінімальним порогом та $\varphi_k(I) = (0, S_k(I) - \theta_k)^2 \Big|_{\max}$ – для правил із максимальним порогом.

Де:

L_{total} – підсумкова функція втрат AI-моделі або підсумковий штраф оцінки інтерфейсу;

L_{seg} – базова помилка сегментації або класифікації елементів інтерфейсу;

I – аналізований інтерфейсний кадр, екран або стан фрагменту відображення;

k – номер UI/UX-правила;

m – загальна кількість формалізованих правил;

$S_k(I)$ – виміряне значення ознаки для правила k ;

θ_k – нормативний чи експериментально заданий поріг;

w_k – вага важливості правила, що залежить від критичності елемента;

λ – коефіцієнт впливу UI/UX-обмеження на підсумкову оцінку;

$\varphi_k(I)$ – функція штрафу за порушення правила.

Якщо AI модель оцінює кнопку аварійної зупинки, вага w_k повинна бути вищою, ніж для декоративного блоку або довідкового тексту. Якщо інтерфейс показує тривогу з низьким контрастом або розміщує критичне керування поруч із некритичною кнопкою, штраф різко зростає. Таким чином, математична модель (1) пов'язує якість UI/UX із експлуатаційною надійністю АСК і задається двома способами. У першому випадку вона додається у функцію втрат під час навчання моделі комп'ютерного зору, навчається розпізнавати елементи та враховувати їх функціональну значимість. У другому застосовується як незалежний модуль аудиту готового інтерфейсу, формуючи карту порушень та інтегральний індекс когнітивної придатності. Для оцінки послідовностей дій оператора формалізовані правила можуть доповнюватися GOMS-підходом, де функціонування описується через цілі, операції, методи та правила вибору [10]. Зазначений підхід дозволяє виявити залежність між структурною якістю відображення інформації на екрані та розрахунковим часом виконання стандартних завдань оператора АСК.

Висновки

1. Формалізація правил UI/UX як функціональних обмежень створює основу автоматизованої оцінки інтерфейсів АСК робототехнічних систем. Введені 10 правил видимості стану, запобігання помилкам, візуальної ієрархії, узгодженості, зниження навантаження на пам'ять, достатнього розміру цілей, розмаїття, функціонального угруповання та підтримки ситуаційної поінформованості можуть бути виражені через вимірні ознаки інтерфейсу.

2. Запропонована функція штрафу дозволяє включати UI/UX-обмеження в навчання AI моделі та використовувати їх як самостійний модуль аудиту, що надає критично важливим елементам АСК більшої ваги, яка відповідає реальній ціні помилки в робототехнічній системі.

References

1. Nielsen J. 10 Usability Heuristics для User Interface Design. Nielsen Norman Group. URL: <https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>
2. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction — Human-centred design for interactive systems. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/ec053ca4-2add-4e8c-9f0c-9664331ee35c/iso-9241-210-2019>
3. W3C. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2. URL: <https://www.w3.org/TR/wcag/>
4. Fitts PM Information Capacity of Human Motor System в Controlling Amplitude of Movement. Journal of Experimental Psychology. 1954. Vol. 47, No. 6. P. 381-391. DOI: 10.1037/h0055392.
5. Endsley MR Toward Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. Human Factors. 1995. Vol. 37, Issue 1. P. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.
6. NASA. NASA Task Load Index (TLX) Human Systems Integration Division. URL: <https://www.nasa.gov/human-systems-integration-division/nasa-task-load-index-tlx/>
7. Marvel JA, Bagchi S., Zimmerman ML, Antonishek B. Towards Effective Interface Designs for Collaborative HRI в Manufacturing: Metrics and Measures. NIST / IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2020. DOI: 10.1145/3385009.
8. Sandor A., Cross EV, Chang ML Human-Robot Interaction Directed Research Project. NASA Technical Reports Server. 2014. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140003240>
9. Wong CY, Seet G. Workload, awareness and automation в multi-robot supervision. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. DOI: 10.1177/1729881417710463.
10. John BE, Kieras DE За допомогою GOMS для User Interface Design and Evaluation: Which Technique? ACM Transactions on Computer-Human Interaction. 1996. URL: <https://web.eecs.umich.edu/~kieras/docs/GOMS/Which-GOMS.pdf>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.25

Alexander Trunov,
Anthon Savchuk

FORMALIZATION OF UI/UX RULES AS FUNCTIONAL CONSTRAINTS FOR AI-MODEL MONITORING OF ASK

Abstract: The article considers an approach to formalizing the rules for creating and automated evaluation of graphical and functional properties of interfaces of robotic systems. A set of UI/UX rules with measurable interface features is proposed for relevant ASCs. Threshold values and penalties are specified and a mathematical model for including constraints in the operation of the AI model is introduced. The possibilities of using the evaluation results in cognitive testing of innovative projects are shown.

Keywords: ACS, UI/UX, graphical interface, robotic systems, cognitive testing, computer vision, AI model, functional limitations, situational awareness.

Відомості про автора / Information about the Author

Олександр Трунов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8524-7840>

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8524-7840>.

Антон Савчук, аспірант Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: 380993213068anthonysavchuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8880-4056>

Anton Savchuk, postgraduate student of the PhD program “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: 380993213068anthonysavchuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8880-4056>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.26

Олександр Трунов,
Олексій Сільвейстров

РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ВІДДАЛЕНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПОСТІНФАРТНИХ ПАЦІЄНТІВ

Запропоновано варіант реалізації інноваційної технології віддаленого відновлення втраченої м'язової активності у наслідок довготривалих хвороб та травм. Запропоновано концептуальну та математичну моделі для узагальненої структури. Проведено порівняльний аналіз та запропоновано для подальшого розвитку сімейної медицини, при застосуванні комунікаційних технологій ІоМТ. Пропонується розвивати модульний принцип побудови устаткування для забезпечення принципу соціальної активності.

Ключові слова: Віддалене відновлення, концептуальна модель, математична модель, матриці трансформації, векторний опис, рухи захоплювача, швидкість, прискорення.

Вступ

Сучасні засоби механічного відновлення м'язів, як комплекс спрямовано на регенерацію м'язових волокон, покращення їхньої функціональності, еластичності та зняття спазмів. Перебіг відновлення потребує систематичності, повсякденності та кваліфікованого персоналу [1]. У зв'язку з означеним застосування безлюдних технологій є одним із засобів забезпечення збільшення контрольованості і зменшення трудомісткості при зменшенні загальних поточних витрат [2]. Проблема гостро постала в умовах війн, військових дій та наслідків природних і техногенних катастроф. Останнє на фоні постійного стресу населення, формує гостру потребу віддаленого відновлення та стає надзвичайно актуальною і важливою проблемою [3]. У свою чергу пошуки інноваційних технічних засобів соціально-доступних, малої ваги і такі, що придатні для швидкої доставки модулів, які також реалізують принцип конструктора «збери, включи та використовуй» стає актуальною проблемою для суспільства в усьому світі [4].

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом доповненням до традиційних методів відновлення є впровадження технологій ІоМТ, що створює нові передумови для розвитку і поширенню їх результатів [2]. Комплексне застосування і представлення результатів міжвузівської робочої групи з питань інсульту подається у роботі [3]. Важливим кроком у всебічному вивченні проблеми відновлення постінфарктних та постінсультних пацієнтів стало створено Національне клінічне керівництво щодо інсульту, яке стає основою для інструментального вдосконалення і впровадження [3]. Нова концепція будови засобів автоматизації і роботизації та покрокового формування інновацій для створення самодостатніх модулів приладів для віддаленої відновлювальної медицини сформульована у роботі [4]. Особливості та перебіг впровадження реформи сімейної медицини демонструє, що її розвиток може ґрунтуватися на результатах технічних, винахідницьких [5] і теоретичних [6] робіт, як це наприклад спостерігається у подальших роботах [7].

Разом з тим не розв'язаною лишається задача створення технічних засобів соціально-доступних модулів відновлення, які задовольняють вимозі швидкої доставки до пацієнтів. Крім того, важливою до них вимогою є: реалізувати принцип конструктора «збери, включи та використовуй».

3. Мета та задачі дослідження.

Метою роботи є: підвищити ефективність соціально-доступних засобів відновлення, що реалізують принцип конструктора шляхом їх утворення із самодостатніх окремих модулів маніпулятора «збери, включи та користуйся». Для досягнення поставленої мети було поставлено одну із комплексу задач: - розробити концептуальну і математичну модель маніпулятора, що забезпечить аналітичне порівняння кінематичних і динамічних характеристик його роботи у якості змінних модулів відновлення для різних груп м'язів.

1. Формування структури автоматизованої системи віддаленого відновлення та концептуальна і математична модель

4.1 Структура та концептуальна модель автоматизованої системи віддаленого відновлення

Аналіз структури систем терапії відновлення [7, 8, 10] переконує, що ефективність комплексної терапії на основі відомих методів, росте при збільшенні кількості засобів та почерговій їх змінності. Кількість модулів підсилювання і приведення до узгодженого типу не може бути меншою за кількість електродів. Отже, визначення узагальненої структури модуля та мінімізація його внутрішньої структури можлива тільки за рахунок зменшення кількості засобів впливу. Крім того, мінімізація структури можлива і за рахунок зменшення кількості однокристальних контролерів, оскільки на сьогодні існують контролери, які дозволяють підключати декілька виходів одночасно. Крім того, враховуючи вимогу передачі даних за допомогою Wi-Fi модуля, оберемо **ARDUINO UNO WIFI REV2**. Остання має інтегрований Wi-Fi модуль, характеристики якого містять широкі можливості для узгодження. Аналіз типу модуля зв'язку, виду мережі, величин спаду напруги живлення, комунікаційного протоколу, потужності передавача і чутливості приймача, швидкості передачі, смуги частот, дальності і кількості входів переконує у принциповій можливості формування мінімальної структури КС проведення фізичного моделювання для одночасного керування рознесеними приводами маніпулятора та засобами впливу і протоколювання параметрів моніторингу стану пацієнта.

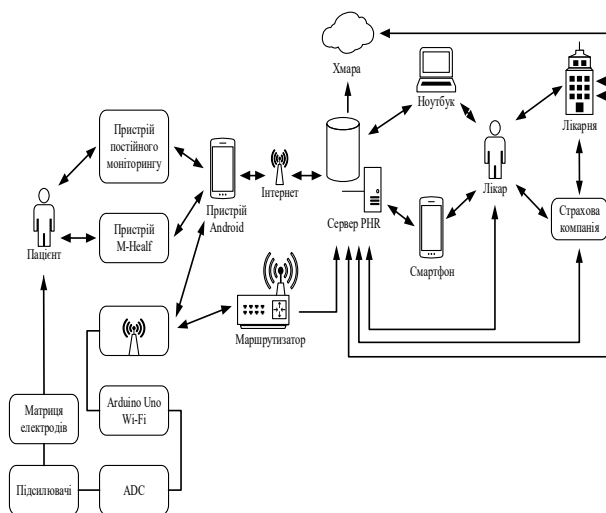


Рис. 1. Схематичне представлення структури та зв'язків АСК віддаленого відновлення

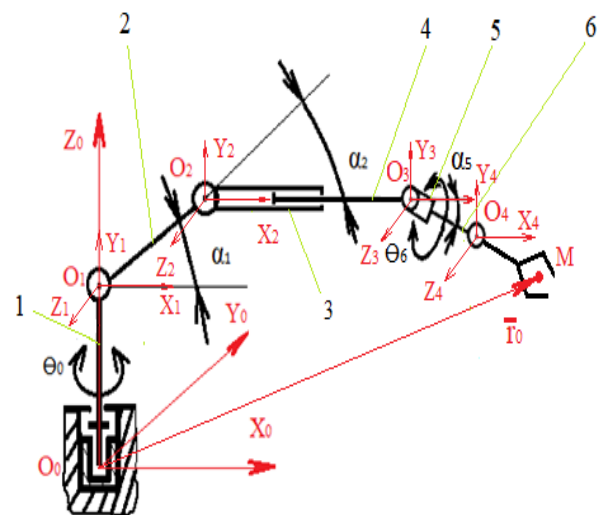


Рис. 2. Кінематична схема маніпулятора, АСК відновлення

Таким чином, зупинитись на структурі, що узагальнює структури робіт [4, 5, 7], які забезпечують повну функціональну спроможність та мінімізацію компонентів, розмірів та маси. На рис. 1 показано структурну схему приймального модуля та інших модулів КС для проведення фізичного моделювання і електростимуляції м'язів.

Пошук інтелектуальної основи для подальшої будови структури на рівні концептуальної та математичної моделі і алгоритмів функціонування приводить до великих обсягів обчислень у ході їх навчання. Одними з основних причин є розривність першого роду та не аналітичність форми функцій належності, що унеможливило застосування апарату математичного аналізу. Крім того, відсутність можливості аналітичного представлення для узагальненої структури матрицю трансформації є також суттєвим ускладненням для аналітичного дослідження придатності до виконання функціональних рухів різних схем маніпулятора. У зв'язку з цим було обрано для об'єкту дослідження кінематичну схему маніпулятора, яка за результатами прогнозних очікувань здатна забезпечити набори основних просторових рухів (рисунок 2).

Введемо для довільної i -ої ланки матрицю A_i^{i-1} , що подає представлення перетворень при переході від $i-1$ - ої системи координат до i - ої:

$$A_i^{i-1} = A_{z,d_i} A_{z,\theta_i} A_{x,a_i} A_{x,\alpha_i}.$$

Таке представлення є універсальним. Якщо вісь OZ_i i -ої ланки спрямовуємо за напрямом вісі обертального або поступального рухів, то для кінематичної схеми з обертальними та поступальними n ланками перехід від n -ої до базової ланки запишемо:

$${}^0A_n = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{i-1}A_i \cdots {}^{n-1}A_n.$$

Саму ж ${}^{i-1}A_i$ - матрицю узагальненого зв'язку між системами координат шарнірів ланок подамо, як результат представлення чотирьох узагальнених зсувів. Для цього скористаємось одиничною матрицею, матрицею поступальних переміщень та матрицею повороту у однорідних координатах.

Таким чином, перемножимо та отримаємо матрицю перетворення для однієї ланки:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i; -\cos \alpha_i \sin \theta_i; \sin \alpha_i \sin \theta_i; a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i; \cos \alpha_i \cos \theta_i; -\sin \alpha_i \cos \theta_i; a_i \sin \theta_i \\ 0; \sin \alpha_i; \cos \alpha_i; d_i \\ 0; 0; 0; 1 \end{bmatrix}$$

Остаточно запишемо

$${}^0A_4 = \prod_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \cos \theta_i; -\cos \alpha_i \sin \theta_i; \sin \alpha_i \sin \theta_i; a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i; \cos \alpha_i \cos \theta_i; -\sin \alpha_i \cos \theta_i; a_i \sin \theta_i \\ 0; \sin \alpha_i; \cos \alpha_i; d_i \\ 0; 0; 0; 1 \end{bmatrix}$$

Тепер представимо центр мас захвату точку М (рис. 1) у рухомій системі координат $O_4X_4Y_4Z_4$ вектором O_4M , що запишемо у базовій системі координат:

$$\overline{r}_{MO} = {}^0A_4 \overline{O_4M} = \prod_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \cos \theta_i; -\cos \alpha_i \sin \theta_i; \sin \alpha_i \sin \theta_i; a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i; \cos \alpha_i \cos \theta_i; -\sin \alpha_i \cos \theta_i; a_i \sin \theta_i \\ 0; \sin \alpha_i; \cos \alpha_i; d_i \\ 0; 0; 0; 1 \end{bmatrix} \overline{O_4M}$$

Таким чином, отримано аналітичну модель представлення радіус вектором положення точки М ланки робочого органу у базовій системі координат, що відкриває шлях для обчислення її швидкості та прискорення. Представимо приклад опису проєкції вектора швидкості на одну із трьох вісей за умов роботи приводу четвертої ланки:

$$v_x = \frac{d}{dt} (\overline{r}_{MO})_x = \frac{d}{dt} A_4 (\overline{O_4M})_x = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \frac{d}{dt} ({}^3A_4) (\overline{O_4M})_x =$$

Тепер прискорення визначимо наступним чином за аналогією:

$$a_x = \frac{d}{dt} v_x = \frac{d}{dt} \left[\frac{d}{dt} (\overline{r}_{MO})_x \right] = \frac{d^2}{dt^2} (A_4)_x (\overline{O_4M})_x = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \frac{d^2}{dt^2} ({}^3A_4)_x (\overline{O_4M})_x$$

Для експериментальної реалізації концептуальної моделі і дослідження кінематичних і динамічних властивостей та можливостей і переваг математичних моделей і порівняння векторного та матричного опису маніпулятора було розроблено та виготовлено фізичну модель із змінними захоплювачами рисунок 3.

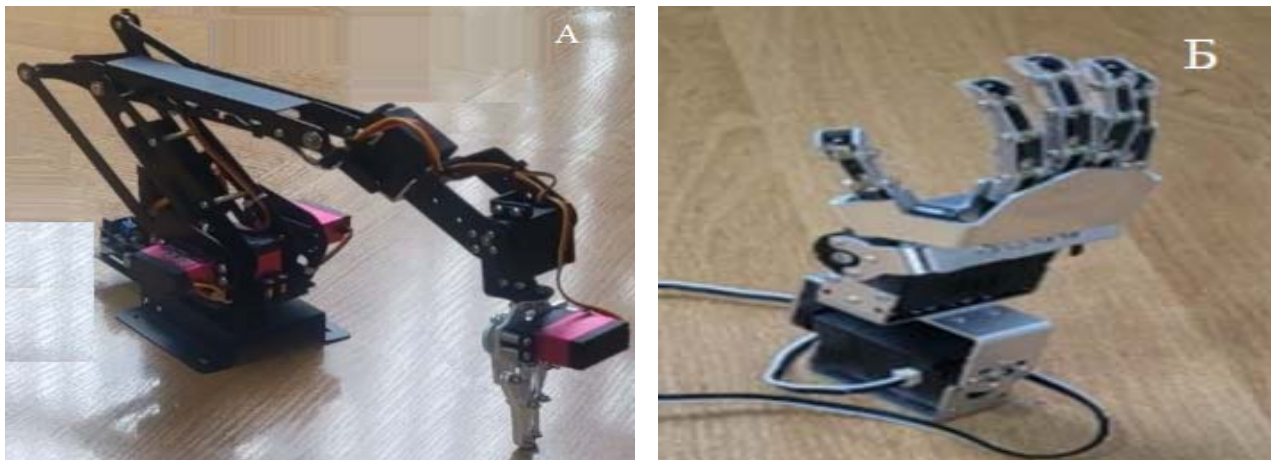


Рис. 3. Експериментальна модель маніпулятора для експериментального дослідження:
 А – маніпулятор у зборі; Б – змінний п'яти пальний захоплювач.

1. Сформовані концептуальна модель АСК віддаленого відновлення та фізична модель маніпулятора, що їй придатен реалізовувати і його матрична математична модель утворили систему для проведення програми експериментального випробування. Результатом дослідження є розроблені та апробовані на придатність виконання рухів маніпулятор та змінні засоби стискання. Наявність засобів самостійного руху, дешевого, альтернативного виготовлення відкриває шлях до експериментального дослідження і удосконалення конструкції. У зв'язку з цим у загальній задачі створення соціально-доступних засобів придатних для швидкої доставки модулів, що реалізують принцип конструктора «включи та використовуй», стає на одну проблему менше. Однак, що стосується задачі оптимального керування рухом маніпулятора у ході процедури, то очевидного воно потребує подальшого продовження

Висновки

1. Концептуальна модель структури АСК віддаленого відновлення разом із математичними та фізичними моделями маніпулятора із змінними захоплювачами утворює систему для експериментального дослідження кінематичних і динамічних властивостей та оцінки можливостей і переваг математичних моделей і порівняння векторного та матричного опису.

2. Застосування розробленої мобільної платформи, маніпулятора, та змінними засобами реабілітації і комп'ютерних систем спостереження і комунікаційної мережево-серверної взаємодії є шляхом теоретичного і практичного апробації засобів автоматизації віддаленого відновлення за методиками регламентованими МОЗ.

References

1. Про реабілітацію у сфері охорони здоров'я. Стаття 19. Надання реабілітаційної допомоги із застосуванням **телереабілітації**. *ЗАКОН УКРАЇНИ*. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2021, № 8, ст.59. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1053-20#Text>
2. The Ultimate Comparison of IOT Development Boards. Open Electronics. URL:<https://www.open-electronics.org/the-ultimate-comparison-of-iot-development-boards/>. (дата звернення: 24.04.2020).
3. Intercollegiate Stroke Working Party. National Clinical Guideline for Stroke Fourth Edition. Homepage of Royal College of Physicians. 2012. <https://www.rcplondon.ac.uk/guidelines-policy/stroke-guidelines> (access. 24.01.16).
4. Trunov, A., Beglytsia, V., Gryshchenko, G., Ziuzin, V., & Koshovyi, V. (2021). Methods and tools of formation of general indexes for automation of devices in rehabilitative medicine for post-stroke patients. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(112)), 35–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239288>
5. Трунов О. М., Волковінська О. О. Портативний апарат електротерапії та стимуляції. Патент на корисну модель. Чорноморський державний університет імені Петра Могили. u200911589 (22) 13.11.2009 (24) 11.05.2010 (46) 11.05.2010, Бюл.№ 9, 2010 р.
6. Trunov, A. N. Peculiarities of the interaction of electromagnetic waves with bio tissue and tool for early diagnosis, prevention and treatment / A. N. Trunov // 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2016. – P. 169–174. doi: 10.1109/elnano.2016.7493041
7. Alexandr Trunov, Ivanna Dronyuk, Vladyslav Martynenko, Ivan Skopenko, and Maksym Skoroid. Expanding the

Possibilities of Video Surveillance Monitoring and Recovery Procedures for Post-stroke Patients. Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Andriy Luntovskyy, Mikhailo Klymash, Igor Melnyk, Mykola Beshley, Alexander Schill Editors. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2024. pp. 794- 813. ISBN 978-3-031-61220-6 ISBN 978-3-031-61221-3 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.26

Alexander Trunov,
Oleksiy Silvestrov

DEVELOPMENT OF REMOTE RECOVERY TOOLS FOR POST-INFARTHARTORATE PATIENTS

A variant of implementing an innovative technology for remote restoration of lost muscle activity as a result of long-term illnesses and injuries is proposed. A conceptual and mathematical model for a generalized structure is proposed. A comparative analysis is conducted and proposed for the further development of family medicine, when using IoT communication technologies. It is proposed to develop a modular principle of building equipment to ensure the principle of social activity.

Keywords: Remote restoration, conceptual model, mathematical model, transformation matrices, vector description, gripper movements, speed, acceleration.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олександр Трунов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Олексій Сільвейстров, PhD студент спеціальності “Автоматизації, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” факультету Комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: silvestrov.alex@gmail.com

Oleksii Silvestrov, PhD student of the specialty “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: silvestrov.alex@gmail.com

© О. Трунов, О. Сільвейстров

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.27

Євгеній Худолій,
Євген Дарнапук

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО КРОС-ДОМЕННОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ІДЕНТИЧНОСТІ В УМОВАХ НУЛЬОВОЇ ДОВІРИ У ГЕТЕРОГЕННИХ БАГАТОХМАРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Розглянуто три архітектурні підходи до крос-доменної верифікації ідентичності в умовах нульової довіри у гетерогенних багатохмарних середовищах: Mesh Federation, Hub-and-Spoke Federation та модель на основі децентралізованих ідентифікаторів і перевірюваних облікових даних (DID/VC). Виявлено архітектурну несумісність традиційних протоколів федерації (SAML, OIDC) з принципами нульової довіри, зумовлену моделлю одноразової перевірки та централізованого управління токенами. Проведено порівняльний аналіз підходів за критеріями стійкості до єдиної точки відмови, портативності політик доступу між адміністративними доменами та відповідності принципам нульової довіри.

Ключові слова: Zero Trust Architecture, багатохмарне середовище, Decentralized Identifiers, Verifiable Credentials.

Стрімкий розвиток хмарних технологій призводить до того, що великі організації будують свої інфраструктурні рішення, використовуючи послуги хмарних провайдерів. Часто одного провайдера замало для великого проєкту. Тому багато сучасних проєктів використовують модель багатохмарних гетерогенних середовищ, де одночасно використовуються кілька провайдерів (наприклад, AWS, GCS, Azure тощо). Це забезпечує розподіл навантаження та підвищує відмовостійкість.

Традиційні моделі мережевої довіри, такі як концепція захисту по периметру, більше не є ефективними у багатохмарних середовищах, де межі мережі розмиті. Гетерогенність багатохмарної інфраструктури зумовлює необхідність переходу до архітектури нульової довіри, що базується на принципі «ніколи не довіряй, завжди перевіряй» [1], і вимагає повної відмови від неявної довіри – безперервної верифікації кожного запиту незалежно від його точки входу.

Однак, незважаючи на те, що концепція нульової довіри активно впроваджується, її масштабування в межах багатохмарних середовищ залишається складним завданням. Одним із головних викликів є фрагментація політик безпеки, що виникає через використання кожним окремим провайдером власного засобу керування доступом. Це створює серйозні перешкоди для формування цілісної довірчої моделі. Неоднорідність політик призводить до формування ізольованих доменів ідентичності, де заходи безпеки, налаштовані в одній хмарі, автоматично не діють в інших [2].

Ідентичність у парадигмі нульової довіри є ключовим фактором авторизації. Однак гетерогенна інфраструктура ускладнює застосування єдиних політик, оскільки кожен провайдер створює власні системи IAM, які між собою несумісні. Наприклад, коли організація використовує AWS IAM для частини інфраструктури в AWS і Azure IAM для іншої частини в Azure, виникає проблема з неможливістю безпосередньої передачі правил доступу між цими середовищами [2].

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз трьох архітектурних підходів до верифікації ідентичності під час крос-доменної взаємодії в гетерогенних багатохмарних середовищах в умовах нульової довіри. Щоб оцінити, наскільки ефективними є ці підходи, потрібно розглянути архітектурні обмеження, характерні для наявних протоколів і рішень.

Архітектурні обмеження існуючих підходів

Для вирішення проблеми ізольованих доменів було створено стек протоколів федеративної безпеки, таких як SAML, OpenID Connect і OAuth 2.0. Ці технології реалізують можливість єдиного входу (SSO) та механізми захисту міжсервісної взаємодії [3]. Протоколи SAML та OIDC були створені в часи, коли довіра базувалася на

одноразовій перевірці. Однак саме у цьому механізмі закладена фундаментальна розбіжність із вимогами нульової довіри.

Один із можливих сценаріїв примусової інтеграції безперервної верифікації в систему безпеки на базі OIDC/SAML передбачає постійну самоперевірку токенів під час кожного запиту через централізований сервер авторизації. З технічної точки зору, у багатохмарних середовищах це може спричинити надлишковий трафік, значно збільшити затримки та зробити провайдера ідентичності точкою відмови. Інший можливий сценарій – це дуже короткий час життя токенів, коли їх скорочують до кількох секунд, щоб провайдер ідентичності постійно видавав нові токени. Це може спричинити значне навантаження на сервери.

Невідповідності традиційних протоколів (OIDC, SAML) концепції нульової довіри систематизовано в табл. 1.

Таблиця 1.

Архітектурна суперечність протоколів і концепції нульової довіри

Характеристика	Протоколи SAML/OIDC	Вимоги нульової довіри
Життєвий цикл довіри	Одноразова перевірка (SSO)	Безперервна верифікація
Контроль доступу	Токени із тривалим терміном дії	Контекстно-залежна оцінка при кожній транзакції
Обробка відкликання прав	Залежність від терміну дії токена	Миттєве відкликання на основі зміни рівня ризику
Топологія управління	Суворі централізація	Розподілене виконання політик ближче до ресурсу
Масштабованість	Ризики фрагментації та формування ізольованих доменів контролю доступу	Глобальна сумісність через платформонезалежні стандарти

Крім того, централізоване керування довірою спричиняє архітектурні вразливості, такі як ризик появи єдиних точок відмови (SPOF); загроза втрати контролю над персональними даними користувачів; а також ризики змови (collusion risks) між учасниками системи верифікації [4].

Виявлені обмеження проявляються по-різному залежно від обраної архітектурної стратегії крос-доменної взаємодії. На практиці виділяють три основні підходи, кожен з яких по-різному намагається вирішити описані протиріччя або лише частково їх розв'язує.

Аналіз архітектурних підходів

Розглянемо три підходи, абстраговані від конкретних хмарних вендорів і придатні для будь-якої комбінації адміністративних доменів.

Підхід 1: Mesh Federation. Кожна пара провайдерів встановлює двосторонні довірчі відносини через стандартні протоколи федерації ідентичності (SAML 2.0, OIDC). Для N провайдерів необхідно підтримувати $N \times (N-1)$ конфігурацій довіри. Підхід добре відомий і широко підтримується промисловими рішеннями, однак має квадратичну складність масштабування і зберігає всі архітектурні обмеження, описані вище [5].

Підхід 2: Hub-and-Spoke Federation (Central Broker). Окремий компонент-посередник виступає центральним вузлом довіри та транслює ідентичності й політики між доменами через канонічну внутрішню модель. Кількість інтеграцій зростає лінійно: N адаптерів замість $N \times (N-1)$ зв'язків. Проте брокер є єдиною точкою відмови, адже його недоступність унеможливіє будь-яку крос-доменну взаємодію. Крім того, вимога звертатися до центрального вузла за кожним запитом суперечить принципу нульової довіри щодо розподіленого виконання рішень [6].

Підхід 3: Децентралізована верифікація на основі DID/VC. Щоб забезпечити надійне поширення ідентичності у багатохмарних середовищах, потрібно відмовитися від централізованих, синхронних провайдерів безпеки (IAM) і перейти до децентралізованих протоколів верифікації. Вирішення цих складних завдань вимагає переходу від моделі, де довіра надається та підтверджується централізованим провайдером ідентичності, до концепції децентралізованої федеративної довіри, заснованої на суверенній ідентифікації (SSI). Вона базується на двох криптографічних стандартах: децентралізованих ідентифікаторах (DID) та перевірювальних облікових даних (VC) [7, 8].

Децентралізовані ідентифікатори – це унікальні глобальні криптографічно захищені ідентифікатори, які створюються та контролюються безпосередньо суб'єктом без залежності від централізованого реєстру або хмарного провайдера [7]. Вони є платформонезалежними, на відміну від популярних рішень провайдерів, пов'язаних із конкретною екосистемою вендора.

Застосування перевірювальних облікових даних змінює механізм авторизації: суб'єкт зберігає свої безпекові атрибути як набір даних, підписаних криптографічними ключами довірених елементів [8]. Перевірка облікових даних здійснюється локально через криптографічну валідацію підпису, без синхронного звернення до центрального провайдера ідентичності, що принципово усуває єдину точку відмови.

Таблиця 2.

Порівняння архітектурних підходів до крос-доменної верифікації ідентичності

Критерій	Mesh Federation	Hub-and-Spoke Federation	DID/VC-based
Кількість інтеграцій (N доменів)	$N \times (N - 1)$	N	N (довіра до Issuer)
SPOF	Відсутній	Є (брокер)	Відсутній
Поведінка при відмові вузла	Локальна відмова	Повна зупинка	Локальна відмова
Додавання нового домену	N нових конфігурацій	1 адаптер	PEP + довіра до Issuer
Прив'язка до вендора	Висока	Середня	Відсутня
Локальне прийняття рішень	Частково	Ні	Так
Портабельність політик	Відсутня	Часткова	Повна
Відповідність ZTA	Часткова	Часткова	Повна

З наведеного аналізу (табл. 1, 2) випливає, що підхід на основі DID/VC є найбільш архітектурно обґрунтованим для реалізації нульової довіри у гетерогенних багатохмарних середовищах. Mesh Federation і Hub-and-Spoke Federation зберігають прив'язку до провайдер-специфічних ідентичностей, адже навіть якщо брокер зменшує кількість інтеграцій, він лише транслює ідентичності між доменами, не усуваючи їхньої несумісності.

Висновки

Проведений аналіз підтвердив фундаментальну архітектурну несумісність традиційних протоколів федерації ідентичності (SAML, OIDC) з принципами Zero Trust: їхня модель одноразової перевірки та централізованого управління токенами суперечить вимогам безперервної верифікації і призводить до появи єдиних точок відмови.

Порівняльний аналіз трьох архітектурних підходів показав, що підхід на основі DID/VC є найбільш відповідним принципам нульової довіри. На відміну від Mesh Federation, він масштабується лінійно. На відміну від Hub-and-Spoke Federation, він не створює єдиної точки відмови і забезпечує локальне прийняття рішень у кожному домені. Ключовою перевагою є повна портабельність політик: вони виражаються один раз у термінах VC-атрибутів і застосовуються однаково в будь-якому адміністративному домені без трансляції чи мапінгу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці та верифікації формальної моделі запропонованої архітектури, проведенні кількісної оцінки продуктивних характеристик (затримки, пропускну здатність) при різних сценаріях навантаження у багатохмарних конфігураціях, а також у реалізації прототипу системи для практичного підтвердження теоретичних висновків.

References

1. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero Trust Architecture (NIST Special Publication 800-207). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>
2. Khudolii, Ye. P. (2025). Analiz bezpekovykh ryzykiv, shcho vynykaiut vnaslidok fragmentatsii polityky dostupu v bahatokhmarnykh seredovyshchakh. Proceedings from Mohylianski chytannia – 2025: All-Ukrainian Scientific-Practical Conference. (pp. 98–101). ChNU imeni Petra Mohyly.
3. Kumar, R. (2020). Enhancing API Security: A Comparative Analysis of OAuth 2.0, OpenID Connect, and SAML. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences – International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences*, 8(3), 1–15. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15029738>
4. Mukta, R., Pal, S., Chowdhury, K., Hitchens, M., Paik, H.-Y., & Kanhere, S. S. (2026). Zero trust-driven access control delegation using blockchain. *Blockchain: Research and Applications – Blockchain: Research and Applications*, 7, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2025.100319>

5. Dammalapati, P. K. (2025). Understanding federated identity management: Architecture, patterns and enterprise deployment. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences – World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 15(03), 401–411. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.3.0919>
6. Siriwardena, P. (2020). *Advanced API Security: OAuth 2.0 and Beyond (2nd ed.)*. Berkeley, CA: Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2050-4>
7. World Wide Web Consortium. (2022). *Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/TR/did-core/>
8. World Wide Web Consortium. (2024). *Verifiable Credentials Data Model v2.0*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.27

Yevhenii Khudolii,
Yevhen Darnapuk

COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURAL APPROACHES TO CROSS-DOMAIN IDENTITY VERIFICATION UNDER ZERO TRUST IN HETEROGENEOUS MULTI-CLOUD ENVIRONMENTS

Three architectural approaches to cross-domain identity verification under Zero Trust in heterogeneous multi-cloud environments are considered: Mesh Federation, Hub-and-Spoke Federation, and a model based on Decentralised Identifiers and Verifiable Credentials (DID/VC). The architectural incompatibility of traditional identity federation protocols (SAML, OIDC) with Zero Trust principles is identified, stemming from their one-time verification model and centralised token management. A comparative analysis of the approaches is performed against the criteria of resilience to a single point of failure, portability of access policies across administrative domains, and compliance with Zero Trust principles.

Keywords: Zero Trust Architecture, multi-cloud environments, Decentralized Identifiers, Verifiable Credentials.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Худолій Євгеній, аспірант кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yevhenii.khudolii@chmnu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0852-9795>

Yevhenii Khudolii, PhD Student of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yevhenii.khudolii@chmnu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0852-9795>

Дарнапук Євген, PhD, доцент (б. в. з.) кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>

Yevhen Darnapuk, PhD, Associate Professor of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.28

Дмитро Чередниченко,
 Євген Дарнапук

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ СТРЕСОВОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОТ-СИСТЕМИ НА БАЗІ ESP8266 V3.0 CH340

Стрімкий ритм сучасного існування вимагає точного виявлення емоційного та психологічного тиску, що ставить розробку дієвих засобів спостереження за стресом. Проведено вивчення фізіологічних процесів, що лежать в основі стресових відгуків, і обґрунтовано вибір визначальних біометричних індикаторів, серед яких виділяється варіабельність серцевого ритму (BCP), задля їхньої точної верифікації. Вагоме місце у роботі займає впровадження рішень Інтернету Речей (IoT), які дають змогу безперервно збирати та передавати інформацію в режимі, наближеному до дійсного. Представлена цілісна структура системи нагляду, збудована на основі мікроконтролера та спеціалізованих датчиків. Докладно описано стадії опрацювання біометричних сигналів, виокремлення найбільш змістовних характеристик та використання навчальних алгоритмів для стійкого розрізнення ступенів навантаження. Демонструється, що поєднання передових сенсорних рішень та розумних методів аналізу відкриває свіжі обрії для формування автоматизованих комплексів контролю за психофізіологічним станом індивідуально для кожного.

Ключові слова: стрес, HRV, IoT, біометричні дані, сенсори, машинне навчання, моніторинг.

Стрес визначається як неспецифічна адаптаційна реакція організму на дію зовнішніх або внутрішніх подразників. У фізіологічному аспекті він пов'язаний з активацією гіпоталамо-гіпофізарно-наднирникової системи та симпатичного відділу вегетативної нервової системи [1]. У відповідь на стресовий фактор в організмі підвищується рівень адреналіну та кортизолу, що призводить до змін серцевої діяльності, судинного тону, потовиділення та температурної регуляції. Найбільш інформативними показниками для оцінювання стресового стану є частота серцевих скорочень (HR), варіабельність серцевого ритму (HRV), шкірно-гальванічна реакція (GSR), температура тіла та електрокардіографічні параметри. Зокрема, під час стресу зазвичай спостерігається підвищення HR, зниження HRV та зростання електропровідності шкіри. Варіабельність серцевого ритму є особливо цінним показником, оскільки вона відображає баланс між симпатичною та парасимпатичною регуляцією серцевої діяльності та широко використовується у сучасних дослідженнях стресу [1–2].

Найбільш інформативними показниками для оцінювання стресового стану є частота серцевих скорочень (HR), варіабельність серцевого ритму (HRV), шкірно-гальванічна реакція (GSR), температура тіла та електрокардіографічні параметри. Зокрема, під час стресу зазвичай спостерігається підвищення HR, зниження HRV та зростання електропровідності шкіри. Варіабельність серцевого ритму є особливо цінним показником, оскільки вона відображає баланс між симпатичною та парасимпатичною регуляцією серцевої діяльності.

Таблиця 1.

Основні біометричні показники для оцінювання стресу

Показник	Фізіологічна природа	Зміна при стресі	Практична значущість
HR	Серцева активність	Підвищення	Швидка оцінка стану
HRV	Баланс ВНС	Зниження	Висока діагностична цінність
GSR	Активність потових залоз	Підвищення	Маркер емоційної реакції
ЕКГ	Електрична активність серця	Зміни інтервалів	Клінічна точність
Температура	Терморегуляція	Незначні коливання	Додатковий індикатор

Окрім миттєвих фізіологічних реакцій, стрес має також довготривалий вплив на організм. Хронічний стрес може призводити до порушення регуляції серцево-судинної системи, зниження імунної відповіді та погіршення когнітивних функцій. Раннє виявлення підвищеного рівня стресу є важливим не лише з точки зору психологічного комфорту, але й профілактики серйозних захворювань.

Важливо враховувати, що кожен показник окремо не дає повної картини стану організму. Наприклад, підвищення частоти серцевих скорочень може бути пов'язане не лише зі стресом, а й з фізичним навантаженням або вживанням кофеїну. Комбінування HR, HRV та GSR дозволяє значно підвищити точність визначення психоемоційного стану. Аналіз фізіологічних показників створює основу для побудови автоматизованої системи оцінювання стресу. Інтернет речей (IoT) передбачає об'єднання фізичних пристроїв у мережу з можливістю обміну даними в режимі реального часу. У сфері медицини сформувався напрям Internet of Medical Things (IoMT), що забезпечує дистанційний моніторинг стану здоров'я та раннє виявлення відхилень [2–3]. Для збору біометричних сигналів використовуються оптичні PPG-сенсори, які визначають частоту пульсу через аналіз змін кровонаповнення судин; ЕКГ-електроди, що фіксують електричну активність серця; GSR-датчики, які вимірюють електропровідність шкіри; а також акселерометри та температурні сенсори.

Мікроконтролери займають важливе місце у побудові периферійного пристрою. Arduino забезпечує простоту розробки, Raspberry Pi має більшу обчислювальну потужність, однак ESP8266 V3.0 CH340 є доцільним рішенням для компактної IoT-системи завдяки підтримці Wi-Fi, простому підключенню через USB-інтерфейс CH340, достатній для передавання біометричних даних продуктивності та енергоефективності, що дозволяє реалізувати компактну автономну систему моніторингу. Узагальнену структуру розробленої системи моніторингу наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Узагальнена архітектура IoT-системи моніторингу стресу

Дана архітектура забезпечує масштабованість системи та можливість інтеграції з аналітичними платформами. Запропонована архітектура демонструє послідовність передавання даних від сенсорного рівня до користувацького інтерфейсу. Важливою перевагою такої структури є розподіл функцій між рівнями системи: первинна обробка сигналів здійснюється безпосередньо на мікроконтролері, тоді як більш складний аналіз може виконуватися на сервері або в хмарному середовищі, що дозволяє зменшити навантаження на периферійний пристрій і підвищити енергоефективність. Використання бездротових технологій передачі даних забезпечує мобільність користувача та можливість інтеграції системи з іншими сервісами, зокрема мобільними додатками або медичними інформаційними платформами. У випадку перевищення встановлених порогових значень система може автоматично формувати сповіщення або рекомендації щодо зниження рівня стресу.

Вибір апаратної платформи є важливим етапом проектування системи, оскільки саме вона визначає продуктивність, енергоефективність та можливості інтеграції. У даній роботі використано мікроконтролер ESP8266 V3.0 CH340 (рис. 2), який є доцільним рішенням для реалізації IoT-системи моніторингу стресу. ESP8266 V3.0 CH340 поєднує достатню для периферійного збору даних продуктивність із низьким енергоспоживанням, що особливо важливо для автономних пристроїв. Наявність вбудованого модуля Wi-Fi та перетворювача CH340 для програмування через USB дозволяє передавати дані без використання додаткових Wi-Fi-комунікаційних модулів, що спрощує схему пристрою та зменшує його габарити. Крім того, ESP8266 V3.0 CH340 має цифрові інтерфейси та аналоговий вхід для підключення біометричних сенсорів або відповідних модулів, що робить його придатним рішенням для задач медичного моніторингу.

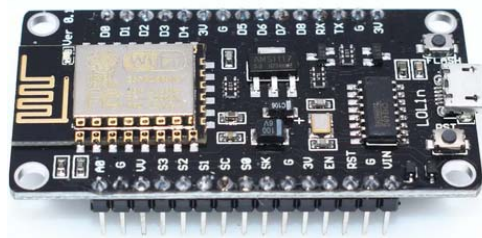


Рис. 2. Загальний вигляд плати ESP8266 V3.0 CH340

Отримані біометричні сигнали потребують попередньої обробки, оскільки вони можуть містити шуми, артефакти руху та перешкоди. Початковий етап включає фільтрацію (ковзне середнє, цифрові фільтри), нормалізацію та усунення аномальних значень. Після очищення сигналів здійснюється виділення інформативних ознак. Для HRV використовуються часові показники (SDNN, RMSSD) та частотні характеристики (LF, HF-компоненти). Аналіз співвідношення LF/HF дозволяє оцінити баланс симпатичної та парасимпатичної регуляції.

Щоб класифікувати рівні стресу, можна застосувати статистичні методи та алгоритми машинного навчання. Метод опорних векторів (SVM) забезпечує ефективне розділення класів при невеликій вибірці даних. Random Forest дозволяє враховувати нелінійні залежності між параметрами. Поеднання сучасних сенсорів, IoT-технологій та алгоритмів аналізу сигналів створює надійну основу для розробки автоматизованої системи оцінювання рівня стресу в режимі реального часу [2–3].

Рівень стресу можна оцінювати за допомогою біометричних показників, зокрема частоти серцевих скорочень, варіабельності серцевого ритму та шкірно-гальванічної реакції. Комплексний аналіз кількох параметрів дає більш точний результат, ніж використання одного показника. Використання мікроконтролера ESP8266 V3.0 CH340 дозволяє створити компактну та енергоефективну систему, яка може безперервно збирати й передавати дані в режимі реального часу. Обробка сигналів і застосування алгоритмів машинного навчання дають змогу автоматично визначати рівень стресу.

Надалі систему можна вдосконалити шляхом додавання нових датчиків, підвищення точності алгоритмів та врахування індивідуальних особливостей користувача. Перспективним є створення мобільного додатка для зручного перегляду результатів і отримання рекомендацій щодо зниження стресу. Розвиток таких рішень сприятиме більш ефективному контролю психофізіологічного стану людини в повсякденному житті.

References

1. Kim H.-G., Cheon E.-J., Bai D.-S., Lee Y. H., Koo B.-H. Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation*. 2021. Vol. 18(3). P. 235–245. DOI: 10.30773/pi.2020.0419
2. Gjoreski M., Gjoreski H., Luštrek M., Gams M. Continuous stress detection using wearable devices: A review. *Sensors*. 2022. Vol. 22(4). 1234. DOI: 10.3390/s22041234
3. Sarker I. H. Machine Learning for Intelligent IoT Systems: A Comprehensive Review. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 196. 103247. DOI: 10.1016/j.jnca.2021.103247

METHODS FOR ASSESSING STRESS STATE USING ESP8266 V3.0 CH340-BASED IoT SYSTEM

The rapid rhythm of modern existence requires accurate detection of emotional and psychological pressure, which requires the development of effective means of monitoring stress. The physiological processes underlying stress responses have been studied, and the choice of defining biometric indicators, among which heart rate variability (HRV) stands out, has been justified for their accurate verification. A significant place in the work is occupied by the implementation of Internet of Things (IoT) solutions, which allow for continuous collection and transmission of information in a mode close to real. A holistic structure of the surveillance system, built on the basis of a microcontroller and specialized sensors, is presented. The stages of processing biometric signals, the isolation of the most meaningful characteristics and the use of learning algorithms for stable differentiation of load levels are described in detail. It is demonstrated that the combination of advanced sensor solutions and intelligent analysis methods opens up new horizons for the formation of automated complexes for monitoring the psychophysiological state individually for each person.

Keywords: stress, HRV, IoT, biometric data, sensors, machine learning, monitoring.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Євген Дарнапук, PhD, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

Yevhen Darnapuk, PhD, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

Дмитро Чередниченко, студент 4 курсу кафедри комп'ютерної інженерії Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: d.cherednychenko35@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0003-3326-7668>.

Dmytro Cherednychenko, 4th year student of the Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: d.cherednychenko35@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0003-3326-7668>.

АВТОМАТИЗАЦІЯ НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА БПЛА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПОЛЬОТНИХ ЛОГІВ

Тези представляють огляд сучасних підходів до автоматизації налаштування PID-регуляторів безпілотних літальних апаратів на основі аналізу польотних журналів. Розглянуто можливості використання журналів польоту для виявлення осциляцій, резонансів та інших особливостей динаміки БпЛА. Проаналізовано сучасні програмні засоби й алгоритми автоматичного налаштування, зокрема спектральний аналіз, Autotune, а також перспективи застосування методів машинного навчання, нейронних мереж і навчання з підкріпленням для формування рекомендацій щодо оптимізації параметрів керування.

Ключові слова: БпЛА, аналіз Blackbox, автоматичне налаштування PID, спектральний аналіз, Autotune, машинне навчання, навчання з підкріпленням.

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у сферах цивільного, промислового та оборонного застосування зумовлює зростання вимог до точності, стабільності та адаптивності систем автоматичного керування.

Основою більшості сучасних польотних контролерів залишаються PID-регулятори, ефективність яких безпосередньо залежить від коректності налаштування коефіцієнтів керування. Водночас традиційне ручне налаштування PID-параметрів є складним, тривалим і значною мірою залежить від досвіду оператора. Таким чином, особливої актуальності набувають підходи, засновані на автоматизованому аналізі польотних логів, що дозволяють здійснювати об'єктивну оцінку динаміки польоту та формувати рекомендації щодо оптимізації параметрів регулятора.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки рішень, які надаватимуть рекомендації щодо оптимізації PID-параметрів для БпЛА на основі журналів польоту без потреби в їх ручному аналізі.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування методів машинного навчання, а також нейромереж для формування рекомендованих параметрів і налаштувань PID-регуляторів.

Історичний перехід від емпіричного налаштування до аналізу даних

Традиційний підхід до налаштування PID-регуляторів історично спирався на емпіричний досвід пілота або інженера: візуальну оцінку реакції апарату на команди управління, прослуховування звуку роботи моторів та ітеративну зміну коефіцієнтів методом спроб і помилок. Сьогодні такий підхід втратив свою актуальність через кілька критичних факторів:

1. сучасні БпЛА часто мають нетипову аеродинаміку, асиметричне розташування моторів або змінний центр мас;
2. PID-коефіцієнти, які ідеально налаштовані під час тестового польоту, часто призводять до фатальної деградації управління при додаванні корисного навантаження, в умовах сильного вітру або через пошкодження [1];
3. при серійному виробництві витрачати години на індивідуальний тюнінг кожного борту економічно нецільно.

Саме тому індустрія здійснює безальтернативний перехід до data-driven методів. Аналіз польотних журналів (Blackbox) дозволяє перевести процес налаштування із суб'єктивної площини в об'єктивну. Оцифрована телеметрія (частота обертання моторів, показники гіроскопа, рівень шумів) дає змогу математично точно оцінити перехідну характеристику системи, виявити приховані механічні резонанси рами та зрозуміти, чи не перевантажений контур керування.

Автоматизація через спеціалізоване ПЗ та вбудовані алгоритми

На сьогодні автоматизація процесу налаштування на основі логів розвивається у двох паралельних напрямках, а саме: офлайн-аналіз польотних журналів та вбудовані алгоритми ідентифікації.

Польотний журнал, або ж Blackbox, – збірка даних про кутові швидкості, вібрації, сигнали керування, роботу моторів та реакцію БПЛА на команди пілота, що були записані під час польоту. Аналіз цих даних дозволяє виявляти приховані осциляції, резонанси рами, надлишкову фільтрацію та інші проблеми контуру керування.

Одними з найбільш поширених інструментів аналізу польотних логів є PIDtoolbox, Betaflight Blackbox Explorer та UAV LogViewer.

В утилітах типу Betaflight Blackbox Explorer та UAV LogViewer (рис. 1) телеметрія розкладається на три ключові графіки: Setpoint (команда пілота), Gyro (реальна реакція гіроскопа) та Motor Output (керуючий сигнал на двигуни).

Сучасна автоматизація в офлайн-ПЗ (зокрема в PIDtoolbox) базується на спектральному аналізі даних за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT). Програма аналізує лог і будує тривимірні спектрограми (шум/частота/час). Алгоритм вираховує графік відгуку на одиничний імпульс (Step Response), визначаючи затримку системи в мілісекундах та ступінь перерегулювання (overshoot), що дає інженеру математично коректні дані для зміни коефіцієнтів [2].



Рис. 1. Інтерфейс UAV LogViewer

Для систем, де зміна маси є регулярною (наприклад, аграрні або логістичні БПЛА на базі ArduPilot чи PX4), актуальним є використання алгоритмів онлайн-ідентифікації.

На відміну від офлайн-методів, режим Autotune (рис. 2), реалізований у польотних контролерах під керуванням ArduPilot та PX4, працює безпосередньо у повітрі за алгоритмом ідентифікації у часовій чи частотній області [3]. Під час активації цього режиму БПЛА виконує серію різких контрольованих мікроімпульсів по кожній осі чергово. Польотний контролер фіксує кутове прискорення та швидкість затухання коливань. Якщо система бачить відскок, коефіцієнт D автоматично підвищується, якщо система реагує мляво – підвищується коефіцієнт P.



Рис. 2. БПЛА мультироторного типу в польотному режимі Autotune

Процес завершується автоматичним збереженням параметрів у EEPROM контролера, забезпечуючи безпечний запас стійкості на рівні 20–25% від критичної межі коливань.

Перспективи автоматизації налаштування PID-регуляторів за допомогою штучного інтелекту та методів машинного навчання

Незважаючи на ефективність поточних алгоритмів, їхня гнучкість обмежена жорсткою математичною логікою, яка не завжди здатна коректно інтерпретувати нетипові аеродинамічні явища (наприклад, ефект *progrwash* – потрапляння дрона у власний турбулентний слід). Саме тут відкриваються перспективи застосування методів машинного навчання та глибоких нейромереж, що є найперспективнішим вектором розвитку систем керування.

Деякі рішення використовують нейромережі, попередньо натреновані на масивах із десятків тисяч польотних логів від БпЛА різних конфігурацій. Ключовою перспективою таких систем є здатність ШІ контекстуалізувати шум. При наявності достатньої кількості даних ШІ відрізняє структурні вібрації пошкодженої рами від аеродинамічної турбулентності. Більше того, на основі аналізу логу є можливість передбачати ймовірність теплового перевантаження і згоряння моторів – оператору достатньо завантажити лог польоту, після чого нейромережа генерує оптимальний набір параметрів PID та налаштувань фільтрів гіроскопа.

Також перспективним підходом є застосування агентів навчання з підкріпленням. На відміну від офлайн-аналізаторів, RL-агенти здатні до безперервного адаптивного управління безпосередньо у польоті [4]. Агент постійно аналізує телеметрію та підлаштовує коефіцієнти PID-регулятора, отримуючи винагороди за стабільне утримання позиції і штрафи за високочастотні осциляції або перерегулювання (рис. 3). Це відкриває перспективу створення БпЛА, які автоматично адаптуються до втрати частини пропелера, відмови одного з моторів або екстремальних погодних умов у режимі реального часу, спираючись на безперервний потік телеметрії.

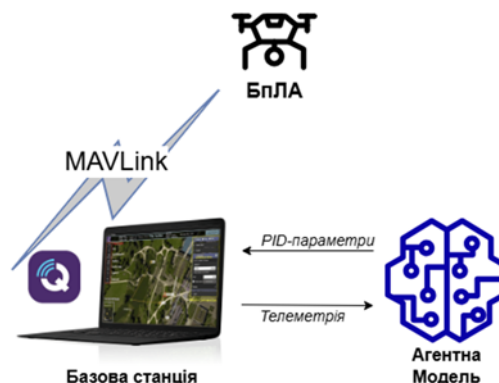


Рис. 3. Взаємодія між БпЛА, базовою станцією та агентною моделі в контексті безперервного адаптивного управління

Ще одним перспективним напрямком є використання еволюційних алгоритмів у парі зі STIL (Software-in-the-Loop) для офлайн-оптимізації логів складних платформ. У таких системах набори PID-коефіцієнтів проходять процеси комп'ютерної симуляції (рис. 4), а алгоритм обирає лише ті налаштування, які генерують мінімальну похибку під час симульованого польоту, що дозволяє знайти, стабільні конфігурації параметрів, які людина-оператор знайти не здатна без великої кількості ітерацій.

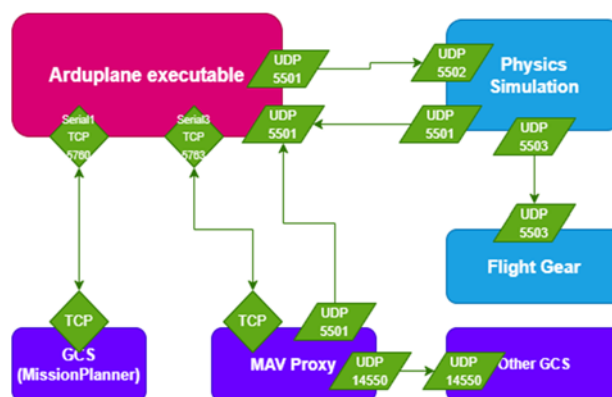


Рис. 4. Схема роботи STIL для платформи Ardupilot

Висновки

Аналіз сучасного стану систем автоматичного управління БПЛА демонструє, що традиційні емпіричні методи налаштування PID-регуляторів повністю вичерпали свій потенціал. Зростаюча складність завдань та конструкцій вимагає переходу до системної ідентифікації на основі польотних логів.

Автоматизація аналізу Blackbox вже сьогодні дозволяє радикально прискорити введення літальних апаратів в експлуатацію. Водночас головною перспективою розвитку галузі є повна інтеграція методів машинного навчання, штучних нейронних мереж та алгоритмів навчання з підкріпленням. Ці технології трансформують процес налаштування з офлайн-аналізу даних у динамічний, інтелектуальний процес, здатний у реальному часі адаптувати динаміку БПЛА до будь-яких зовнішніх збурень, роблячи системи керування по-справжньому автономними.

References

1. Imran, I. H., Wood, K., & Montazeri, A. (2024). Adaptive Control of Unmanned Aerial Vehicles with Varying Payload and Full Parametric Uncertainties. *Electronics*, 13(2), 347. (pp. 2–3) <https://doi.org/10.3390/electronics13020347>.
2. White, B. (n.d.). PIDtoolbox: Flight log analysis tools. <https://pidtoolbox.com/home>.
3. ArduPilot Development Team. (n.d.). Automatic tuning with AUTOTUNE. ArduPilot Documentation. <https://ardupilot.org/plane/docs/automatic-tuning-with-autotune.html>.
4. Ishihara, Y., Hazama, Y., Suzuki, K., Yokono, J. J., Sabe, K., & Kawamoto, K. (2023). Improving Wind Resistance Performance of Cascaded PID Controlled Quadcopters using Residual Reinforcement Learning. *ArXiv*. (pp. 2–5) <https://arxiv.org/abs/2308.01648>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.29

Hlib Chernyhin

AUTOMATION OF UAV PID CONTROLLER TUNING BASED ON FLIGHT LOG ANALYSIS

The abstract presents an overview of modern approaches to automating the tuning of PID controllers for unmanned aerial vehicles based on the analysis of flight logs. It examines the potential of using flight logs to detect oscillations, resonances, and other characteristics of UAV dynamics. Abstract analyzes modern software tools and algorithms for automatic tuning, including spectral analysis and Autotune, as well as the prospects for applying machine learning methods, neural networks, and reinforcement learning to generate recommendations for optimizing control parameters.

Keywords: UAV, Blackbox analysis, automatic PID tuning, spectral analysis, Autotune, machine learning, reinforcement learning.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Гліб Чернигін, магістр інженерії програмного забезпечення. E-mail: hlib.chernyhin@gmail.com

Hlib Chernyhin, Master of Software Engineering. E-mail: hlib.chernyhin@gmail.com

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.30

Геннадій Чуйко,
Євген Дарнапук,
Поліна Кравченко

УКРАЇНСЬКА КВАНТОВА ОСВІТА В ГЛОБАЛЬНОМУ КОНТЕКСТІ

Даний аналітичний огляд пропонує стислу оцінку поточного стану квантової освіти в Україні порівняно з провідними системами. У статті розглядається класифікація квантових технологій у комп'ютерній інженерії відповідно до рамкових стандартів QTEdu, Horizon Europe, ACM/IEEE та UNESCO, з акцентом на структурну відповідність квантових обчислень, квантових телекомунікацій та квантової інформатики усталеним інженерним рівням.

В аналізі оцінюється інституційне охоплення, різноманітність програм та потенціал України для інтеграції в європейські освітні ініціативи. Рекомендації включають створення національного центру квантової освіти, гармонізацію навчальних програм та розширення англомовних матеріалів для зміцнення міжнародної співпраці.

Ключові слова: квантова освіта, квантові технології, комп'ютерна інженерія, QTEdu, Horizon Europe, Україна.

Квантові обчислення, квантові телекомунікації, квантову інформатику все частіше розглядають як спеціалізовані галузі інформаційних нанотехнологій з трьох основних причин:

1. по-перше, вони використовують кубіти (квантові біти) – нанорозмірні пристрої, розроблені за допомогою нанотехнологій;
2. по-друге, поведінка кубітів та обробка інформації регулюються квантовою фізикою, включаючи такі поняття як суперпозиція, квантова запутаність та декогеренція;
3. квантові обчислення впроваджують новий метод обробки інформації на квантовому нанорівні, позиціонуючи його як інноваційний інструмент для керування даними.

Квантові обчислення, квантові телекомунікації та квантова інформатика є складовими комп'ютерної інженерії, оскільки вони реалізують фундаментальні функції обчислення, передавання та обробки інформації на квантових фізичних носіях. Ці технології відтворюють архітектуру класичних обчислювальних систем на глибшому рівні фізики, зберігаючи структурну відповідність між фізичним, логічним, архітектурним та алгоритмічним рівнями.

Такі відомі міжнародні організації, як QTEdu, Horizon Europe, ACM/IEEE та UNESCO, класифікують квантові обчислення як безпосередню частину комп'ютерної інженерії [1–5]. У цій класифікації:

4. квантові телекомунікації відповідають мережевому рівню комп'ютерної інженерії (аналог класичних телекомунікаційних систем, але на квантових каналах);
5. квантова інформатика відповідає алгоритмічному рівню (аналог класичної інформатики, але з кубітними моделями, унітарними операціями та квантовими кодами).

Таким чином, квантові технології природно інтегруються в структуру комп'ютерної інженерії, оскільки забезпечують ті самі функції – обчислення, комунікацію та інформаційну обробку – але реалізовані на новому фізичному рівні (рис. 1).



Рис. 1. Ієрархічна структура квантових технологій у межах комп'ютерної інженерії: Квантові обчислення є складовою комп'ютерної інженерії, а квантові телекомунікації та квантова інформатика – відповідно її мережевим та алгоритмічним рівнями

Джерело: сформовано авторами на основі документів [1–5]

Табл. 1 дає кількісну порівняльну оцінку освітніх вузів, де запроваджені курси з квантових технологій, станом на початок 2025 року. Оцінки базуються на відкритих джерелах, доступних авторам на момент підготовки звіту. Хоча перелік може бути неповним, співвідношення між регіонами відображає реальні тенденції розвитку квантової освіти.

Таблиця 1.

Кількісна порівняльна оцінка освітніх вузів, де запроваджено курси з квантових технологій (станом на початок 2026 року)

Регіон	Кількість університетів	Джерела ініціативи
Україна	10	КНУ, КПІ, КАУ, ЛНУ, УКУ, ХНУ, ЧНУ ім. Федьковича, ЧНУ ім. Могили, ХФТИ, Львівська політехніка
США	20+	MIT, Stanford, Harvard, UC Berkeley, Caltech, Yale, Princeton, Chicago, Maryland, Duke
Китай	100+	Tsinghua, Peking, USTC, Zhejiang, Shanghai Jiao Tong, Fudan
Європа	60–70	Cambridge, Oxford, ETH Zurich, EPFL, Delft, Paris-Sud, TU Munich, Leuven, Vienna TU, Bristol

Як показує табл. 1, Китай та Європейський Союз є світовими лідерами у підготовці кадрів для квантових технологій, включно з квантовими обчисленнями. Обидва регіони демонструють масштабні інвестиції в освітню інфраструктуру, розгалужені мережі університетів та системні програми підтримки квантових досліджень.

У той же час в Україні вже стихійно-ініціативне сформувалося власне ядро (кластер) освітніх центрів, представлене п'ятьма регіонами країни (рис. 2).



Рис. 2. Географія квантових освітніх програм в Україні

Це ядро створює реальні передумови для інтеграції України в європейську систему підготовки кадрів для квантових технологій, зокрема в межах ініціатив QTEdu та Horizon Europe. Детальніший огляд українських освітніх програм з квантових технологій дає табл. 2.

Таблиця 2.

**Характеристики українських освітніх вузлів, де запроваджено курси з квантових технологій
 (станом на початок 2026 року)**

Університет	Назва курсу / програми	Рівень вищої освіти	Особливості	Інструменти
ЛНУ ім. Івана Франка (Львів)	Quantum Computing and Quantum Programming	Бакалавр/Магістр	Перша повноцінна програма в Україні; фокус на комп'ютерні науки	Python, Qiskit
КНУ ім. Тараса Шевченка (Київ)	Quantum Computers, Computing and Information	Бакалавр/Магістр	Фізична школа, фотоніка; акцент на квантовій фізиці	Python, Qiskit
Державна наукова установа “Київський академічний університет” (Київ)	Theoretical Quantum Optics, Quantum Technologies	Магістр	Науково-орієнтовані курси – сильна теорія	Python, Qiskit
ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків)	Quantum Technologies	Магістр	Квантова інженерія; Фізико-технічний профіль	Python
Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАНУ (Харків)	Quantum Engineering	Аспірантура	Мезоскопіка, надпровідність – науковий центр	—
ЧНУ ім. Петра Могили (Миколаїв)	Основи квантових обчислень	Бакалавр	Комп'ютерна інженерія, 13 лекцій, 6 практикумів, 6 лабораторних, 2 презентації, груповий проєкт	Maple, Quirk
НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” (Київ)	Quantum Physics / Quantum Electronics	Бакалавр	Фізика, електроніка, але немає окремого курсу з квантових обчислень	—
НУ “Львівська політехніка” (Львів)	Quantum Informatics	Магістр	Квантова криптографія, теоретичний курс	Python
ЧНУ ім. Юрія Федьковича (Чернівці)	Quantum Informatics	Бакалавр	Курс Кособуцького, фізичний профіль	—

Стратегічні висновки та рекомендації:

- наявні активи.** Україна має щонайменше 10 активних університетів і наукових центрів, де викладаються курси з квантових технологій, що охоплюють фізику, інформатику та інженерію;
- потенціал масштабування.** Географічна диверсифікація освітніх вузлів та наявність магістерських програм створюють основу для формування національного квантового освітнього кластера.
- інтеграція з ЄС.** Українські програми, наприклад в КНУ, КАУ та ХНУ, є якісно конкурентними та можуть бути інтегровані в ініціативи QTEdu і Horizon Europe за умов:
 - розвитку англomовних курсів;
 - гармонізації силабусів із європейськими стандартами;
 - створення спільних освітніх програм і МООС-курсів.

Рекомендується оформлення українського квантового освітнього кластера як єдиного хабу з аналітикою, мапою програм, силабусами та англomовними описами для міжнародної співпраці.

References

1. QTEdu / Quantum Flagship. (2023). Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA): Education and Skills Chapter. European Commission.
2. European Commission. (2023). Horizon Europe Work Programme 2023–2025: Cluster 4 — Digital, Industry and Space. Quantum Technologies. Brussels.
3. ACM/IEEE Joint Task Force. (2020). Computing Curricula 2020 (CC2020): Paradigms for Global Computing Education. ACM/IEEE, New York.
4. IEEE Computer Society. (2022). Computer Engineering Body of Knowledge (CEBoK v1.0). IEEE Press. UNESCO Institute for Statistics. (2014). ISCED-F 2013: International Standard Classification of Education — Fields of Education and Training. Montreal.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.30

Gennady Chuiko,
Yevhen Darnapuk,
Polina Kravchenko

UKRAINIAN QUANTUM EDUCATION IN THE GLOBAL CONTEXT

This analytical review offers a concise assessment of the current state of quantum education in Ukraine compared to leading systems. The article examines the classification of quantum technologies in computer engineering according to the QTEdu, Horizon Europe, ACM/IEEE and UNESCO frameworks, with a focus on the structural correspondence of quantum computing, quantum telecommunications and quantum informatics to established engineering levels.

The analysis assesses the institutional reach, diversity of programs and Ukraine's potential for integration into European educational initiatives. Recommendations include the establishment of a national center for quantum education, harmonization of curricula and expansion of English-language materials to strengthen international cooperation

Key words: quantum education, quantum technologies, computer engineering, QTEdu, Horizon Europe, Ukraine.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Геннадій Чуйко, д-р фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: genchuiko@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5590-9404>.

Gennady Chuiko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: genchuiko@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5590-9404>.

Євген Дарнапук, PhD, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

Yevhen Darnapuk, PhD, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

Поліна Кравченко, магістрантка кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kravchenko.p@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0002-7521-5914>.

Polina Kravchenko, Master's Student of the Computer Engineering Department at Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kravchenko.p@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0002-7521-5914>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.31

Альона Швед

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В АНАЛІЗІ РИЗИКІВ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

В тезах досліджено проблематику ідентифікації та аналізу ризиків програмних систем, розглянуто сучасні методи та підходи до виявлення ризиків програмного забезпечення, проаналізовано методології управління ризиками програмних систем. Досліджено можливість застосування моделей та методів сценарного моделювання для аналізу ризиків програмного забезпечення. Запропоновано використовувати деревоподібні графові моделі, зокрема, дерева ймовірності для побудови та аналізу сценаріїв реалізації можливих комбінацій ризикоутворюючих факторів.

Розглянуто методику визначення ймовірності реалізації ризикоутворюючих подій за умови, що апіорні оцінки ймовірності настання несприятливої події можуть бути отримані одночасно з декількох незалежних джерел, наприклад, оцінені групою експертів. Для отримання агрегованих (узагальнених) оцінок апіорних ймовірностей реалізації ризикоутворюючих подій запропоновано використовувати математичний апарат теорії свідомств. Для підвищення якості результатів агрегування пропонується визначати порядок агрегування, наприклад, на основі мір подібності. В якості правила комбінування експертних свідомств запропоновано використовувати одне з правил перерозподілу конфліктів, такий підхід дозволяє обробляти оцінки експертів в умовах суперечливості та неповноти експертної інформації.

Ключові слова: аналіз ризиків, програмне забезпечення, методи сценарного аналізу, експертні оцінки.

Життєвий цикл (ЖЦ) програмного забезпечення нерозривно пов'язаний із процесами управління ризиками. Кожна фаза ЖЦ пов'язана із певним переліком потенційних загроз, тому аналіз та управління ризиками є критично важливим аспектом процесу розробки програмних систем (ПС). Своєчасне та раннє виявлення ризиків на кожній фазі розробки програмного забезпечення (ПЗ) відповідає принципам проактивного управління, забезпечує стійкість процесів ЖЦ та спрямоване на створення якісного продукту в межах ресурсів проєкту.

Програмний ризик – це загроза, яка може негативно вплинути на якість ПЗ, затримати проєкт або перевищити бюджет [2]. В роботі [1] ризик проєкту ПС визначається як можливість зниження якості кінцевого продукту, перевищення вартості його розробки, затримки закінчення розробки або зриву проєкту через неефективність, недосконалість процесів ЖЦ.

Аналіз ризиків програмного забезпечення – це проактивний, систематичний процес спрямований на ідентифікацію, аналіз та визначення пріоритетів потенційних технічних, проєктних або безпекових загроз у розробці ПЗ для запобігання можливих негативних наслідків (збоїв, перевитрат бюджету, затримках у графіку).

Своєчасне управління ризиком базується на вимірюванні, оцінюванні та прогнозуванні [1]. Більшість методів аналізу ризиків застосовуються на етапі аналізу вимог. Стандарт ISO/IEC 12207 передбачає окремий процес ЖЦ для управління ризиками проєктів. Зі зростанням розміру та складності програмних проєктів намітилася тенденція переходу від евристичних методів управління ризиками до використання систематизованих, гнучких та легко адаптованих методів управління ризиками (матричний метод, легкі (*light-weight*) методи (*PRAM*, *PRISMA*), моделі *FMEA*, *FTA*, тощо), що забезпечують аналітика всією необхідною інформацією для прийняття оперативних рішень, спрямованих на зниження ймовірності реалізації ризику та мінімізації негативних наслідків, якщо уникнути ризику не вдалося.

Інститут SEI (*Software Engineering Institute*) пропонує три методології управління ризиком ПС: оцінювання ризику, безперервне управління ризиком та колективне управління ризиком. Методологія оцінювання ризику SRE (*Software Risk Evaluation*) включає формальний метод ідентифікації, аналізу, контролю та усунення ризиків ПС, який вперше застосовується на ранній стадії розробки проєкту (ще до укладення договору з розробником) і потім періодично в ході всього ЖЦ проєкту [1]. Методологія безперервного управління ризиком CRM (*Continuous Risk Management*) – це проактивний підхід до ідентифікації, аналізу та реагування на ризики протягом всього ЖЦ проєкту ПС, яка не залежить від конкретних методів і інструментів оцінки та усунення ризику, що

застосовуються [4]. Методологія колективного управління ризиком TRM (*Team Risk Management*) – це ітеративний процес, який використовує командний підхід до управління ризиками з боку замовника та виконавця.

Для аналізу ризиків ПС та оцінки впливу окремих ризикоутворюючих факторів можуть бути використані моделі, що представлені деревами ймовірностей, на яких вирішуються задачі ймовірнісного виведення. На рис. 1 наведено приклад побудови дерева ймовірностей для аналізу комбінації ризикоутворюючих факторів, що впливають на збільшення строків реалізації ПС: r_1 – розширення обсягу робіт (зумовлено зміною або додавання нових вимог під час розробки, які не були заплановані напочатку проекту); r_2 – недостатня оцінка трудовитрат (зумовлена помилками в плануванні часу реалізації проекту); r_3 – комунікаційний ризик (зумовлений недостатньо налагодженою комунікацією у команді).

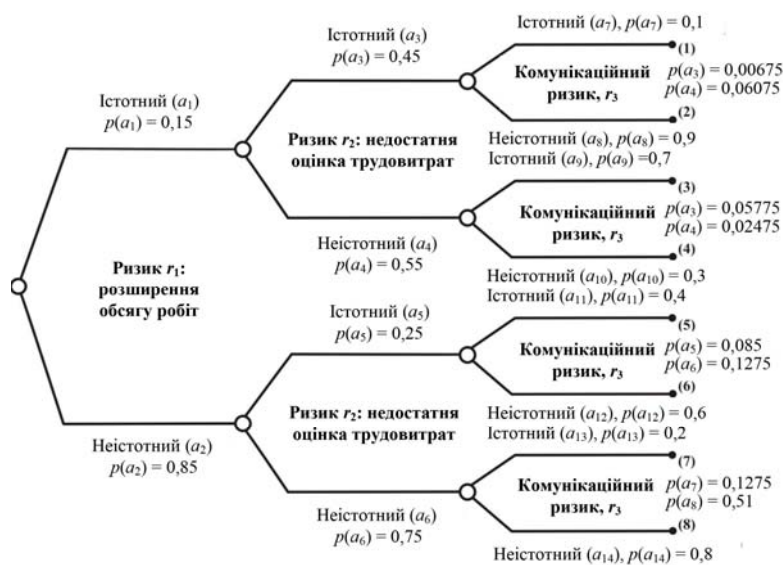


Рис. 1. Дерево ймовірностей випадкових ризикоутворюючих подій, що впливають на збільшення строків реалізації проекту

Дерева ймовірностей (*Probability Tree Analysis, PTA*) широко використовуються для моделювання невизначених складних ситуацій невеликої розмірності та дозволяють аналізувати послідовності сценаріїв (варіантів) подальшого розвитку подій. Попередньо аналізований ризикоутворюючий фактор, що представляє систему випадкових подій, графічно відображається у формі дерева розподілу, кожна гілка якого відображає одну випадкову подію та ймовірність (p) її реалізації. Комбінації таких дерев формують деревоподібний граф – дерево ймовірностей. Кожен вузол (вершина) такого графа пов'язані з однією повною системою випадкових подій. Кожна подія та ймовірність її реалізації відображається гілкою дерева, що виходить із відповідного вузла. Кожен шлях на дереві від кореневого вузла до кінцевої позиції відображає одну з можливих комбінацій подій, яка називається сценарієм [3]. Загальна кількість сценаріїв може бути визначена ще до побудови дерева ймовірностей як:

$$N = \prod_{i=1}^t k_i \quad (1)$$

де k_i – кількість подій в i -ій системі; t – загальна кількість систем випадкових подій.

Ймовірність реалізації ризикоутворюючої події може бути отримана на основі частотного підходу шляхом обробки статистичних даних про минулі реалізації події, або на основі аналізу оцінок експертів.

Якщо ймовірність реалізації ризикоутворюючої події визначалась за результатами групової експертизи, то постає задача пошуку агрегованої оцінки. Розглянемо методику агрегування індивідуальних оцінок експертів ймовірності реалізації ризикоутворюючої події [3, 6].

Припустимо, групі експертів $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ запропоновано оцінити ймовірність реалізації множини незалежних ризикоутворюючих подій $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, наприклад, за шкалою від 0 до 1: незначна (0,1); низька (0,3); середня (0,5); висока (0,7); критична (0,9); абсолютна (1); значення 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 – відповідають проміжним значенням за кожною градацією.

За результатами експертного опитування для кожного $r_j \in R$ буде отримано вектор оцінок $M_j = \{m_i^{(j)} \mid i = \overline{1, n}\}$, де $m_i^{(j)} = \{m(\omega_1), m(\omega_2)\}$ – вектор ймовірнісних оцінок подій $r_j \in R$, отриманий на основі індивідуальних переваг експерта E_i . Значення $m(\omega_1)$ являє собою ймовірність реалізації ризику $r_j \in R$, що визначена на основі експертної оцінки; $m(\omega_2)$ – ймовірність нереалізації ризику, що розраховується як $m(\omega_2) = 1 - m(\omega_1)$.

Для отримання агрегованих оцінок пропонується використати нотацію математичної теорії свідочств [5, 8]. Агрегування ймовірностей реалізації ризикуотворюючих подій (рис. 2) здійснюється для кожної системи випадкових подій $r_j \in R$ за всіма експертними оцінками $m_{rez}^{(j)} = m_1^{(j)} \oplus m_1^{(j)} \oplus \dots \oplus m_n^{(j)}$ на основі операції комбінування експертних свідочств [5, 7, 8]. Для підвищення якості результатів комбінування при визначенні агрегованих оцінок, рекомендується визначати порядок комбінування експертних свідочств. Правила перерозподілу конфліктів дозволяють коректно обробляти неузгоджені експертні свідочства [8].

Таким чином для кожного ризикуотворюючого фактора $r_j \in R$ буде отримано вектор $m_{rez}^{(j)} = \{m(\omega_1), m(\omega_2)\}$. Наступним кроком є аналіз та розрахунок побудованого дерева ймовірності з отриманими оцінками ймовірності реалізації $m_{rez}^{(j)}(\omega_1) \in m_{rez}^{(j)}$ та нереалізації $m_{rez}^{(j)}(\omega_2) \in m_{rez}^{(j)}$ ризику $r_j \in R$.

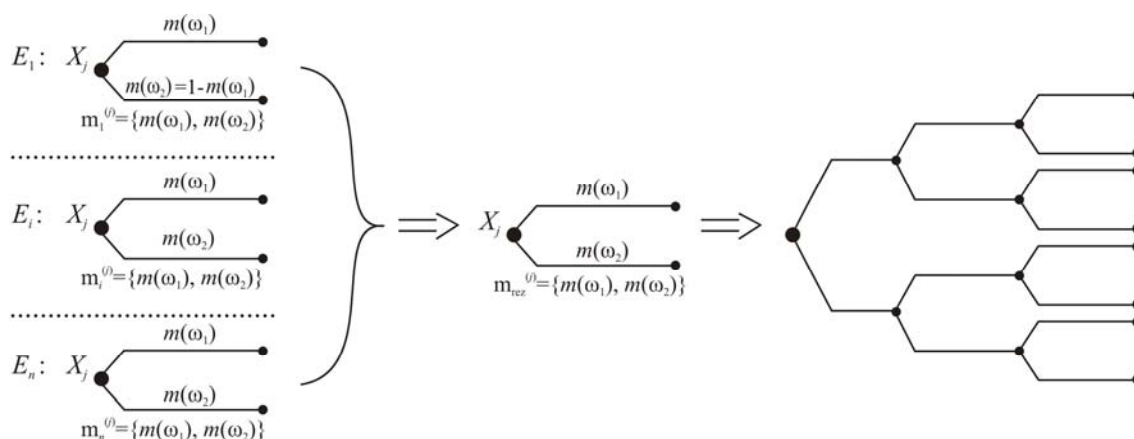


Рис. 2 Графічна інтерпретація процесу синтезу групових експертних оцінок при вирішенні задач ймовірнісного виведення на деревах ймовірності

Перетворення дерева, за умови незалежності випадкових подій, викликає новий перерозподіл оцінок ймовірності між подіями, що дає можливість проаналізувати і визначити ймовірність реалізації кожного із можливих сценаріїв, сформованих за рахунок різних комбінацій систем випадкових подій.

Висновки. Досліджено питання аналізу та управління ризиками ПС. Розглянуті сучасні методології та підходи до управління ризиками ПС. Досліджено можливість застосування методів сценарного аналізу для формування та оцінювання можливих сценаріїв впливу комплексу ризикуотворюючих подій на реалізацію проєктів ПС з метою вживання своєчасних проактивних заходів, спрямованих на мінімізацію можливих негативних наслідків. Розглянута методика агрегування індивідуальних експертних оцінок ймовірності реалізації ризикуотворюючої події. Запропонована техніка дозволяє оцінювати ймовірність настання ризикової події групою експертів, і на основі отриманої колективної оцінки здійснювати аналіз та управління ризиками, використовуючи ймовірнісні методи аналізу, наприклад, дерева ймовірностей.

References

1. Andon, F. I., Koval, H. Y., Korotun, T. M., Lavryshcheva, E. M., Suslov, V. Iu. (2007) Osnovy inzhenerii yakosti proqramnykh system [Fundamentals of software systems quality engineering]. Kyiv: Akademperiodyka.

2. Khan, M. & Mirza, A. & Saleem, Imran. (2020). Software Risk Analysis with the use of Classification Techniques: A Review. Engineering, Technology & Applied Science Research. 10. DOI: 5678-5682. 10.48084/etasr.3440
3. Kovalenko, I., Davydenko, Y., Shved, A. (2019) Development of the procedure for integrated application of scenario prediction methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(98), (pp. 31–38). DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163871
4. Pastor, J., Cámara, N., & Roy, R. (2005). Implementing and improving the SEI Risk Management method in a university software project. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 3, (pp. 90 – 97). Doi: 10.1109/TLA.2005.1468667
5. Rakowsky, Uwe. (2007). Fundamentals of the Dempster-Shafer theory and its applications to reliability modeling. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering – IJRQSE*, 14. DOI: 10.1142/S0218539307002817.
6. Shved, A. V. (2017) Probabilistic risk analysis of investment projects under uncertainty. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017): Proceedings of the 9th IEEE International Conference.* (Bucharest, Romania, 21–23 September. 2017), (pp. 179–182). DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095072
7. Shved, A. V. (2016) One approach to selection of the combination rules. *Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence (ISDMCI'2016): Proceedings of the 12th International conference.* (Kherson, 24–28 May. 2016), (pp. 162–164).
8. Smarandache, F. & Dezert, J. (2006) *Advances and applications of DSmt for Information Fusion*, vol. 2. Rehoboth: American Research Press. 461 p.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.31

Alyona Shved

APPLICATION OF SCENARIO MODELING METHODS IN SOFTWARE RISKS ANALYSIS

The theses explore the tasks of identification and analysis of software risks, consider modern methods and approaches of software risks analysis, and analyze software risk management methodologies. The possibility of applying models and scenario prediction and modeling methods to the analysis of software risks is explored. It is proposed to use tree-like graph models, in particular, probability trees, to construct and analyze scenarios for implementing possible combinations of risk-generating factors.

The method of determining the probability of a risk-causing event has been considered, provided that a priori estimates of the probability of an adverse event can be obtained simultaneously from several independent sources, for example, estimated by a group of experts. To obtain aggregated (generalized) estimates of a priori probabilities of the realization of risk-causing events, it is proposed to use the mathematical apparatus of evidence theory. To improve the quality of aggregation results, it is proposed to determine the order of aggregation, for example, based on similarity measures. As an expert evidence combination rule, it is proposed to use one of the conflict redistribution rules, this approach allows processing expert assessments under discord and uncertainty.

Key words: risk analysis, software, scenario analysis methods, expert judgments

Відомості про авторів / Information about the Authors

Альона Швед, д. техн. наук, професорка, професорка кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: avshved@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4372-7472>.

Alona Shved, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: avshved@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4372-7472>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.32

Віктор Шевченко,
Євген Дарнапук

ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ PACS-СИСТЕМИ ДЛЯ ОБМІНУ DICOM-ЗОБРАЖЕННЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ RASPBERRY PI 4

У тезах розглянуто проєктування розподіленої PACS-системи для обміну DICOM-зображеннями з використанням Raspberry Pi 4 як периферійного вузла. Запропонована архітектура передбачає приймання медичних даних, локальне кешування, безвтратне стискання та захищене передавання до центрального PACS-сервера Orthanc. Такий підхід дає змогу зменшити навантаження на сервер і мережу, підвищити гнучкість системи та створити доступний прототип для навчальних лабораторій і невеликих медичних установ. Окрему увагу приділено можливості подальшого експериментального тестування системи.

Ключові слова: DICOM, PACS, Raspberry Pi 4, Orthanc, медичні зображення, безвтратне стискання, REST API, TLS.

Сучасні медичні інформаційні системи значною мірою залежать від швидкого, надійного та безпечного обміну цифровими діагностичними зображеннями. Комп'ютерна томографія, магнітно-резонансна томографія, цифрова рентгенографія та інші методи візуалізації формують значні обсяги даних, які необхідно не лише зберігати, а й передавати між діагностичними пристроями, архівними серверами, робочими місцями лікарів та іншими елементами медичної інфраструктури. У таких умовах важливим є не просто накопичення медичних файлів, а побудова системи, здатної забезпечити їх упорядкований обмін, захист, пошук і подальше використання.

Базовим стандартом для подання та передавання медичних зображень є DICOM. Його особливість полягає в тому, що зображення зберігається не ізольовано, а разом із набором службових метаданих, які описують дослідження, параметри обладнання, серію знімків та іншу важливу інформацію. Завдяки цьому DICOM-зображення є частиною структурованого медичного інформаційного середовища, а не звичайним графічним файлом. Для практичного використання таких даних застосовуються PACS-системи, які виконують функції архівування, пошуку, маршрутизації, перегляду та передавання медичних зображень [1].

Традиційна централізована PACS-архітектура є поширеною та зрозумілою з організаційної точки зору, однак вона не завжди є оптимальною для невеликих медичних установ, навчальних лабораторій або віддалених діагностичних пунктів. У таких умовах розгортання повноцінної серверної інфраструктури може бути надмірно витратним, а передавання великих DICOM-серій без попередньої обробки створює додаткове навантаження на мережу й центральний сервер. Особливо це помітно під час роботи з томографічними серіями, де одне дослідження може складатися з десятків або сотень зображень [1; 3].

Розв'язання цієї проблеми доцільно шукати через використання розподіленої архітектури. Її зміст полягає не у відмові від центрального PACS-сервера, а в перенесенні частини операцій на периферійний рівень. У такій системі локальний вузол може приймати DICOM-файли, виконувати їх попередню обробку, тимчасове збереження, безвтратне стискання та передавання до центрального PACS-рівня. Завдяки цьому центральний сервер не бере на себе весь обсяг первинної обробки, а система стає гнучкішою та зручнішою для масштабування [7].

Метою роботи є проєктування розподіленої PACS-системи для обміну DICOM-зображеннями з використанням Raspberry Pi 4 як периферійного вузла, що забезпечує приймання, локальну обробку, безвтратне стискання та передавання медичних даних до центрального PACS-сервера Orthanc.

У межах запропонованого підходу Raspberry Pi 4 використовується як компактний периферійний вузол, який працює ближче до джерела DICOM-зображень. Такий вибір пояснюється поєднанням кількох чинників: невеликою вартістю, компактністю, помірним енергоспоживанням, наявністю мережевих інтерфейсів і достатньою продуктивністю для виконання базових задач локального оброблення даних. Raspberry Pi 4 не

розглядається як повна заміна серверного обладнання, але є доцільним рішенням для проміжного вузла, який бере на себе частину операцій перед передаванням зображень до центрального архіву [4].

Центральним елементом системи виступає PACS-сервер Orthanc. У запропонованій архітектурі він виконує функції приймання, зберігання, індексації та надання доступу до DICOM-зображень. Його використання є доцільним, оскільки Orthanc підтримує DICOM-сумісну логіку роботи, має вебінтерфейс і REST API, що спрощує інтеграцію з периферійними програмними модулями. У спрощеній апаратній конфігурації Orthanc може бути розгорнутий на ноутбучі або персональному комп'ютері, тоді як Raspberry Pi 4 виконує роль локального вузла оброблення та передавання [3; 7].

Загальна логіка роботи системи передбачає послідовне проходження DICOM-зображення через кілька етапів. Спочатку файл надходить на периферійний вузол Raspberry Pi 4. Далі виконується перевірка його структури, виділення піксельних даних, запуск модуля безвтрратного стиснення та підготовка результату до передавання. Після цього дані передаються до центрального PACS-сервера Orthanc через REST API у захищеному режимі. Сервер приймає об'єкт, архівує його й забезпечує доступ до дослідження через PACS-рівень (рис. 1).

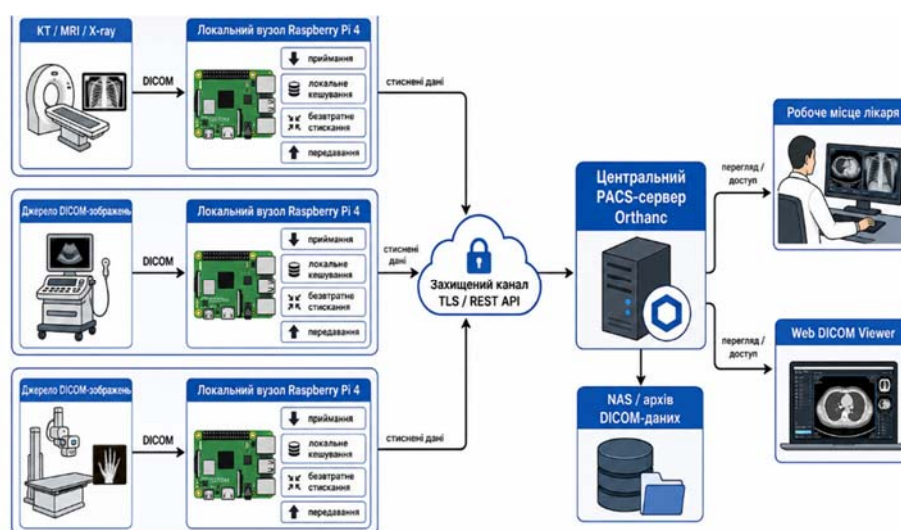


Рис. 1. Структурна схема розподіленої PACS-системи для обміну DICOM-зображеннями

Джерела DICOM-зображень передають дані на локальний вузол Raspberry Pi 4. Периферійний вузол виконує приймання файлів, локальне кешування, безвтратне стиснення та передавання результату до центрального PACS-сервера Orthanc. Обмін між вузлами здійснюється через захищений канал із використанням REST API та TLS. Після надходження на сервер зображення стають доступними для перегляду через робоче місце лікаря або DICOM-візуалізатор. Основні компоненти проектованої системи подано в табл. 1.

Таблиця 1.

Основні компоненти розподіленої PACS-системи		
Компонент	Призначення	Приклад реалізації
Периферійний вузол	Приймання, локальна обробка, стиснення та передавання DICOM-даних	Raspberry Pi 4
Центральний PACS-сервер	Архівування, індексація та доступ до медичних зображень	Orthanc
Серверна платформа	Розгортання центральної частини системи	Ноутбук або персональний комп'ютер
Програмний модуль обміну	Передавання даних між вузлами та взаємодія з PACS	REST API
Захищений канал	Захист даних під час передавання	TLS
Клієнтський рівень	Перегляд і доступ до DICOM-зображень	Web DICOM Viewer / робоче місце лікаря

Запропонована система не потребує складної багатокомпонентної інфраструктури. Її базова конфігурація складається з периферійного вузла Raspberry Pi 4, центрального сервера Orthanc і клієнтського засобу перегляду. Такий підхід відповідає умовам навчально-дослідного або експериментального стенду, де важливо не лише описати архітектуру, а й реально перевірити її працездатність на доступному обладнанні [4].

Окреме значення у системі має безвтратне стискання. Для медичних зображень використання втратних методів не завжди є допустимим, оскільки навіть незначні зміни в структурі зображення можуть вплинути на його подальше трактування. Через це у проєктованій системі доцільно використовувати такі алгоритми, які зменшують обсяг даних без зміни початкового вмісту. У межах роботи розглядається підхід СВРС / СВРС2, що базується на прогнозуванні значень пікселів, класифікації локального контексту та кодуванні похибки передбачення.

Використання СВРС2 на периферійному вузлі дозволяє виконувати попереднє зменшення обсягу DICOM-даних ще до їх передавання на центральний сервер. Це має практичне значення, оскільки зменшує обсяг мережевого трафіку й може прискорити обмін між локальним вузлом і PACS-сервером. При цьому зберігається головна вимога до медичних зображень – можливість точного відновлення початкового вмісту після оброблення.

Захист даних є ще однією важливою складовою проєктованої системи. DICOM-файли можуть містити службову інформацію, пов'язану з пацієнтом, дослідженням і параметрами діагностичного обладнання. Тому передавання таких даних між Raspberry Pi 4 та центральним сервером повинно відбуватися із застосуванням механізмів автентифікації, контролю доступу та захищеного каналу зв'язку. У запропонованій архітектурі для цього передбачено використання TLS та обмеження доступу до API. Це дозволяє зменшити ризик перехоплення або несанкціонованої зміни даних під час обміну.

Проєктування системи також передбачає врахування обмежень апаратної платформи. Raspberry Pi 4 має менші ресурси, ніж повноцінний сервер, тому на нього не доцільно переносити всі функції PACS-середовища. Його роль полягає в іншому: прийняти DICOM-файл, виконати необхідну локальну підготовку, застосувати стискання та передати результат до центрального рівня. Такий розподіл функцій є більш раціональним, оскільки кожен компонент виконує ті задачі, для яких він найбільш придатний.

Практична цінність запропонованого рішення полягає в можливості створення доступного прототипу системи обміну DICOM-зображеннями. Такий прототип може бути використаний у навчальній лабораторії, невеликому медичному закладі або тестовому середовищі для перевірки принципів роботи розподіленої PACS-архітектури. Його перевагою є те, що для побудови системи не потрібно одразу розгортати дорогу серверну інфраструктуру. Достатньо використати Raspberry Pi 4 як периферійний вузол, комп'ютер із встановленим Orthanc як центральний сервер та набір тестових DICOM-зображень [5].

Подальша експериментальна перевірка такої системи може здійснюватися за кількома показниками: час локального оброблення DICOM-файлу, коефіцієнт стискання, час передавання до PACS-сервера, стабільність роботи Raspberry Pi 4 та коректність відновлення медичного зображення після обробки. Для тестування доцільно використовувати зображення різних типів, зокрема CT, MRI та X-ray, оскільки вони відрізняються роздільною здатністю, кількістю зрізів, рівнем деталізації та обсягом даних.

Запропонована архітектура не суперечить класичній логіці PACS-систем, а доповнює її периферійним рівнем. Центральний сервер Orthanc залишається основним елементом архівування та доступу, тоді як Raspberry Pi 4 виконує допоміжні операції до моменту передавання даних у центральне сховище. Такий підхід дозволяє поєднати переваги централізованого зберігання з гнучкістю локальної обробки [3; 4].

Отже, проєктування розподіленої PACS-системи з використанням Raspberry Pi 4 є доцільним напрямом для підвищення ефективності обміну DICOM-зображеннями в умовах обмежених апаратних ресурсів. Запропонована структура дозволяє організувати приймання, локальне оброблення, безвтратне стискання та захищене передавання медичних зображень до центрального PACS-сервера. Надалі така система може бути розширена шляхом додавання нових периферійних вузлів, оптимізації алгоритму стискання та проведення порівняльного аналізу продуктивності на різних апаратних платформах.

Висновки. У роботі розглянуто підхід до проєктування розподіленої PACS-системи для обміну DICOM-зображеннями з використанням Raspberry Pi 4. Запропонована архітектура передбачає використання периферійного вузла для приймання, локального кешування, безвтратного стискання та передавання медичних даних до центрального PACS-сервера Orthanc. Такий підхід дає змогу зменшити навантаження на центральний сервер, раціональніше використовувати мережеві ресурси та створити доступний прототип системи для роботи з DICOM-зображеннями. Подальший розвиток роботи доцільно спрямувати на програмну реалізацію всіх модулів, експериментальне тестування стискання та оцінювання швидкодії системи під час передавання різних типів медичних зображень.

References

1. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). Standard PS3.1–PS3.20. National Electrical Manufacturers Association. URL: <https://www.dicomstandard.org/> (дата звернення: 10.05.2026).
2. Orthanc Team. Orthanc: Lightweight, RESTful DICOM Server. URL: <https://www.orthanc-server.com/> (дата звернення: 10.05.2026).
3. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 4 Model B Technical Specifications. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (дата звернення: 10.05.2026).
4. HL7 International. HL7 FHIR Release 5. URL: <https://www.hl7.org/fhir/> (дата звернення: 10.05.2026).
5. OFFIS. DCMTK – DICOM Toolkit. URL: <https://dicom.offis.de/dcmk.php.en> (дата звернення: 10.05.2026).
6. Weinberger M. J., Seroussi G., Sapiro G. The LOCO-I Lossless Image Compression Algorithm: Principles and Standardization into JPEG-LS. IEEE Transactions on Image Processing. 2000. Vol. 9, No. 8. P. 1309–1324.
7. Kang D., Kim H. A Distributed DICOM Image Exchange System with Lossless Compression Using Single-Board Computers. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 10. Article 6075. DOI: 10.3390/app13106075.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.32

Viktor Shevchenko,
Yevhen Darnapuk

DESIGN OF A DISTRIBUTED PACS SYSTEM FOR DICOM IMAGE EXCHANGE USING RASPBERRY PI 4

The theses consider the design of a distributed PACS system for DICOM image exchange using Raspberry Pi 4 as a peripheral processing node. The proposed architecture includes receiving medical data, local caching, lossless compression, and secure transmission to the central Orthanc PACS server. This approach helps reduce the load on the server and network, increase system flexibility, and create an affordable prototype for educational laboratories and small medical institutions. Special attention is paid to the possibility of further experimental testing of the system.

Key words: DICOM, PACS, Raspberry Pi 4, Orthanc, medical images, lossless compression, REST API, TLS.

Відомості про автора / Information about the Author

Віктор Шевченко, студент 4 курсу кафедри комп'ютерної інженерії Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: pouhtlh@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-7571-8822>.

Viktor Shevchenko, 4th year student of the Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: pouhtlh@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-7571-8822>.

Євген Дарнапук, PhD, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

Yevhen Darnapuk, PhD, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yevhen.darnapuk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5344>.

© В. Шевченко, Є. Дарнапук

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.33

Олег Щесюк,
Аркадій Драмарецький,
Вячеслав Андреев

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОМПЛЕКСОМ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ І СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

У сучасних умовах енергетика швидко змінюється, і все більше об'єктів намагаються поєднувати різні джерела живлення, щоб не залежати від однієї системи. На практиці доволі часто використовують гібридні рішення, де сонячна електростанція працює разом із дизель-генератором. Сонячна енергія сама по собі є дешевою та екологічною, але її робота сильно залежить від погоди – у похмурі чи зимові дні генерація помітно падає. Через це доводиться підстраховуватися дизель-генератором, який може забезпечити потрібну потужність у будь-який момент часу. Матеріали тез надають інформацію щодо авторської розробки керування комбінованими (гібридними) системами енергозабезпечення з метою підвищення їх надійності та ефективності. Система керування комплексом базується на стабілізації напруги і частоти струму в мережі за рахунок постійного контролю рівня сонячної генерації та стану навантаження дизель-генератора. На практиці це реалізується за допомогою програмованого логічного контролера, розгалуженої системи датчиків та SCADA-систем. Зв'язок здійснюється через Profinet, Modbus TCP або OPC UA, що дозволяє поєднувати обладнання різних виробників і передавати дані на SCADA-систему.

Ключові слова: програмований логічний контролер, дизель-генераторна установка, сонячна електростанція, автономна система керування, лінії електронепередачі, Totally Integrated Automation Portal (Trial version).

Сучасні системи електропостачання все частіше базуються на використанні комбінованих джерел енергії, що підвищує їхню ефективність та надійність. Особливою популярністю користуються гібридні енергетичні системи, які поєднують традиційні джерела енергії, зокрема дизельні генератори, з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні електростанції [1].

Дизель-генераторна установка (ДГУ) використовується як резервне або автономне джерело живлення, яке може виручити в моменти, коли сонячна електростанція не виробляє достатньо енергії або коли зовнішня мережа взагалі недоступна. У гібридних системах вона фактично виконує роль «підстрахування», компенсуючи різкі зміни навантаження і забезпечуючи стабільну роботу всього обладнання. За своєю будовою ДГУ складається з кількох основних вузлів, які працюють разом: двигун, генератор, системи охолодження та подачі палива [2].

Сонячна електростанція (СЕС) у гібридному комплексі виконує роль основного відновлюваного джерела енергії, оскільки виробляє електрику завдяки фотоелектричному ефекту. Використання СЕС дозволяє суттєво зменшити витрати на паливо, підвищити енергонезалежність системи та зменшити навантаження на дизель-генератор, який працює вже як підстрахування. Зазвичай типова сонячна станція складається з фотоелектричних панелей, інвертора, а також контролера заряду, якщо в системі є акумуляторні батареї. Для контролю роботи СЕС застосовуються вимірювальні модулі, що відстежують напругу, струм, температуру та інші параметри, необхідні для нормальної роботи станції та її ефективного налаштування [3].

У гібридній системі ці два джерела взаємодіють між собою таким чином, щоб забезпечити безперервне живлення споживачів при мінімальних витратах ресурсів. У денний час при достатній інтенсивності сонячного випромінювання основне навантаження покривається за рахунок сонячних панелей. Надлишкова енергія може накопичуватись в акумуляторній батареї. У випадку зниження генерації або зростання навантаження автоматично підключається дизель-генератор.

На рис. 1 представлена функціональна схема гібридної енергетичної системи з використанням дизель-генераторної установки та сонячних панелей.

До складу гібридної системи входять сонячні панелі, дизель-генераторна установка, контролер заряду, інвертор, зарядний пристрій, акумуляторна батарея та навантаження. Крім того, важливим елементом є система керування, яка забезпечує координацію роботи всіх компонентів.

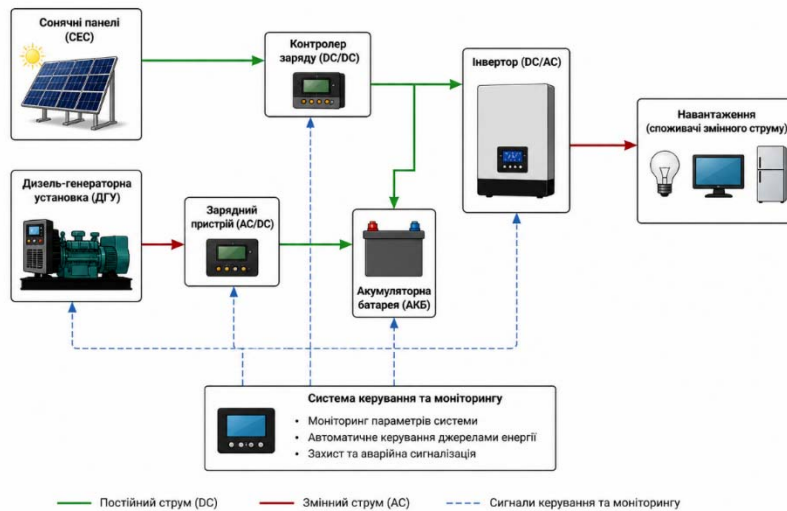


Рис. 1. Функціональна схема гібридної енергетичної системи з автоматизованим керуванням
Джерело сформовано авторами на основі [6]

Сонячні панелі генерують електричну енергію постійного струму, яка подається до контролера заряду. Контролер заряду забезпечує стабілізацію напруги та струму, а також регулює процес заряджання акумуляторної батареї. Частина енергії може безпосередньо використовуватись для живлення навантаження постійного струму.

Дизель-генераторна установка виробляє електричну енергію змінного струму, яка може подаватись на навантаження або використовуватись для заряджання акумуляторної батареї через зарядний пристрій. У разі недостатньої генерації сонячної електростанції або при підвищенні навантаження генератор автоматично підключається до системи.

Акумуляторна батарея виконує функцію накопичення електричної енергії та забезпечує живлення споживачів у періоди відсутності генерації або при змінному навантаженні. Інвертор здійснює перетворення електроенергії постійного струму в змінний для живлення споживачів змінного струму.

Система керування здійснює моніторинг параметрів роботи системи, таких як напруга, струм, потужність та рівень заряду акумуляторної батареї. На основі отриманих даних вона формує керуючі сигнали для ввімкнення або вимкнення дизель-генератора, регулювання режимів роботи інвертора та оптимального розподілу навантаження між джерелами енергії.

Гібридна енергетична система, що поєднує сонячну електростанцію та дизель-генераторну установку, може працювати в декількох режимах залежно від умов генерації електроенергії та рівня навантаження:

1. Основним режимом роботи системи є режим живлення від сонячної електростанції. У цьому випадку сонячні панелі генерують електричну енергію, яка через контролер заряду подається до акумуляторної батареї та інвертора. Інвертор перетворює постійний струм у змінний і забезпечує живлення споживачів. При достатньому рівні сонячного випромінювання система може повністю забезпечувати навантаження без використання дизель-генератора.

2. Другим режимом є робота від акумуляторної батареї. Такий режим реалізується у випадках, коли генерація сонячної електростанції відсутня або недостатня, наприклад у нічний час. У цьому випадку накопичена в акумуляторах енергія використовується для живлення споживачів через інвертор. Даний режим дозволяє забезпечити безперервне електропостачання без запуску дизель-генератора, що зменшує витрати палива.

3. Третім режимом є робота від дизель-генераторної установки. Він активується у випадках, коли рівень заряду акумуляторної батареї знижується до критичного значення або коли потужність навантаження перевищує можливості сонячної електростанції та акумуляторів. У цьому режимі дизель-генератор забезпечує живлення споживачів, а також може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї.

4. Четвертим режимом є комбінований режим роботи. У цьому випадку сонячна електростанція та дизель-генератор працюють одночасно, забезпечуючи живлення споживачів. Такий режим використовується при значному навантаженні або нестабільній генерації сонячної енергії. При цьому система керування забезпечує оптимальний розподіл потужності між джерелами.

Крім того, у гібридній системі можливий режим заряджання акумуляторної батареї, коли надлишкова енергія від сонячної електростанції або дизель-генератора використовується для накопичення в акумуляторах. Це дозволяє підвищити ефективність використання енергії та забезпечити резерв для подальшого використання.

Основою будь-якої сонячної електростанції є фотоелектричні модулі (PV-модулі), які перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію постійного струму. Залежно від технології виготовлення модулі можуть бути монокристалічними, полікристалічними або тонкоплівковими. Найчастіше застосовують саме монокристалічні модулі, оскільки вони мають вищий ККД (приблизно 18–22%) і краще тримають стабільні характеристики. Полікристалічні модулі трохи поступаються за ефективністю (15–18%), однак їх перевагою є нижча ціна. Основні параметри PV-модулів зазвичай включають їхню номінальну потужність (приблизно 250–550 Вт), напругу холостого ходу, струм короткого замикання та температуру, при якій модуль працює найбільш ефективно. Важливо враховувати й температурний коефіцієнт – при підвищенні температури ефективність модуля зменшується, і це реально відчувається в спекотні дні.

Другим ключовим елементом СЕС є інвертор, який перетворює постійний струм від сонячних панелей у змінний, придатний для споживачів або для подачі в мережу. У гібридних системах можуть використовуватись як звичайні мережеві, так і гібридні інвертори. Мережевий інвертор працює синхронно із зовнішньою мережею чи дизель-генератором, підтримуючи потрібні значення напруги та частоти. Гібридний інвертор є більш універсальним: він може керувати акумуляторними батареями, перемикається між різними джерелами живлення та вирівнювати енергопотоки в системі [4]. До основних характеристик інверторів належать їхня номінальна потужність, допустимий діапазон вхідних напруг від PV-масиву, ККД перетворення (зазвичай 95–98%) і можливість автоматичного регулювання навантаження.

У тих системах, де використовуються акумуляторні батареї, додатково встановлюється MPPT-контролер. Його основна функція – знаходити так звану “точку максимальної потужності” сонячного модуля (Maximum Power Point Tracking), щоб отримувати найбільшу генерацію навіть тоді, коли освітленість постійно змінюється. Окрім цього, контролер управляє зарядом і розрядом акумуляторів, не допускаючи перенавантажень, глибоких розрядів і перезаряду. До найважливіших параметрів MPPT-контролера належать максимальний струм заряду, діапазон робочих напруг та алгоритм, за яким він визначає оптимальну точку роботи [5].

Щоб система працювала точно й стабільно, в ній використовують різні вимірювальні модулі. Вони фіксують напругу, струм та температуру PV-панелей, параметри інвертора, стан акумуляторів і фактичну потужність споживачів. Передача даних зазвичай здійснюється через інтерфейси Modbus, RS-485 або CAN, після чого інформація надходить до програмованого логічного контролера (ПЛК) чи SCADA-системи. Наявність точних вимірювання дає змогу контролювати баланс енергії, правильно розподіляти навантаження та ефективніше керувати роботою дизель-генератора у складі гібридної системи.

Обладнання автоматики відіграє дуже важливу роль у роботі гібридного енергетичного комплексу, де поєднуються дизель-генератор і сонячна електростанція. Саме завдяки автоматизації система може стабільно працювати, швидко реагувати на зміни навантаження та забезпечувати безпечну експлуатацію всього обладнання. Засоби керування збирають дані, аналізують параметри, виконують алгоритми запуску, перемикання джерел і контролю енергопотоків. До основних елементів такої системи належать програмований логічний контролер, модулі вводу-виводу, датчики технологічних параметрів, виконавчі пристрої та мережеве обладнання.

Центральним елементом всієї системи є саме ПЛК, який виконує всі алгоритми керування. У цьому проєкті доцільно застосувати контролер Siemens S7-1200, оскільки він компактний, надійний і добре підходить для таких завдань. Його можна програмувати в середовищі TIA Portal, він підтримує модульне розширення й має вбудовані цифрові та аналогові входи і виходи. Крім того, S7-1200 працює з протоколами Profinet і OPC UA, що спрощує обмін даними з інвертором та SCADA-системою. Контролер керує запуском і зупинкою ДГУ, контролює роботу СЕС, обробляє сигнали від датчиків, подає команди виконавчим механізмам і передає дані оператору.

Щоб ПЛК мав можливість підключатися до всього обладнання, використовують модулі вводу-виводу. Цифрові входи приймають дискретні сигнали – наприклад, стан аварійної кнопки, сигнали від реле тиску чи повідомлення про готовність ДГУ [6]. Цифрові виходи використовують для керування реле, контакторами та іншими силовими пристроями. Аналогові входи дозволяють вимірювати параметри у форматі 4–20 мА або 0–10 В, такі як напруга, струм або температура. Аналогові виходи застосовуються тоді, коли потрібно передати керуючий сигнал до перетворювача або регулятора.

Не менш важливими є датчики – саме вони «підказують» контролеру реальний стан системи. Для вимірювання електричних параметрів використовують датчики струму (трансформатори або шунти), датчики напруги та частоти. Датчик рівня палива в баку ДГУ дозволяє бачити, коли потрібно дозаправляти установку. Температурні датчики, такі як PT100 або термопари, вимірюють температуру двигуна, вихлопних газів чи навколишнього середовища. Усі ці дані надходять у ПЛК та використовуються для керування і для формування аварійних повідомлень.

Виконавчі механізми забезпечують фізичне виконання команд контролера. Контактори та реле перемикають джерела живлення, підключають або відключають ДГУ від загальної шини. Інші реле керують стартером двигуна, підігрівом, паливним насосом та аварійними вимикачами. Зазвичай між ПЛК і силовими елементами встановлюють проміжні реле, щоб підвищити безпеку та захистити електроніку від перевантажень.

Для того щоб усі частини системи могли обмінюватися даними, використовується мережеве обладнання – промислові комутатори, маршрутизатори, Ethernet-модулі та пристрої захисту мережі. Зв'язок здійснюється через Profinet, Modbus TCP або OPC UA, що дозволяє поєднувати обладнання різних виробників і передавати дані на SCADA-систему.

References

1. Bondarenko H. O. (2020) Avtomatyzatsiya enerhetychnykh system [Automation of energy systems]: textbook. Kyiv: Lira-K. (368 p.) [in Ukrainian].
2. Horobets' S. V., Shevchenko V. A. (2018) Dyzel'-heneratorni ustanovky: pryntsyipy roboty, proyektuvannya ta ekspluatatsiya [Diesel generator sets: principles of operation, design and operation]. Kharkiv : TOV «Technika». (256 p.) [in Ukrainian].
3. Ministerstvo enerhetyky Ukrayiny. (2022) Normatyvy ta vymohy do paralel'noyi roboty dyzel'-heneratoriv z merezheyu [Standards and requirements for parallel operation of diesel generators with the network] Kyiv. (48 p.) [in Ukrainian].
4. Invertor Growatt SPF 5000 ES. (2023) [Growatt SPF 5000 ES inverter] (78 p.) URL: <https://altpower.com.ua/product/avtonomnyy-soniachnyy-invertor-growatt-spf-5000-es-wi-fi/> [in Ukrainian] (access date: 05.02.2026).
5. Victron MultiPlus-II Datasheet. (2024) URL: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-MultiPlus-II-inverter-charger-EN.pdf> (access date: 02.02.2026).
2. Hibrydna enerhetychna systema. (2025) [Hybrid energy system] (23 p.) URL: <https://ukrstp.com/servises/electro-solution/vnutrishnye-elektropostachannya/> [in Ukrainian] (access date: 27.11.2025).

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.33

**Oleg Shchesiuk,
Arkadiy Dramaretskiy,
Viacheslav Andrieiev**

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A DIESEL GENERATOR SET AND SOLAR POWER PLANT

In today's environment, the energy sector is changing rapidly, and more facilities are seeking to combine different power sources to avoid relying on a single system. In practice, hybrid solutions—where a solar power plant operates alongside a diesel generator—are quite common. Solar energy is inherently cheap and environmentally friendly, but its output is highly dependent on the weather—on cloudy or winter days, generation drops significantly. Because of this, a diesel generator is needed as a backup, capable of providing the required power at any given moment. The abstract provides information on the author's development of a control system for combined (hybrid) power supply systems aimed at improving their reliability and efficiency. The control system is based on stabilizing the voltage and frequency of the grid by continuously monitoring the level of solar generation and the load status of the diesel generator. In practice, this is implemented using a programmable logic controller, an extensive sensor network, and SCADA systems. Communication is carried out via Profinet, Modbus TCP or OPC UA, which allows you to combine equipment from different manufacturers and transfer data to the SCADA system.

Keywords: *programmable logic controller, diesel generator set, solar power plant, autonomous control system, power transmission lines, Totally Integrated Automation Portal (Trial version).*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олег Щесюк, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри АКІТ, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: taifun.kv@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1467-3751>.

Oleg Shchesiuk, PhD, Associate Professor of Automation and Computer-Integrated Technologies Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, E-mail: taifun.kv@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1467-3751>.

Аркадій Драмарецький, студент 4 курсу спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: zerga04@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-7971-4331>

Arkadiy Dramaretskiy, 4th year student of the specialty "Automation and Computer-Integrated Technologies" of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: zerga04@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-7971-4331>

Вячеслав Андреев, канд. техн. наук, доцент, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: avi@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1143-8043>.

Viacheslav Andrieiev, PhD, Associate Professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, E-mail: avi@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1143-8043>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.34

Yaroslav Krainyk

HLS IMPLEMENTATION OF THE QOI COMPRESSION FOR FPGA

The work presents the analysis of the results of implementation of the Quite OK Image (QOI) compression algorithm for the FPGA (Field-Programmable Gate Array) platform using the means of the promising technique of High-Level Synthesis (HLS). It demonstrates that the HLS is a feasible option for the implementation of the hardware logic in case of the compression algorithms, specifically, for the selected Quite OK Image (QOI) compression algorithm. The work examines the results of the usage of the Vivado HLS to implement corresponding digital design by the means of this tool. It has been proven that usage of these resources is feasible and can ensure correct implementation.

Keywords: High-Level Synthesis, Field-Programmable Gate Array, QOI, image compression.

Among the emerging techniques for the implementation of the hardware design on the Field-Programmable Gate Arrays (FPGA), High-Level Synthesis (HLS) has a specific place as it allows the developer to bridge the software and hardware implementation. Another its known advantage is that it strongly facilitates an early testing and verification of the design while having the software-only realization of the design idea. The technology has been notably incorporated by the leading vendors of the FPGA to ensure such means are provided to developers and multiple successful cases of applications have been reported in the research and practical designs. While being hugely beneficial in the multiple aspects of the development, the HLS also has multiple limitations which have to be taken into account to obtain the efficient usage of the resources. This work focuses its vision on the possibility of the use of HLS to implement the Quite OK Image (QOI) compression algorithm.

The main idea of the HLS technology is to establish tools for implementation of the hardware design using conventional programming languages like C, C++, Python, etc. The conventional language design is taken as a starting point to be passed to the HLS tools to obtain the Register-Transfer Level (RTL) description which can be further utilized in for the synthesis and implementation of the digital system. Such tools has been included as a part of the conventional toolchain by the vendors, e.g. by AMD/Xilinx in the Vivado/Vitis HLS software. The counterpart can also be observed among software products by Altera. From the developer's point of view, this introduced a dedicated development environment alongside with the specific HLS libraries which can be converted to the RTL as a result of the compilation process. The entity which is to be compiled is basically the C-language function marked with the specific attributes/pragmas. The library establishes a huge collection of types and functions which are optimized to be used for the efficient RTL design.

The compression algorithms are among the typical use cases for the FPGA implementation [2, 3] since they suppose notable parallelism and allow coarse and fine decomposition of the processing elements. In short, they can be properly mapped on the FPGA basic elements and establish huge performance due to the peculiarities of the hardware platform. Even the entry-level devices are capable of containing such designs and, hence, can be used for the purpose of the frugal usage of the communication channel, optimization of the energy consumption, etc. Such algorithms as JPEG, PNG, Huffman algorithm obtained a huge attention in the field of the FPGA implementation and are well investigated in terms of their optimization for the hardware design.

The QOI compression algorithm was proposed as a low complexity apparatus which includes several operations that can be easily implemented in the hardware. The peculiarity of the algorithm is that it tries to simplify the whole processing pipeline by including only simple and efficient operations in the flow. The payback [1] for this is that, in general, it demonstrates weaker compression results in comparison with JPEG, however, it is still usable in case where the tradeoff between the complexity of the algorithm and compression ratio is important and custom solutions are applicable.

The particular interest of this work is in the implementation of the QOI compression using the HLS utilities. For the purpose, Vitis HLS 2024.2 will be exploited as an environment for the development. This is the part of the AMD/Xilinx infrastructure for the FPGA which is highly utilized in the implementation in all the realms of the integration including radio-frequency processing, heavy-loaded Digital-Signal Processing systems, System-on-Chip environments, etc.

Overview of the QOI operations. In its core, as followed from the naming, the QOI algorithm is supposed to rely on the simple computational operations which are to be applied in both software and hardware. In general, QOI can be summarized by the following 3 elementary operations:

1. Run of the same pixel (similar to the principle of the Run-Length Encoding, RLE).
2. Reference to the previously occurred pixel within the window (has some resemblance to the Lempel-Ziw algorithm and its modifications).
3. Differential encoding in terms of the neighbour pixel.

There is also an operation which is designed to store the original value of the pixel if none of the three previous operations is applicable. It is observed that there is a loss in compression ratio when such situation occurs. Otherwise, it is possible to obtain some gain in the compression ratio with the statistics being ordered from the first to the third. Specific structures are described for the storage of the data according to the QOI format which can be found in the origin source [1]. The overall image has the general preamble from which the service information about image size can be extracted. It follows by the sequence of the structures which describe the encoding actions applied.

While utilizing such reduced processing pipeline, it has been proved that QOI is a conceivable solution for data compression and can be effectively used in the embedded systems and other appliances which are oriented on the balanced tradeoff between the computation power required for encoding/decoding and the compression ratio ensured.

Hardware implementation of the QOI. The list of compression operations of the QOI algorithm makes it a suitable candidate for the hardware implementation and specifically, for the FPGA usage. Hereinafter, it is assumed that the input data is supplied to the implemented module using the parallel interface which represents the pixel value in the ARGB format. Thus, the input data can be encoded and decoded in the streaming mode pixel-by-pixel with relatively low latency. This fact also facilitates reduced number of storage elements on the path.

Declaring the use of the HLS, the C programming language was selected for the Vitis HLS project implementation. The selected input and output interfaces are set to be of Advanced eXtensible Interface (AXI) in streaming mode with the corresponding set of supportive signals. Apparently, while the input stream may be an uninterruptable data flow, the output may be non-continuously valid. The internal operations are to be described using the appropriate C function.

As a result of application of the synthesis procedure to the prepared code, the following function call was organized.

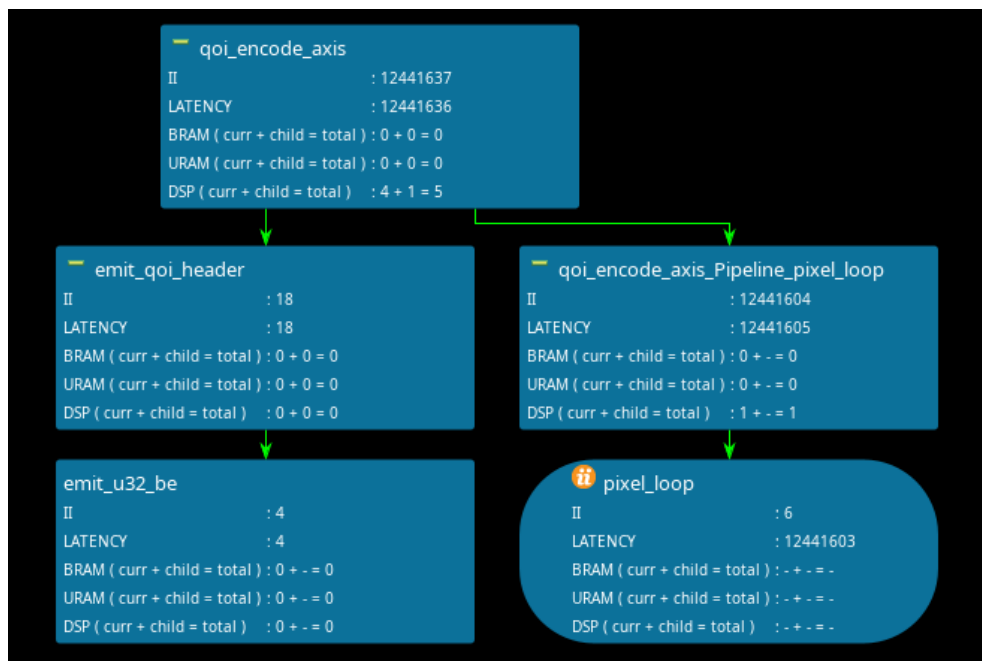


Fig. 1. Function call graph for the HLS implementation

In this specific case, the module is configured to be able to process the image that corresponds to the FullHD resolution with the parameters of width and height equal to 1920*1080 pixels of the RGB values. The huge latency is reported not for a single pixel but for a full frame which makes the value conceivable in this scenario.

As for the resource utilization, the following values are observed for the main hardware components.

Table 1.

Resource utilization for the synthesized design	
Resource name	Utilization in FPGA
Digital-Signal Processing cells	5
Flip-Flops	2742
LUT	5150

The design target was set to be the Xilinx Artix device with the part name of xc7a200t-fbg676-2.

Conclusions. To sum up the outcomes of the investigation performed, it is possible to state that the HLS is a feasible alternative for the implementation of the hardware of the QOI compression algorithm. It allows the developer to leverage the knowledge of the conventional programming language such as C++ and to translate it into the complete implementation on the level of the RTL and, then, to use this part in the synthesis and implementation stages of the FPGA firmware.

References

1. Krainyk, Y., & Dotsenko, D. (2024). METHOD OF IMAGE COMPRESSION USING IMAGE PREPROCESSING, AND HUFFMAN AND QUOTE OK IMAGE ALGORITHMS. *Electronic Modeling*, 46 (2), (pp. 75–87). <https://doi.org/10.15407/emodel.46.02.075>.
2. Krainyk, Y. (2022) Combined run-length and Huffman encoding for image compression. Preprint. Petro Mohyla Black Sea National University.
3. Xu, T., Yao, T., Li, N., Li, J., Min, X., Xiao, H. (2024). A high-throughput flexible lossless compression and decompression architecture for color images. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 53(6).

DOI 10.34132/mspc2026.02.06.34

Ярослав Крайник

HLS РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ СТИСНЕННЯ QOI ДЛЯ FPGA

Робота присвячена аналізу результатів реалізації алгоритму стиснення Quote OK Image (QOI) для мікросхем FPGA (Field-Programmable Gate Array) за допомогою засобів технології високорівневого синтезу High-Level Synthesis (HLS). Показано, що HLS є можливою альтернативою для реалізації апаратної логіки у випадку алгоритмів стиснення, зокрема, для обраного алгоритму стиснення QOI. У роботі проводиться дослідження результатів використання Vivado HLS для реалізації відповідного цифрового дизайну за допомогою цього засобу. Продемонстровано, що використання цих засобів є виправданим та може забезпечити коректність реалізації.

Ключові слова: High-Level Synthesis, Field-Programmable Gate Array, QOI, стиснення зображень.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Ярослав Крайник, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yaroslav.krainyk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7924-3878>.

Yaroslav Krainyk, Associate Professor of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yaroslav.krainyk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7924-3878>.

Наукове видання

**МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЙ
ЧОРНОМОРСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ**

**MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
OF PETRO MOHYLA BLACK SEA NATIONAL UNIVERSITY**

**Матеріали XXIII Міжнародної наукової конференції
«ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ – 2026: стратегії країн
Причорноморського регіону в геополітичному просторі»**

№ 2 (1), 6 серія, 2026

СЕРІЇ: ДИЗАЙН, КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Адреса оргкомітету:

м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10, 54003
Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, 8 (0512) 76–55–99, факс: 50–00–69, 50–03–33,
E-mail: avi@chmnu.edu.ua, rector@chmnu.edu.ua

Редактор: *К. Карпова.*

Комп'ютерна верстка, дизайн: *В. Шевченко.*

Друк: *С. Волинець.*

Фальцювально-палітурні роботи: *О. Мішалкіна.*

Підп. до друку 23.06.2026.

Формат 60x84¹/₈. Папір офсет.

Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.

Ум. друк. арк. 18,14. Обл.-вид. арк. 11,89. Зам. № 7273.

Видавець і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.

54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.

Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, e-mail: rector@chmnu.edu.ua.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2018.