

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

Всеукраїнський науково-технічний журнал

**№ 2(55)
2025**

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬК
2025**

ISSN (print) 1993-9981
ISSN (online) 2415-3575

Засновники:

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ)

Рік заснування: 1997

Періодичність випуску: двічі на рік

Ідентифікатор медіа: R30-01431

(Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1154, протокол № 24 від 26 жовтня 2023 року)

Журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України

Галузь науки: технічні.

Спеціальності: 113 – Прикладна математика; 151(174) – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 152(175) – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(Наказ Міністерства освіти і науки України № 1643 від 28 грудня 2019 року)

**Журнал представлено в таких міжнародних наукометричних базах даних,
репозитаріях та пошукових системах:**

Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського, Українська наукова періодика,
Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Crossref, Google Scholar, Scientific Indexing Services (SIS)

Адреса редакції:

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
e-mail: redntv@nung.edu.ua, mpky@nung.edu.ua
<https://mpky.nung.edu.ua>

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
IVANO-FRANKIVSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF OIL AND GAS

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

All-Ukrainian Scientific and Technical Journal

**№ 2(55)
2025**

**IVANO-FRANKIVSK
2025**

ISSN (print) 1993-9981
ISSN (online) 2415-3575

Founder:

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUOG)

Year of foundation: 1997

Frequency: semi-annual

Media identifier: R30-01431

(Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine
No. 1154, Decision No. 24 of October 26, 2023)

**The journal is included in category “B” of the
List of scientific professional publications of Ukraine**

Branche of science: technical.

Specialties: 113 – Applied Mathematics; 151(174) – Automation and Computer-Integrated
Technologies; 152(175) – Metrology and Measuring Equipment

(Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1643 dated December 28, 2019)

**The journal is presented in the following international scientometric databases,
repositories and scientific systems:**

V. I. Vernadsky National Library of Ukraine, Ukrainian scientific periodicals,
Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Crossref, Google Scholar, Scientific Indexing Services (SIS)

Editors office address:

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
e-mail: redntv@nung.edu.ua, mpky@nung.edu.ua
<https://mpky.nung.edu.ua>

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Андрій Топалов

кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

НАЦІОНАЛЬНІ ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ

Андрій Бандура

доктор фізико-математичних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

Михайло Горбійчук

доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

Володимир Грига

кандидат технічних наук, доцент, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна;

Роман Джала

д-р технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна;

Мар'ян Дмитришин

доктор фізико-математичних наук, професор, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна;

Володимир Древецький

доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна;

Дмитро Дьомін

доктор технічних наук, професор, ПП «Технологічний центр», м. Харків, Україна;

Ірина Журавська

доктор технічних наук, професор, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна;

Леонід Заміховський

доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

Олексій Козлов

доктор технічних наук, професор, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна;

Юрій Кучірка

кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

Петро Лежнюк

кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна;

Валерій Лопатін

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут геотехнічної механіки ім. М.В. Полякова НАН України, м. Дніпро, Україна;

Степан Мельничук

доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;

Олег Никифорчин

доктор фізико-математичних наук, доцент, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна;

Сергій Осадчий

доктор технічних наук, професор, Центрально-український національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна;

Сергій Осієвський	кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна;
Надія Пасєка	кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Ігор Рибіцький	доктор технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Ганна Рудакова	доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна;
Орест Середюк	доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Олександр Ситник	доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна;
Сергій Смеляков	доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна;
Ліана Смолович	кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Юрій Стрілецький	доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Григорій Сучков	доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;
Валентин Учанин	доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна;
Петро Філевич	доктор фізико-математичних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна;
Василь Шекета	доктор технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна;
Василь Яцук	доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

МІЖНАРОДНІ ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ

Igor Atamanyuk	Dr hab., Professor, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Poland;
Gerhard Mook	Dr hab. eng., Professor, Universitat Magdeburg, Germany;
Mariusz Rzasa	PhD eng, Professor, Opole University of Technology, Opole, Poland;
Wojcik Waldemar	Dr Sc., Professor, Institute of Electronics and Informational Technologies Lublin Politechnics, Lublin, Poland;
Zheng Yue	PhD, Professor, a Department of Science and Technology, Yancheng, China

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Andrii Topalov | Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine;

NATIONAL MEMBERS of the EDITORIAL BOARD

Andrii Bandura | Dr. of Phys.-math. Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Mykhailo Horbiychuk | Dr. of Technical Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Volodymyr Gryga | Cand. of Technical Sc., Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Roman Dzhala | Dr. of Technical Sc., Senior Researcher, G. V. Karpenko Institute of Physics and Mechanics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine;

Marian Dmytryshyn | Dr. of Phys.-math Sc., Professor, Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Volodymyr Drevetskyi | Dr. of Technical Sc., Professor, National University of Water Management and Environmental Management, Rivne, Ukraine;

Dmytro Diomin | Dr. of Technical Sc., Professor, Private Enterprise "Technological Center", Kharkiv, Ukraine;

Iryna Zhuravska | Dr. of Technical Sc, Professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine;

Leonid Zamikhovskiy | Dr. of Technical Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Oleksii Kozlov | Dr. of Technical Sc, Professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine;

Yurii Kuchirka | Cand. of Technical Sc., Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Petro Lezhniuk | Dr. of Technical Sc., Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine;

Valerii Lopatin | Dr. of Technical Sc., Senior Researcher, M.V. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine;

Stepan Melnychuk | Dr. of Technical Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Oleh Nykyforchyn | Dr. of Phys.-math Sc., Associate Professor, Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Sergii Osadchyi | Dr. of Technical Sc., Professor, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

Sergii Osiievskiy | Cand. of Technical Sc., Associate Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

Nadiia Pasieka | Cand. of Technical Sc., Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;

Ihor Rybitskyi	Dr. of Technical Sc., Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
Hanna Rudakova	Dr. of Technical Sc., Professor, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine;
Orest Serediuk	Dr. of Technical Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
Oleksandr Sytnyk	Dr. of Technical Sc., Professor, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine;
Sergii Smelyakov	Dr. of Phys.-math Sc., Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
Liana Smolovyk	Cand. of Technical Sc., Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
Yurii Striletskyi	Dr. of Technical Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
Hryhorii Suchkov	Dr. of Technical Sc., Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
Valentyn Uchanin	Dr. Of Technical Sc., Senior Researcher, G.V. Karpenko Institute of Physics and Mechanics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine;
Petro Filevych	Dr. of Technical Sc., Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;
Vasyl Sheketa	Dr. of Technical Sc., Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
Vasyl Yatsuk	Dr. of Technical Sc., Professor, National Technical University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine;

INTERNATIONAL MEMBERS of the EDITORIAL BOARD

Igor Atamanyuk	Dr hab., Professor, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Poland;
Gerhard Mook	Dr hab. eng., Professor, Universitat Magdeburg, Germany;
Mariusz Rzasa	PhD eng, Professor, Opole University of Technology, Opole, Poland;
Wojcik Waldemar	Dr Sc., Professor, Institute of Electronics and Informational Technologies Lublin Politechnics, Lublin, Poland;
Zheng Yue	PhD, Professor, a Department of Science and Technology, Yancheng, China

З М І С Т

Методи і засоби неруйнівного контролю

Зікратий В. С., Штаєр Л. О.

ОГЛЯД ДИНАМОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШТАНГОВИХ ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК 13

Демчина М. М.

ТЕХНОЛОГІЯ BIG DATA В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ..... 22

Нагірний В. І.

СУЧАСНІ СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ОПАЛЕННЯ: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ 32

Нечай І. А., Луцак Д. Л., Демідов І. А., Білюк І. С., Зівенко О. В.

БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ..... 41

Вимірювання фізико-механічних параметрів речовин

Кальницький М. Е., Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю.

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТРАДИЦІЙНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПРИБЛІДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 50

Біліщук В. Б., Криницький О. С., Витвицька Л. А.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ КРАПЛІ РІДИНИ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ 60

Методи і прилади вимірювання витрати рідкої і газоподібної фаз

Бас О. А., Середюк Д. О., Пелікан Ю. Т., Тисяк А. В., Катамай В. Б., Мануляк Р. Т.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ ШЛЯХОМ ГРАДУЮВАННЯ НА ЕТАЛОННІЙ БАЗІ ДП "ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ" 68

Шульга В. А.

МОДЕЛЬ ЛІЧИЛЬНИКА ОБ'ЄМУ ТА ЕНЕРГІЇ ГАЗУ 82

Методи і прилади контролю технологічних параметрів

Заміховський Л. М., Николайчук М. Я., Стрілецький Ю. Й., Левицький І. Т.

РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ RTU SCADApack 474 90

Гарасимів Т. Г. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНАЧЕНЬ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА	101
Егоров О. П. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИМ РОБОТОМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: ПОТОЧНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЯГНЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МАЙБУТНЬОГО	108
Тогоєв О. Р., Пузирьов С. В., Гаврилко С. М., Жуланов М. О. ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ГОЛОСОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ MESH-МЕРЕЖАХ	121

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані комплекси

Козлов О. В., Максимов О. М., Рябошапка Р. М., Добринін Є. В. СТОХАСТИЧНІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОДЕЛІ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ТА КЕРУВАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ КОМПЛЕКСАМИ	130
Лагойда А. І., Лагойда Л. І., Чигур І. І., Чигур Л. Я. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА З ІНТЕГРАЦІЄЮ У SCADA.....	140
Піндус Н. М., Чуйко М. М., Витвицький З. Я., Кровопусков Г. Ю. ВИКОРИСТАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ НАДІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	148
Складанний Д. М., Цапар В. С., Плашихін С. В., Онищенко Д. С. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПІД- ТА МРС-РЕГУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ В УМОВАХ ЧАСТКОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	160

Математичне моделювання, обчислювальні методи, оптимальне керування та дискретні структури

Олійник А. П., Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ У ДОСЛІДЖЕННІ СОЦІО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	169
--	-----

Комп'ютерні технології та системи

Петришин Р. І., Мельник В. Д., Шекета В. І., Халєєв Д. М., Трищ В. В., Богдан О. Т. ОЦІНКА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНО-ПОРІВНЯЛЬНОГО МЕТОДУ ОБРОБКИ КАРОТАЖНИХ ДАНИХ	178
Назаренко О. Г., Ушкаренко О. О., Дьяконов О. С., Сірівчук А. С., Обрубов А. В. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ MAVLINK-ТЕЛЕМЕТРІЇ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ КОНТРОЛЕРІВ PIXHAWK.....	190

CONTENTS

Methods and equipment of non-destructive control

Zikratyi V. S., Shtaier L. O.

REVIEW OF DYNAMOMETRIC METHODS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION
OF ROD PUMPING UNITS 13

Demchyna M. M.

BIG DATA TECHNOLOGY IN INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEXES..... 22

Nahirnyi V. I.

MODERN SENSOR TECHNOLOGIES IN AUTONOMOUS HEATING SYSTEMS:
REVIEW AND APPLICATION PROSPECTS..... 32

Nechai I. B., Lutsak D. L., Demidov I. A., Bilyuk I. S., Zivenko O. V.

WIRELESS INFORMATION TRANSMISSION TECHNOLOGIES IN AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE
TESTING SYSTEMS 41

Measurement of physical and mechanics parameters of substances

Kalnytskyi M. E., Suchkov G. M., Migushchenko R. P., Kropachek O. Yu.

EXPANDING THE CAPABILITIES OF TRADITIONAL ULTRASONIC INSTRUMENTS
FOR RESEARCH, MEASUREMENT, INSPECTION AND DIAGNOSTICS 50

Bilishchuk V. B., Krynytskyi O. S., Vytvytska L. A.

APPLICATION OF COMPUTER VISION TO DETERMINE LIQUID DROP SIZE IN DIGITAL IMAGES..... 60

Methods and devices of flow measurement of liquid and gaseous phases

Bas O. A., Serediuk D. O., Pelikan Yu. T., Tysiak A. V., Katamai V. B., Manuliak R. T.

IMPROVING THE ACCURACY OF ULTRASONIC GAS METERS THROUGH CALIBRATION
AT THE REFERENCE STANDARDS OF SE "IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY" 68

Shulha V. A.

GAS VOLUME AND ENERGY METER MODEL 82

Methods and devices for the technological parameters control

Zamikhovskiy L. M., Nykolaychuk M. Ja., Striletskyi Yu. Y., Levytskyi I. T.

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE TOOL FOR TESTING CONTROL SYSTEM
COMPONENTS BASED ON RTU SCADAPack 474 90

Harasymiv T. H. APPLICATION OF CLUSTERIZATION METHOD TO PREDICT CENTRIFUGAL SUPERFAN PRODUCTIVITY VALUES.....	101
Iegorov O. P. AI-DRIVEN INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS FOR ROBOTIC WELDING: STATE OF THE ART AND FUTURE OUTLOOK	108
Tohoiev O. R., Puzyrov S. V., Gavrylko S. M., Zhulanov M. O. SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR ORGANIZING VOICE COMMUNICATION IN DECENTRALIZED MESH NETWORKS.....	121

Automation and computer-integrated complexes

Kozlov O. V., Maksymov O. M., Riaboshapka R. M., Dobrynin Ye. V. STOCHASTIC AND INTELLIGENT MODELS IN DIAGNOSTIC AND CONTROL SYSTEMS OF ARTILLERY COMPLEXES.....	130
Lahoida A. I., Lahoida L. I., Chyhur I. I., Chyhur L. Ya. INTELLIGENT DATA ACQUISITION AND PROCESSING SYSTEM BASED ON A MICROCONTROLLER WITH INTEGRATION INTO SCADA.....	140
Pindus N. M., Chuiko M. M., Vytvytskiy Z. Y., Krovopuskov H. Yu. EMPLOYING A PID CONTROLLER AND AN INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEX FOR RELIABLE ELECTRIC MOTOR MODELING AND PROGRAMMING	148
Skladannyi D. M., Tsapar V. S., Plashykhin S. V., Onyshchenko D. S. STUDY PID AND MPC CONTROLLERS' OPERATION BASED ON A REFERENCE MODEL UNDER PARTIAL UNCERTAINTY CONDITIONS.....	160

Mathematical modeling, computational methods, optimal control and discrete structures

Oliinyk A. P., Grygorchuk G. V., Grygorchuk L. I. APPLICATION OF DIFFERENTIAL EQUATION SYSTEMS TO SOCIO-ECOLOGICAL PROCESS RESEARCH.....	169
---	-----

Computer technologies and systems

Petryshyn R. I., Melnyk V. D., Sheketa V. I., Khaleiev D. M., Trishch V. V., Bohdan O. T. ASSESSMENT OF PECULIARITIES OF APPLYING THE CLASSIFICATION-COMPARATIVE METHOD OF PROCESSING WELL LOGGING DATA	178
Nazarenko O. H., Ushkarenko O. O., Diakonov O. S., Sirivchuk A. S., Obrubov A. V. SOFTWARE IMPLEMENTATION OF MAVLINK-TELEMETERY FOR UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS USING PIXHAWK FLIGHT CONTROLLERS	190



Методи і засоби неруйнівного контролю

Прийнято 07.09.2025. Прорецензовано 09.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 622.276.66:681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-13-21

**ОГЛЯД ДИНАМОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ШТАНГОВИХ ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК****Зікратий В. С.**

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0009-3983-6888>

e-mail: viktor.zikratyi-a17424@nung.edu.ua

Штаєр Л. О.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1013-9869>

e-mail: lidia.shtaier@nung.edu.ua

Анотація. У статті наведено огляд сучасних динамометричних методів контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ), які є ключовими елементами механізованого видобутку нафти. Метою роботи є систематизація існуючих методів діагностики ШГНУ, узагальнення їх ефективності та визначення ключових тенденцій розвитку для підвищення надійності та безпеки експлуатації нафтових свердловин. Розглянуто теоретичні основи динамометрії, наведено типові дефекти, що проявляються у формах динамограм, та основні параметри з відповідними давачами для контролю технічного стану ШГНУ. Вказано етапи аналізу динамограм, розглянуто основні підходи: класичні, методи аналітичного моделювання, цифрові алгоритми розпізнавання, а також застосування машинного навчання. Визначено переваги та обмеження кожного підходу. Проведено систематизацію сучасних підходів до обробки даних із застосуванням комп'ютерних систем та інтелектуальних технологій, включаючи методи машинного навчання для автоматичного розпізнавання типових дефектів і відхилень у роботі ШГНУ. Запропоновано класифікацію методів за способом збору та опрацювання даних. Підкреслено перспективність розвитку гібридних методів діагностування стану ШГНУ, які поєднують як математичне моделювання, так і методи машинного навчання. Узагальнено проблемні моменти сучасного стану діагностування ШГНУ за динамограмами у: необхідності стандартизації методів збору та обробки динамограм; побудові універ-

Запропоноване посилання: Зікратий, В. С. & Штаєр, Л. О. (2025). Огляд динамометричних методів контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 13-21. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-13-21

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

сальних навчальних вибірок для ШІ-моделей; поєднанні класичних і сучасних методів у гібридні системи; інтеграції результатів діагностування у системи керування видобутком у режимі реального часу. Перспективним напрямом визначено створення централізованих сховищ даних (DataLake) для накопичення динамограм у різних форматах з подальшим застосуванням інтелектуальних алгоритмів. Врахування сучасних тенденцій щодо збору та опрацювання даних в динамометричних методах створює передумови для вдосконалення існуючих систем підтримки прийняття рішень у нафтовидобутку.

Ключові слова: штангова глибинно-насосна установка; динамометрія; діагностування; технічний стан; автоматизація; динамограма.

Вступ

Штангові глибинно-насосні установки (ШГНУ) є основним засобом механізованого видобутку нафти. Основними перевагами ШГНУ є відносно нескладний монтаж і доволі високий ККД. До недоліків належить підвищений знос плунжерної пари, насосно-компресорних труб і штанг насоса, а також складність ремонту глибинного обладнання. Ці фактори зумовлюють необхідність своєчасного діагностування та автоматизації контролю технічного стану і режимів роботи ШГНУ. Наразі існує багато способів підвищення ефективності експлуатації та подовження терміну служби ШГНУ, зокрема: автоматизація та інтелектуальні системи керування, оптимізація електроприводів та балансування верстатів-гойдалок, відновлення та зміцнення насосних штанг, прогнозування ресурсу та оптимізація міжремонтних інтервалів, вдосконалення систем мастильного обслуговування, моніторинг параметрів роботи та прогнозування зносу, застосування сучасних матеріалів і технологій. Одним із найважливіших критеріїв вибору методу діагностування є можливість моніторингу роботи установки та своєчасність виявлення передаварійних станів. Динамометричні методи дозволяють проводити діагностику роботи ШГНУ без зупинки обладнання, що робить їх незамінними у практиці нафтовидобутку. Попри значний прогрес у створенні алгоритмів аналізу динамограм, залишаються відкритими питання автоматизації обробки даних, підвищення точності розпізнавання дефектів і створення універсальних методик.

Мета роботи – систематизувати сучасні динамометричні методи контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок, узагальнити їх ефективність та обмеження, а також визначити ключові напрямки розвитку і перспективи впровадження інтелектуальних та автоматизованих технологій для підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації нафтових свердловин.

Теоретичні основи динамометрії ШГНУ

ШГНУ працює завдяки зворотнопоступальному руху плунжера, який через колону штанг приводиться в дію від верстата-качалки. Послідовне відкривання і закривання клапанів у насосі забезпечує поетапне заповнення робочої камери рідиною та її підйом по трубах на поверхню. У такий спосіб відбувається безперервне викачування нафти зі свердловини.

Динамограма відображає залежність навантаження у точці підвісу штанг від положення полірованого штока. Інформацію про навантаження одержують за допомогою давача зусилля, а також давача положення, з якого знімається інформація про переміщення штока. У більшості випадків складність візуальної інтерпретації одержаної інформації залежить від кількох факторів. До цих факторів належить ймовірність схожої форми отриманих динамограм, а також належність проблеми, що виникає при аналізі динамометричної діаграми до поля за межами знань і досвіду експерта, який виконує аналіз.

Таблиця 1 – Параметри та давачі для діагностування ШГНУ

Параметр	Давач/метод	Призначення
Сила на полірованому штоку	Давач навантаження	Формування динамограми [1]
Хід/позиція штоку	Енкодер/лінійний давач	Розрахунок швидкості/ходу [2]
Електроспоживання привода	Лічильник струму	Енергоефективність, виявлення заклинювань [3]
Дебіт рідини	Витратомір	Продуктивність [4]
Тиск на гирлі	Манометр	Оцінка режимів експлуатації [5]
Вібрація/акустика	Акселерометр/мікрофон	Діагностика ударних навантажень [6]

Для контролю технічного стану ШГНУ нині широко використовуються динамометричні методи:

— поверхнева динамограма (Surface Card) вимірює навантаження на полірованому штоку відносно його положення – цей метод дозволяє виявити загальні проблеми в роботі насоса, такі як недостатнє заповнення, витоки клапанів або механічні несправності;

– підземна динамограма (Downhole Card) розраховується на основі поверхневих вимірювань з урахуванням хвильових процесів у штанговій колонії – забезпечує більш точну інформацію про стан насоса, дозволяючи виявити такі проблеми, як витоки клапанів, газові перешкоди або знос плунжера.

Для комплексної оцінки роботи штангових глибинних насосних установок за динамограмами використовуються різні вимірювальні параметри. Вони дозволяють не лише відтворити навантаження та хід штанг, а й оцінити енергоспоживання, продуктивність, рівень заповнення насоса та наявність аномальних режимів. Поєднання цих даних забезпечує більш повне уявлення про технічний стан обладнання та служить основою для подальшого аналізу. У табл. 1 наведено основні параметри, що визначаються з динамограм, та їх діагностичне значення.

Аналіз динамограм дозволяє виявити типові дефекти та аномалії в роботі ШГНУ порівнюючи форми динамограм дефектних станів з нормальним станом (рис. 1, а). Далі наведено приклади динамограм з деякими типовими дефектами, що дозволяють зрозуміти та в подальшому

розрізнити класи динамограм (динамограми, наведені на рис. 1 - це узагальнені синтезовані динамограми для різних станів обладнання, одержані з класичних робіт [1], практичних посібників виробників [3] та сучасних досліджень з розпізнавання станів за динамограмами [6]):

– недостатнє заповнення насоса (рис. 1, б): характеризується специфічною формою динамограми, що свідчить про неповне заповнення насоса рідиною;

– газова інтерференція (рис. 1, в): карта з хвилеподібною формою;

– порушення герметичності клапанів (рис. 1, г): карта звужена у верхній частині, сила зменшується при ході вгору;

– поломка/обрив штанги (рис. 1, д): різко скорочена по довжині, майже «пласка».

Класифікація та характеристика динамометричних методів

Діагностика ШГНУ за динамограмою відбувається в декілька етапів:

– збір даних з давачів;

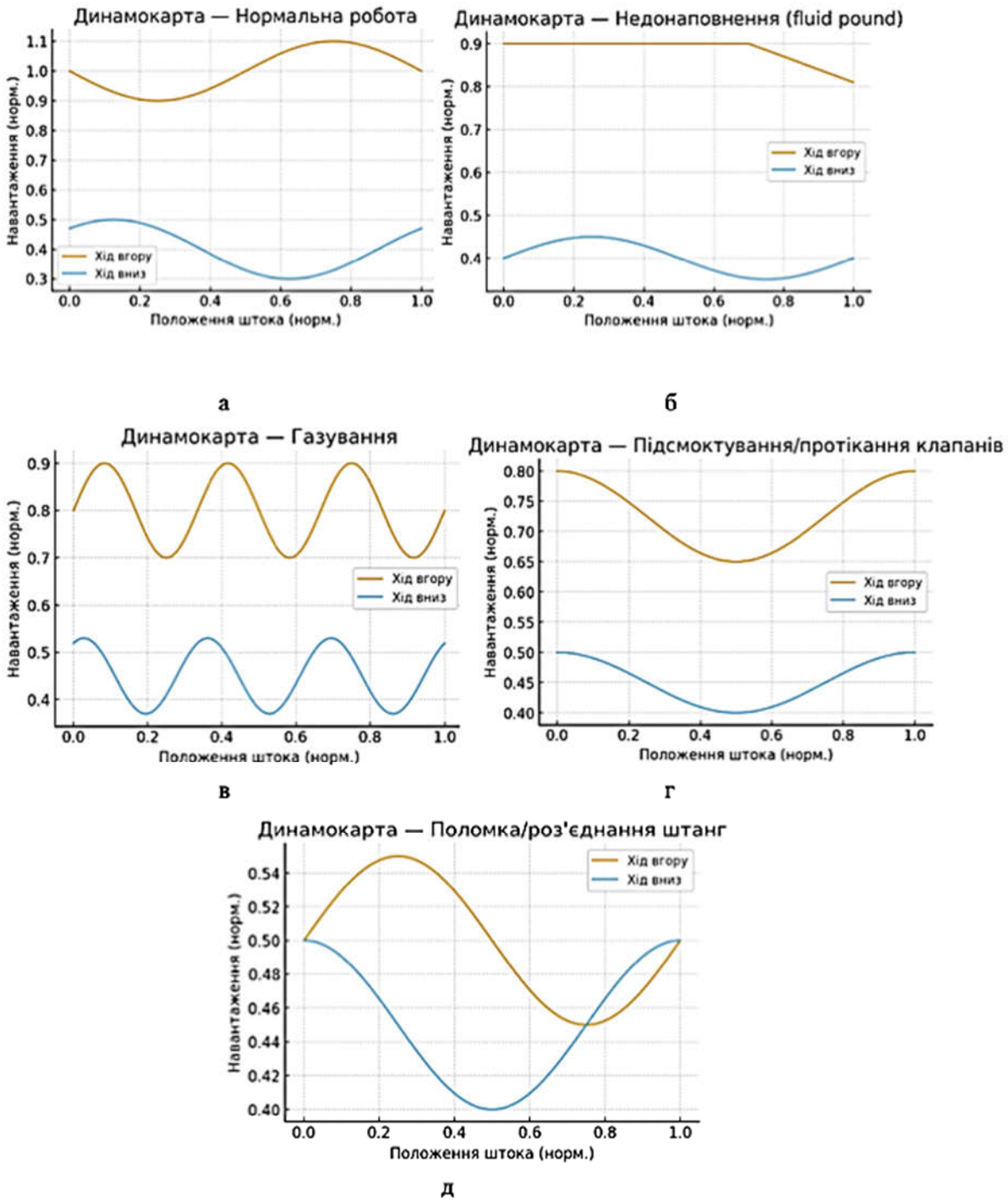
– попередня обробка (фільтрація, ресемплінг);

– виділення ознак (геометрія карт, частоти);

– класифікація та виявлення аномалій;

– рішення (діагноз, рекомендації).

Сучасні методи аналізу динамограм умовно поділяються на чотири групи. Традиційні підходи ґрунтуються на експертному аналізі форми динамограм та правил ідентифікації типових несправностей. Фізико-математичні



а - нормальний стан; б - недостатнє заповнення насоса; в - газова інтерференція; г - порушення герметичності клапанів; д - поломка/обрив штанги

Рисунок 1 – Динамограми при типових станах ШГНУ

методи моделюють процес руху рідини та навантажень у колоні штанг. Статистичні та кореляційні алгоритми дозволяють кількісно оцінити подібність сигналів у часі та частоті. Найсучасніший напрям – застосування методів машинного навчання, які забезпечують автоматичне розпізнавання дефектів за великими

обсягами даних. Нижче наведено коротку характеристику кожної групи методів із виділенням переваг та обмежень їх використання.

1. Класичні динамометричні методи.

Класичні методи базуються на аналізі динамограм, отриманих зі спеціальних давачів. Вони дозволяють визначати

технічний стан установки, рівень заповнення насоса та можливі несправності [7-8].

Переваги: простота, надійність, невисока вартість.

Обмеження: потреба у досвідченому операторі, обмежена точність у складних умовах.

2. Математичне та аналітичне моделювання.

Моделі роботи ШГНУ дають змогу теоретично відтворити роботу системи та зіставити результати з реальними даними. Це підвищує точність результатів діагностування та дозволяє прогнозувати несправності [9].

Переваги: висока точність, можливість прогнозу.

Обмеження: складність реалізації, потреба у точних вхідних даних.

3. Цифрові алгоритми та розпізнавання динамограм.

Застосування цифрових методів дозволяє автоматизувати процес аналізу динамограм, використовуючи алгоритми обробки сигналів та зображень [7].

Переваги: автоматизація, швидкість обробки.

Обмеження: залежність від якості даних, потреба у програмному забезпеченні.

4. Методи машинного навчання.

Сучасні підходи включають використання нейронних мереж для розпізнавання станів ШГНУ за динамограмами [10]. Такі методи показують високу ефективність у виявленні складних та прихованих дефектів.

Переваги: висока точність, здатність виявляти приховані закономірності.

Обмеження: потреба у великих масивах навчальних даних, «чорний ящик» моделей (низька інтерпретованість).

Такий поділ дозволяє відслідкувати еволюцію методів – від простих візуальних до сучасних інтелектуальних систем. Незважаючи на значний прогрес, відкритим залишається питання інтеграції даних із різних сенсорних систем та стандартизації підходів до діагностики.

Варто зазначити, що на сучасному етапі розвитку методів діагностування ШГНУ до наведених чотирьох груп методів доцільно додати ще одну групу - інтегровані та гібридні підходи. Сюди належить клас методів, які містять поєднання фізичних моделей і методів машинного навчання, що створює новий напрямок у діагностування ШГНУ. Такі системи враховують фізичні закони, але використовують ШІ для оптимізації параметрів і розпізнавання відмов.

Переваги: поєднання точності моделей і адаптивності ШІ.

Обмеження: складність реалізації, потреба в обчислювальних ресурсах.

Аналіз наукових і практичних розробок

Аналіз сучасних наукових розробок [11-21] дозволив сформулювати класифікацію динамометричних методів за способом збору та опрацювання даних:

1. Фізико-аналітичні/механістичні моделі (реконструкція динамограми):

– визначення підповерхневих динамограм, перенесення навантажень уздовж колони, моделі контактів, стрес-аналіз. Дають інтерпретованість і «золотий еталон» для ML(machine learning - машинне навчання);

2. Класичне ML + інженерія ознак із динамограм:

– витяг ключових параметрів/контурних дескрипторів; добре працює на менших наборах даних, зручне для експертного супроводу;

3. Глибинне навчання на зображеннях динамограм (CNN/Grad-CAM/Transfer learning):

– пряма класифікація «карт як зображень», XAI(Explainable Artificial Intelligence - пояснюваний штучний інтелект) для довіри, трансферне навчання для економії розмітки;

4. Обробка даних та попередня нормалізація/балансування/генерація:

– нормалізація кількох масштабів, генерація синтетичних динамограм (в т.ч. нейромереві методи) – вирішує дисбаланс класів і домішки шуму;

5. Домено-адаптація, напівконтрольоване та покрокове навчання:

– для перенесення моделей між родовищами/станціями, навчання з малою розміткою та появою нових класів. Критично для промислового впровадження;

6. Прогнозування/попередження станів за траєкторіями ознак динамограм:

– передбачення еволюції параметрів карт для раннього попередження відмов/аномалій;

7. Електричні проксі динамограм (дані привода/двигуна):

– перенесення знань з карт → у прості для збору електричні параметри (струм/потужність) + ML для діагностики. Корисно там, де наземні тензодатчики відсутні/ненадійні;

8. Реальний час та впровадження на периферійних пристроях:

– класифікація карт і спрацювання миттєвих дій на периферійних пристроях.

Результати досліджень щодо використання динамометричних методів із зазначенням класифікації, наведеної вище, за останні 5 років наведено у табл. 2.

Досліджувана проблематика частково відображена у публікаціях сучасних дослідників. Зокрема, Zhao [11] аналізує сучасний стан проблеми ранньої діагностики технічного стану глибинно-насосних агрегатів у нафтовидобутку в контексті ШГНУ, які знайшли найбільш широке застосування на нафтових родовищах. Швидка діагностика в полі досі спирається на візуальну інтерпретацію та аналітичне відновлення підземної карти; це дешево але потребує експертизи і має межі в складних умовах [7]. ML-класифікація карт уже показала промислову ефективність (автоматичне сортування станів, попередження про дефекти), але потребує контролю якості даних і валідації перенесення на нові родовища [14].

У цьому контексті перспективним напрямом є створення єдиного сховища даних (DataLake) для накопичення та агрегування динамограм, записаних у різних форматах і з різних джерел. Таке

сховище дозволить уніфікувати та масштабувати доступ до історичних даних, а подальше їх опрацювання за допомогою машинного навчання забезпечить точніше виявлення закономірностей, автоматичне розпізнавання дефектів та формування прогностичних моделей.

Попри значний прогрес, залишаються відкритими такі питання:

– стандартизація методів збору та обробки динамограм;

– побудова універсальних навчальних вибірок для ШІ-моделей;

– поєднання класичних і сучасних методів у гібридні системи;

– інтеграція результатів діагностування в системи керування видобутком у режимі реального часу.

Висновки

Узагальнюючи наведений огляд динамометричних методів контролю технічного стану ШГНУ, можна зробити такі висновки:

1. Динамограма є основним засобом для визначення стану підземних елементів ШГНУ. При традиційному підході до діагностування якість контролю стану ШГНУ суттєво залежить від кваліфікації персоналу, що зумовлює актуальність розроблення нових методів автоматизованого контролю;

2. Класифікацію динамометричних методів можна звести до п'яти груп: класичні динамометричні; математичне та аналітичне моделювання; цифрові алгоритми та розпізнавання динамограм; методи машинного навчання; інтегровані та гібридні;

3. Найбільш перспективними є: методи з використанням штучного інтелекту та машинним навчанням; моделювання шляхом створення віртуальних моделей ШГНУ (цифрові двійники) для прогнозування поведінки системи за різних умов; розширене використання електронних та бездротових систем збору даних та хмарних сервісів;

4. Невирішеними залишаються питання створення відкритих баз даних динамограм, розроблення універсальних

Таблиця 2 – Класифікація сучасних методів за способом збору та опрацювання даних

Тип методу	Дані	Ціль/Класи	Підхід/Методика	Основний результат
Класичне ML	Динамограми	Класи: GWI, газ-вода, знос, обрив тощо	Витяг ключових ознак + SVM/ML-класифікатори	Поліпшена точність діагностики vs спадкові порогові методи [11].
Препроцесинг + Deep Learning	Динамограми	≥24 робочих станів	Багатомасштабна нормалізація + CNN	Значне збільшення повноти для рідкісних станів [12].
Генерація даних (синтетика)	Динамограми	Дефектні / нормальні стани	Моделі генерації карт (генеративні мережі)	Зменшення дисбалансу класів; збільшення розмірів вибірки [13].
Deep Learning + Transfer Learning	Динамограми	Типи дефектів / аномалій	TL з попередньо натренованими CNN	Успішне перенесення моделей між свердловинами [14].
Deep Learning + XAI	Динамограми	11 класів режимів	11 DL моделей + Grad-CAM	Виокремлення візуальних ознак; пояснюваність рішень [15].
Real-time DL	Динамограми + наземні виміри (тиск, потужність)	Діагностика режимів	CNN, інтеграція мультисенсорних даних	Висока точність і швидкість для промислового застосування [16].
Напівконтрольоване + інкрементальне навчання	Динамограми	Нові / існуючі класи	Multi-source distillation, SSL	Здатність додавати нові класи без повного перенавчання [17].
Домено-адаптація	Динамограми	Мультиродовище	Structure-preserving DA	Покращена переносимість моделей між родовищами [18].
Time-series NN (прогнозування)	Ознаки з динамограм	Прогнозування аномалій / відмов	LSTM/RNN-подібні мережі	Успішне раннє попередження про небезпечні стани [19].
Електричні проксі + Deep Learning	Електричні дані (струм, потужність)	Типи дефектів	Генерація синтетичних даних; OS-CNN	Дешевий діагностичний шлях з високою точністю [20].
Edge AI	Динамограми	Аномалії, газ-інтерференції	Edge-впровадження	Миттєве сповіщення; мінімальні затримки; автоматичні дії [21].

моделей для різних типів родовищ і підвищення інтерпретованості результатів.

Тенденції щодо скорочення кількості та підвищення надійності використовуваних динамометрів вимагають глибшого аналізу одержаних даних та розроблення інтегрованих/гібридних методів діагностування ШГНУ, що стимулює подальший розвиток досліджень у цій галузі.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Gibbs S. G. Analysis of the sucker rod pumping system by means of the wave equation. *SPE Journal*. 1963. Vol. 3(01). P. 60–69.
2. Takács G. Sucker-rod pumping handbook: Production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping. Elsevier. 2009.
3. ChampionX. XSPROC Production Optimization Software. 2023. URL: <https://www.championx.com>
4. Wu J., et al. . *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2023. Vol. 224. 111221
5. National Oilwell Varco. NOVAWAVE Production Monitoring. 2023. URL: <https://www.nov.com>
6. Wei L., et al. Shapelet-based diagnosis of sucker rod pump failures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2023. Vol. 222. 111226.
7. Rovinskyi V. A., Yevchuk V. O., Zamikhovskyi L. M. Diahnostyka tekhnichnoho stanu shtanhovykh hlybynno-nasosnykh ustanovok: monohrafiia. Ivano-Frankivsk: Symfoniia forte, 308. 2006. [in Ukrainian]
8. Andreishyn A. S. Systema keruvannia naftovydobuvnoiu ustanovkoiu na osnovi neironnoi merezhi (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk, Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika»). 2020. [in Ukrainian]
9. Kopei V. B., Onysko O. R., Panchuk V. G. Component-oriented acausal modeling in the engineering education process on the example of the sucker rod string. *PeerJ Computer Science*. 2021. Vol. 7. e634 .
10. Maliar A. V., Andreishyn A. S. Vykorystannia neironnykh merezh dlia diahnostyky stanu shtanhovykh nasosnykh ustanovok. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Seriia: Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia. 2018. 888. P. 45–52. [in Ukrainian]
11. Zhao L., Li J., Chen Y., Xu P., Wang H., Liu Y., Zhang D. Quantitative diagnosis of sucker-rod pumping system working conditions using dynamometer cards. *Measurement*. 2021. 168. 108483. doi:[10.1016/j.measurement.2020.108483](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108483)
12. Zhang Q., Ma C., Li F., Xu Y., Lin J., Zhao B., Liu X. Multi-scale normalization and CNN for sucker-rod pump state recognition. *Frontiers in Earth Science*. 2022. 10:852633. doi:[10.3389/feart.2022.852633](https://doi.org/10.3389/feart.2022.852633)
13. Sun Z., Wang T., Jia L., He F., Yang J. Dynamometer card generation for data augmentation in rod-pump fault diagnosis. *Scientific Reports*. 2024. Vol.14. 69516. doi:[10.1038/s41598-024-69516-y](https://doi.org/10.1038/s41598-024-69516-y)
14. Li X., Huang J., Zhang Y., Cai D. Automatic transfer learning-based fault diagnosis of sucker-rod pumping units. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 124. 105271. doi:[10.1016/j.engappai.2024.105271](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.105271)
15. Martinović B., Bijanić M., Danilović D., Petrović A., Delibasić B. Unveiling Deep Learning Insights: A Specialized Analysis of Sucker Rod Pump Dynamographs, Emphasizing Visualizations and Human Insight. *Mathematics*. 2023. Vol. 11(23). P. 47-82. doi:[10.3390/math11234782](https://doi.org/10.3390/math11234782)
16. Wang Y., Li Q., Sun H., Zhou K., Chen W. Working condition recognition for sucker-rod pumping units in real time. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2023. Vol.107. 104676. doi:[10.1016/j.jngse.2023.104676](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2023.104676)
17. Kim T., Kwon H., Lee S., Park D., Chung J. Semi-supervised class-incremental recognition of sucker-rod pump states using multi-source distillation. *PLOS ONE*. 2025. 20(3). e1234567. doi:[10.1371/journal.pone.1234567](https://doi.org/10.1371/journal.pone.1234567)
18. Chen L., Zhao Y., Liu J., Yang Z. Domain adaptation preserving structure-information for sucker-rod pump diagnostics. *Neural Networks*. 2025. Vol. 160. 107392. doi:[10.1016/j.neunet.2025.107392](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2025.107392)
19. Gao Q., Zhou P., Wu L., Tian Y., Hu S. Early-warning of sucker-rod pump failures via temporal neural networks on dynamometer card parameters. *Mathematics*. 2024. Vol. 12(14). 2253. doi:[10.3390/math12142253](https://doi.org/10.3390/math12142253)
20. Zhang H., Aliyev R., Cheng M., Zheng F., Zhang J. Motor-parameter based diagnosis of sucker-rod pump condition using electric-proxy synthetics and OS-CNN. *Sensors (Basel)*. 2025. Vol. 25(5). 1234. doi:[10.3390/s25051234](https://doi.org/10.3390/s25051234)
21. Lopez A., Rivera M., Gomez P., Sanchez L. Edge-based real-time dynamometer card classification and alerting system for sucker-rod pumps. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. 98765-98775. doi:[10.1109/ACCESS.2025.1234567](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.1234567)

REVIEW OF DYNAMOMETRIC METHODS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF ROD PUMPING UNITS

Zikratyi V. S.

Postgraduate Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0009-3983-6888>

e-mail: viktor.zikratyi-a17424@nung.edu.ua

Shtaier L. O.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-1013-9869>

e-mail: lidia.shtaier@nung.edu.ua

Abstract. The article presents a review of modern dynamometric methods for monitoring the technical condition of rod pumping units (RPUs), which are key elements of mechanized oil production. The purpose of the work is to systematize the existing methods of RPU diagnostics, summarize their effectiveness, and identify key development trends aimed at improving the reliability and safety of oil well operation. Theoretical foundations of dynamometry are considered, including typical defects reflected in the shapes of dynamograms, as well as the main parameters with corresponding sensors for monitoring the technical condition of RPUs. The stages of dynamogram analysis are outlined, and the main approaches are reviewed: classical methods, analytical modeling, digital recognition algorithms, and the application of machine learning. The advantages and limitations of each approach are identified. A systematization of modern approaches to data processing using computer systems and intelligent technologies is presented, including machine learning methods for the automatic recognition of typical defects and deviations in RPU operation. A classification of methods according to data acquisition and processing is proposed. The paper emphasizes the prospects of developing hybrid diagnostic methods that combine both mathematical modeling and machine learning approaches. The problematic aspects of the current state of RPU diagnostics based on dynamograms are summarized, including need for standardization of methods for data acquisition and processing, the construction of universal training datasets for AI models, the integration of classical and modern methods into hybrid systems, and the embedding of diagnostic results into real-time production control systems. A promising direction is identified in the creation of centralized data repositories (DataLake) for storing dynamograms in various formats, followed by processing with intelligent algorithms. Taking into account modern trends in data collection and processing within dynamometric methods creates prerequisites for the improvement of existing decision support systems in oil production.

Keywords: rod pumping unit; dynamometry; diagnostics; technical condition; automation; dynamogram.



Прийнято 17.12.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 004.65

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-22-31

ТЕХНОЛОГІЯ BIG DATA В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ

Демчина М. М.

Кандидат технічних наук, доцент

Університет Короля Данила

76018, вул. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-9161-4843>

e-mail: mykolademchyna@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто особливості обробки та зберігання даних в сучасних інформаційно-вимірювальних комплексах, що функціонують в умовах зростання обсягів вимірювальної інформації та підвищених вимог до швидкодії і надійності. Проаналізовано основні вимоги до даних інформаційно-вимірювальних комплексів, зокрема щодо обсягу, швидкості надходження, структурної різноманітності та достовірності вимірювальної інформації. Наведено класифікацію інформаційно-вимірювальних комплексів за призначенням та визначено характерні типи даних для кожного класу. Розглянуто основні моделі даних, що застосовуються в технологіях Big Data, та обґрунтовано доцільність їх використання в інформаційно-вимірювальних комплексах залежно від специфіки вимірювальних процесів. Показано, що використання гнучких і масштабованих моделей даних забезпечує ефективну інтеграцію, аналіз і довготривале зберігання великих масивів вимірювальної інформації. Особлива увага приділяється можливості порівняння отриманих даних з додатковими джерелами інформації, включаючи дані з Інтернету, що дозволяє підвищити точність аналізу та прогнозування. Також розглядаються приклади практичного застосування моделей даних у контрольно-вимірювальних, діагностичних, моніторингових та керуючих комплексах, що демонструє їх ефективність у різних прикладних задачах. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації інформаційно-вимірювальних комплексів з підвищеними вимогами до продуктивності та аналітичних можливостей.

Ключові слова: технологія Big Data, інформаційно-вимірювальний комплекс, набір даних, модель, аналіз, потік інформації.

Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів даних, що генеруються інформаційно-вимірювальними комплексами в різних галузях науки та промисло-

вості [1]. Вимірювальні системи, інтегровані з датчиками, автоматизованими засобами збору інформації, IoT-пристроями та промисловими мережами, формують великі масиви різномірних даних у режимі реального часу. Традиційні підходи до оброб-

Запропоноване посилання: Демчина, М. М. (2025). Технологія Big Data в інформаційно-вимірювальних комплексах. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 22-31. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-22-31

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Рисунок 1 – Класифікація технології Big Data

ки та аналізу таких даних часто виявляються недостатньо ефективними, з огляду на вимоги до швидкодії, масштабованості та надійності. На рис. 1 представлена класифікація технології Big Data. Дана технологія відкриває нові можливості для зберігання, обробки та аналізу великих обсягів вимірювальної інформації. Їх використання дозволяє підвищити точність вимірювань, забезпечити оперативне виявлення аномалій, оптимізувати процеси керування та підтримати прийняття обґрунтованих рішень на основі даних. Застосування розподілених обчислень, паралельної обробки та інтелектуального аналізу даних сприяє підвищенню ефективності функціонування інформаційно-вимірювальних комплексів у складних і динамічних умовах. Причому сучасні інформаційно-вимірювальні комплекси характеризуються високим рівнем автоматизації, розподіленою архітектурою та інтеграцією з мережевими і хмарними технологіями. До їх складу входять сенсорні мережі, модулі збору даних, канали зв'язку, обчислювальні вузли та програмні засоби візуалізації і керування. Значна частина вимірювань здійснюється у режимі реального часу, що зумовлює жорсткі вимоги до надійності, швидкодії та точності обробки інформації. Ускладнення вимірювальних задач і зростання кількості контрольованих параметрів призводять до суттєвого збільшення обсягів даних, які необхідно обробляти та аналізувати [2].

Технології Big Data в інформаційно-вимірювальних комплексах дозволяють

реалізувати ефективне зберігання вимірювальної інформації, виконувати паралельну обробку потоків даних, а також застосовувати методи інтелектуального аналізу та машинного навчання. Це дає змогу не лише підвищити достовірність результатів вимірювань, але й забезпечити прогнозування стану об'єктів, раннє виявлення відмов і аномальних режимів роботи. Важливою особливістю сучасних технологій Big Data є можливість інтеграції даних інформаційно-вимірювальних комплексів із зовнішніми джерелами інформації, зокрема з відкритих ресурсів Інтернету, галузевих баз даних та інформаційних платформ. Для інформаційно-вимірювальних комплексів така інтеграція створює принципово нові можливості підвищення інформативності та достовірності результатів вимірювань. Крім того, зіставлення даних інформаційно-вимірювальних комплексів із зовнішніми джерелами сприяє побудові узагальнених моделей та підвищенню точності прогнозування. Використання статистичних, довідкових або поточкових даних з Інтернету дозволяє виявляти глобальні тенденції, порівнювати локальні результати вимірювань із середніми або нормативними значеннями та адаптувати алгоритми аналізу до змін зовнішнього середовища. Використання аналітичних інструментів Big Data сприяє оптимізації технологічних процесів і підвищенню ефективності прийняття управлінських рішень.

У роботах [3, 4] розглядається застосування технологій Big Data для обробки ве-

ликих потоків вимірювальної інформації, що надходить від розподілених сенсорних мереж та інформаційно-вимірювальних комплексів у промислових системах. Автори підкреслюють переваги використання розподілених обчислювальних платформ для підвищення масштабованості та надійності обробки даних. У публікаціях [5, 6] досліджується інтеграція Big Data з інформаційно-вимірювальними комплексами реального часу, зокрема в енергетичних та кіберфізичних системах. Особливу увагу приділено проблемам високої швидкості надходження даних, їх фільтрації та попередньої обробки з урахуванням похибок вимірювань. Роботи [7, 8] присвячені використанню методів аналітики Big Data та машинного навчання для інтелектуального аналізу вимірювальної інформації. У цих дослідженнях показано можливості прогнозування стану об'єктів, виявлення аномалій та підвищення точності прийняття рішень в інформаційно-вимірювальних комплексах. У публікаціях [9, 10] розглядаються архітектурні рішення побудови інформаційно-вимірювальних комплексів із використанням хмарних технологій та платформ Big Data. Автори аналізують питання зберігання великих обсягів вимірювальних даних, забезпечення відмовостійкості та інформаційної безпеки. Роботи [11, 12] зосереджені на практичних аспектах впровадження технологій Big Data в інформаційно-вимірювальні системи промислового та екологічного моніторингу. Показано, що поєднання сучасних вимірювальних засобів з аналітичними інструментами Big Data дозволяє суттєво підвищити ефективність моніторингу складних об'єктів і процесів.

Актуальність дослідження обумовлена потребою у створенні та впровадженні сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів, здатних ефективно функціонувати в умовах зростаючих обсягів даних та високих вимог до якості інформації. Поєднання принципів побудови інформаційно-вимірювальних комплексів з технологіями Big Data є перспективним напрямом розвитку цифрових, кіберфізичних та інтелектуальних систем, що відповідає сучасним те-

нденціям автоматизації та концепції Індустрії 4.0.

Мета статті полягає у дослідженні можливостей застосування технологій Big Data в інформаційно-вимірювальних комплексах, аналізі архітектурних і методологічних підходів до обробки великих обсягів вимірювальної інформації, а також оцінюванні їх впливу на підвищення ефективності, точності та надійності функціонування сучасних вимірювальних систем.

Вимоги до даних та задачі технології Big Data

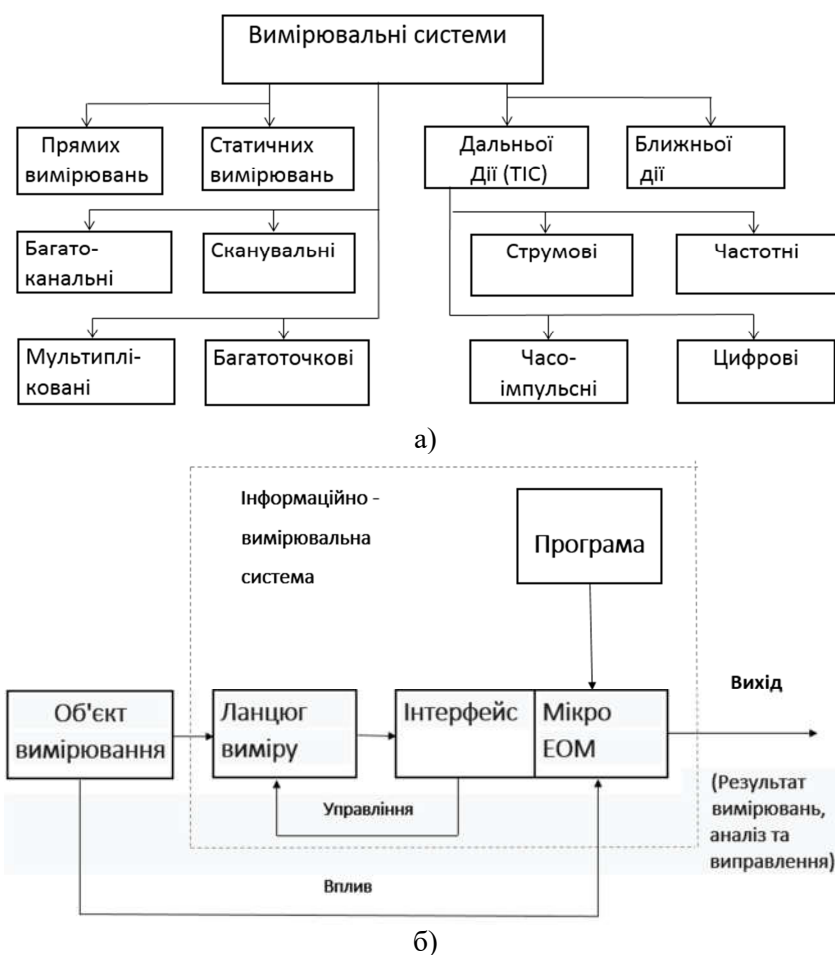
До сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів висуваються вимоги в області роботи з даними, що потребує сучасних рішень цифровізації. Загальний вигляд інформаційно-вимірювальної системи і її класифікації представлені на рис. 2.

Головні характеристики даних та вимоги до них.

Обсяг даних. Інформаційно-вимірювальні комплекси формують значні обсяги даних у процесі безперервного контролю параметрів об'єктів і технологічних процесів. Збільшення кількості вимірювальних каналів, підвищення частоти дискретизації та тривалість спостережень призводять до накопичення великих масивів вимірювальної інформації. Дані повинні зберігатися таким чином, щоб забезпечити можливість подальшого аналізу, порівняння з історичними значеннями та використання для діагностики і прогнозування стану системи.

Швидкість надходження та обробки даних. Для інформаційно-вимірювальних комплексів характерною є висока швидкість генерації та оновлення даних. У багатьох випадках вимірювання виконуються в режимі реального або близького до реального часу, що висуває жорсткі вимоги до оперативності приймання, передачі та первинної обробки інформації. Дані повинні оброблятися з мінімальними затримками, оскільки своєчасність інформації безпосередньо впливає на ефективність контролю та керування об'єктами.

Різноманітність даних. Інформаційно-вимірювальні комплекси працюють з



а – класифікація за надходженням даних; б – структурна схема

Рисунок 2 – Інформаційно-вимірювальна система

даними різної природи та формату. Окрім числових результатів вимірювань, використовуються часові ряди, сигнали, журнали подій, службова інформація, а також результати діагностики та калібрування вимірювальних засобів. Така різноманітність потребує уніфікованих підходів до подання, зберігання та обробки даних, а також чіткої системи метаданих.

Варіабельність та нестабільність даних. Вимірювальні дані можуть характеризуватися змінною якістю, нерівномірною інтенсивністю надходження та наявністю випадкових відхилень. На результати вимірювань впливають зовнішні умови, зношення датчиків, електромагнітні завади та особливості об'єкта спостереження. Тому дані інформаційно-вимірювальних комплексів повинні підлягати перевірці, фільтрації та корекції з метою зменшення впливу шумів і аномальних значень.

Достовірність і надійність даних. Однією з ключових вимог до даних є їх достовірність. Вимірювальна інформація повинна відповідати встановленим метрологічним характеристикам, а джерела даних — бути відомими та контрольованими. Важливу роль відіграють процедури калібрування, валідації та контролю правильності даних, оскільки помилки у вимірюваннях можуть призвести до неправильних висновків і рішень.

Актуальність та термін зберігання даних. Дані інформаційно-вимірювальних комплексів мають різну цінність залежно від часу їх отримання. Оперативні дані необхідні для поточного контролю, тоді як архівні використовуються для аналізу тенденцій і дослідження динаміки процесів. Це зумовлює необхідність визначення політик зберігання, архівування та видалення даних з урахуванням вимог до їх доступності та актуальності.

Безпека та захищеність даних. Вимірювальні дані є критично важливими для функціонування багатьох технічних систем, тому повинні бути захищені від несанкціонованого доступу, втрати або спотворення. Інформаційно-вимірювальні комплекси мають забезпечувати цілісність, конфіденційність та доступність даних на всіх етапах їх обробки і зберігання. Особливо важливими є захист каналів передачі та контроль доступу до даних.

Наочність і можливість інтерпретації. Для ефективного використання вимірювальної інформації дані повинні бути представлені у формі, зручній для аналізу та інтерпретації. Засоби візуалізації повинні забезпечувати наочне відображення стану об'єктів, змін параметрів у часі та виявлення відхилень від нормальних режимів.

Практична цінність даних. Дані інформаційно-вимірювальних комплексів повинні мати прикладне значення та використовуватися для досягнення поставлених цілей контролю, діагностики та керування. Цінність даних визначається їх здатністю відображати реальний стан об'єкта, підтримувати прийняття рішень та сприяти підвищенню ефективності функціонування системи загалом.

Зазначені вимоги до даних інформаційно-вимірювальних комплексів істотно ускладнюють їх зберігання, обробку та аналіз у межах традиційних інформаційних систем. Постійне зростання кількості вимірювальних каналів, висока частота надходження даних, різноманітність форматів і необхідність довготривалого зберігання історичної інформації створюють нові технічні та організаційні виклики. У таких умовах класичні реляційні бази даних та централізовані системи обробки часто не забезпечують необхідної масштабованості, продуктивності та відмовостійкості, що обумовлює доцільність використання сучасних технологій Big Data.

Завдання, пов'язані з використанням Big Data в інформаційно-вимірювальних комплексах, умовно можна поділити на три основні групи.

1. Зберігання та управління вимірювальними даними. Інформаційно-вимірю-

вальні комплекси можуть генерувати сотні терабайт даних у процесі тривалої експлуатації. Такий обсяг інформації складно ефективно зберігати та адмініструвати за допомогою традиційних реляційних баз даних. Технології Big Data передбачають використання розподілених файлових систем, у яких вимірювальні дані зберігаються на множині стандартних обчислювальних вузлів. Кожен фрагмент даних розміщується на кількох фізичних носіях, що забезпечує відмовостійкість та збереження інформації у разі виходу з ладу окремих компонентів системи. Для інформаційно-вимірювальних комплексів це є особливо важливим, оскільки втрата вимірювальних даних може призвести до неможливості аналізу стану об'єкта або відновлення хронології подій.

2. Робота з неструктурованою та різноманітною інформацією. На відміну від класичних систем збору даних, сучасні інформаційно-вимірювальні комплекси оперують не лише структурованими числовими вимірами, але й неструктурованими або напівструктурованими даними. До них належать журнали подій, сигнали, телеметричні потоки, зображення, відео з технічних камер, а також службова інформація про стан обладнання. Технології Big Data дозволяють зберігати такі дані без жорсткої попередньої структуризації, що дає змогу накопичувати повний масив вимірювальної інформації. Водночас це потребує застосування спеціалізованих методів подальшої обробки та перетворення даних з метою отримання корисної інформації для аналізу та прийняття рішень.

3. Аналіз та інтерпретація вимірювальних даних. Одним із ключових завдань інформаційно-вимірювальних комплексів є не лише збір і зберігання даних, а й їх аналіз для контролю, діагностики та прогнозування стану об'єктів. Технології Big Data надають інструменти для виконання як базових аналітичних операцій, так і складного багатовимірного аналізу великих масивів вимірювальної інформації. Це створює можливості для виявлення прихованих закономірностей, аналізу тенденцій, побудови прогностичних моделей

Таблиця 1 – Моделі функціонування великих даних

Критерій	Документоорієнтована модель	Графова модель	Модель «ключ–значення»	Стовпчикова модель
Основна одиниця зберігання	Документ (JSON/XML), що містить набір атрибутів	Вузол і зв'язок між вузлами	Пара «ключ – значення»	Стовпець або сімейство стовпців
Типи даних, що підтримуються	Напівструктуровані, різнорідні вимірювальні дані	Структуровані та неструктуровані дані зі складними зв'язками	Дані довільної структури без внутрішньої інтерпретації	Переважно структуровані та числові дані
Гнучкість структури	Висока, структура документів може змінюватися	Дуже висока, схема не фіксована	Максимальна, структура значення не регламентується	Середня, легко додавати нові стовпці
Підтримка зв'язків між даними	Обмежена, реалізується на рівні застосунку	Основна перевага моделі, зв'язки є ключовими	Відсутня	Обмежена, не є основною функцією
Швидкість доступу до даних	Висока для вибірки окремих документів	Висока для аналізу зв'язків	Дуже висока при доступі за ключем	Висока для аналітичних запитів
Масштабованість	Висока, добре працює з великими обсягами даних	Висока, особливо для динамічних систем	Дуже висока, проста та горизонтальна масштабованість	Висока, орієнтована на масову обробку
Ефективність аналітичних операцій	Середня	Висока для аналізу взаємозв'язків	Низька	Дуже висока (агрегації, статистика)
Типові задачі в ІВК	Зберігання конфігурацій, метаданих, описів вимірювань	Аналіз взаємодії сенсорів і підсистем	Оперативні дані, стани сенсорів, кешування	Обробка часових рядів, статистичний аналіз
Робота в реальному часі	Підтримується	Добре підходить	Найбільш придатна	Обмежена, орієнтація на пакетну аналітику
Складність реалізації	Середня	Вища за інші моделі	Низька	Середня

та підвищення ефективності функціонування інформаційно-вимірювальних комплексів.

Таким чином, специфіка даних інформаційно-вимірювальних комплексів — великий обсяг, висока швидкість надходження, різнорідність і вимоги до надійності — обумовлює необхідність застосування технологій Big Data як основи для побудови сучасних масштабованих і ефективних систем зберігання та аналізу вимірювальної інформації.

Моделі функціонування великих даних

Сучасні інформаційно-вимірювальні комплекси характеризуються інтенсивною генерацією різнорідних даних, що надходять від великої кількості вимірювальних пристроїв, сенсорів та підсистем. Такі дані можуть відрізнятись за структурою, часто-

тою надходження, обсягом і призначенням, що ускладнює їх ефективне зберігання та подальшу обробку в межах єдиного підходу. У зв'язку з цим актуальним є застосування різних моделей організації даних, кожна з яких орієнтована на певний клас задач. Моделі функціонування великих даних представлені в табл. 1.

Модель даних, орієнтована на документ, використовує документи як основну одиницю зберігання та пошуку напівструктурованої інформації. У інформаційно-вимірювальних комплексах така модель є доцільною завдяки гнучкості структури та можливості зберігання різнорідних вимірювальних даних без попереднього жорсткого опису схеми.

У межах інформаційно-вимірювального комплексу документи застосовуються для представлення результатів вимірювань, телеметричних даних, параметрів датчиків,

метаданих та часових міток. Найпоширенішими форматами подання є XML та JSON, які забезпечують зручність обробки, передачі й інтеграції даних між підсистемами комплексу. На відміну від реляційного підходу, де структура таблиць визначається заздалегідь, у документоорієнтованій моделі опис структури та значень зберігається безпосередньо в документі. Це дозволяє зберігати дані з різною структурою. Завдяки високій гнучкості та доступності даних документоорієнтована модель є ефективним рішенням для зберігання та обробки великих обсягів різномірної інформації в сучасних інформаційно-вимірвальних комплексах.

Графова модель даних призначена для зберігання та обробки великих обсягів різномірної інформації, яка може мати структурований, напівструктурований або неструктурований характер. В інформаційно-вимірвальних комплексах така модель є особливо ефективною для представлення складних взаємозв'язків між вимірвальними пристроями, каналами збору даних, параметрами середовища та результатами вимірювань.

На відміну від традиційних підходів, у яких структура даних визначається заздалегідь, графова модель не потребує фіксованої схеми перед збереженням інформації. Це дозволяє гнучко інтегрувати дані, що надходять від різних сенсорів, підсистем та зовнішніх джерел, у тому числі в режимі реального часу. Для інформаційно-вимірвальних комплексів це є важливим, оскільки конфігурація вимірвальної системи та склад контрольованих параметрів можуть динамічно змінюватися. У графовій моделі дані подаються у вигляді вузлів та зв'язків між ними, де вузли можуть відповідати вимірвальним пристроям, фізичним об'єктам або подіям вимірювання, а зв'язки – функціональним, часовим або причинно-наслідковим залежностям. Завдяки здатності обробляти великі обсяги високошвидкісних даних без необхідності попереднього визначення схеми, графова модель широко застосовується для аналітичних задач в режимі реального часу. В інформаційно-вимірвальних комплексах

це дозволяє ефективно аналізувати потоки вимірювань, встановлювати взаємозв'язки між параметрами та підвищувати загальну інформативність системи.

Модель даних типу «ключ–значення». Модель даних типу «ключ–значення» є однією з найпростіших і водночас найгнучкіших моделей зберігання інформації. В її основі лежить збереження даних у вигляді пар «ключ – значення», де ключ виступає унікальним ідентифікатором, а значення містить відповідний інформаційний об'єкт. У контексті інформаційно-вимірвальних комплексів така модель доцільна для зберігання великих потоків вимірвальних даних, параметрів стану обладнання, результатів окремих вимірювань або службової інформації. Значення в моделі «ключ–значення» може мати довільну форму та містити числові дані, текстові записи, часові ряди, двійкові файли, а також структуровані або напівструктуровані представлення вимірвальної інформації. При цьому внутрішня структура значення не нав'язується системою зберігання, а повністю визначається логікою інформаційно-вимірвального комплексу та вимогами прикладного програмного забезпечення.

Однією з ключових переваг цієї моделі є відсутність жорстких вимог до структури даних. Це дозволяє легко адаптувати сховище до змін конфігурації обладнання, появи нових датчиків або вимірвальних каналів без необхідності модифікації загальної схеми зберігання. Доступ до інформації здійснюється безпосередньо за ключем, що забезпечує високу швидкість читання та запису даних. Модель «ключ–значення» добре підходить для задач, де не потрібні складні запити або встановлення взаємозв'язків між даними, але критично важливими є швидкодія та масштабованість. В інформаційно-вимірвальних комплексах це може бути зберігання оперативних результатів вимірювань, поточних станів сенсорів, буферів телеметричних даних або тимчасових значень, що використовуються під час обробки сигналів.

Стовпчикова модель даних ґрунтується на організації інформації у вигляді стовпців та сімейств стовпців, які виступають

Таблиця 2 – Моделі великих даних інформаційно-вимірювальних комплексів

Тип інформаційно-вимірювального комплексу	Призначення	Характер вимірювальних даних	Доцільні моделі даних	Обґрунтування вибору моделей
Контрольно-вимірювальні комплекси	Контроль фізичних параметрів об'єктів (температура, тиск, напруга, струм тощо)	Потокові дані, часові ряди, висока частота надходження	Ключ–значення, стовпчикова	Забезпечують швидкий запис і доступ до поточних значень та ефективну обробку великих масивів однотипних вимірювань
Діагностичні комплекси	Оцінювання технічного стану обладнання, виявлення відмов	Багатовимірні дані, історичні вимірювання, події	Документоорієнтована, графова	Дозволяють зберігати вимірювання разом із метаданими та встановлювати зв'язки між параметрами, подіями й компонентами системи
Моніторингові комплекси	Довготривале спостереження за станом об'єктів або середовищ	Великі обсяги часових та просторово-часових даних	Стовпчикова, документоорієнтована	Ефективні для накопичення та аналітичної обробки історичних даних із змінною структурою
Експериментальні комплекси	Наукові дослідження та лабораторні вимірювання	Напівструктуровані дані, результати експериментів, конфігурації	Документоорієнтована, стовпчикова	Забезпечують гнучке зберігання результатів експериментів і швидкий статистичний аналіз
Керуючі інформаційно-вимірювальні комплекси	Вимірювання з автоматичним керуванням процесами	Дані реального часу, події, сигнали керування	Ключ–значення, графова	Ключ–значення забезпечує мінімальні затримки, графова модель дозволяє описувати логіку взаємодії компонентів

основними одиницями зберігання. В інформаційно-вимірювальних комплексах така модель є доцільною для роботи з великими масивами однотипних вимірювальних даних, зокрема часовими рядами показів сенсорів, параметрами сигналів та результатами багаторазових вимірювань. На відміну від рядкової організації даних, де вся інформація про об'єкт зберігається в одному записі, стовпчикова модель групує значення за ознаками. Це означає, що дані одного типу, наприклад температури, тиску або напруги, зберігаються разом у відповідних стовпцях. Такий підхід дозволяє одному широкому стовпцю містити обсяг інформації, еквівалентний великій кількості рядків у традиційних таблицях.

Для інформаційно-вимірювальних комплексів це забезпечує істотні переваги під час виконання аналітичних операцій. Обчислення агрегованих показників, таких як середні значення, суми або кількість вимірювань за певний інтервал часу, можуть виконуватися значно швидше, оскі-

льки обробляється лише необхідний стовпець, а не весь набір даних. Крім того, стовпчикова організація сприяє ефективному стисненню та розбиттю даних, що зменшує обсяг зберігання та підвищує продуктивність доступу.

Моделі великих даних інформаційно-вимірювальних комплексів представлені в таблиці 2.

Кожна з розглянутих моделей даних не є універсальною для всіх задач інформаційно-вимірювальних комплексів. Документоорієнтована модель забезпечує гнучке зберігання різномірної вимірювальної інформації, графова модель є найбільш ефективною для аналізу складних взаємозв'язків між елементами інформаційно-вимірювального комплексу, модель «ключ–значення» оптимальна для високошвидкісної обробки оперативних даних, тоді як стовпчикова модель найкраще підходить для аналітичної обробки великих масивів вимірювальних даних та часових рядів.

Висновки

У роботі розглянуто особливості функціонування сучасних інформаційно-вимірjuвальних комплексів та проаналізовано вимоги до даних, що формуються в процесі їх роботи. Показано, що зростання обсягів вимірjuвальної інформації, підвищення частоти надходження даних і різноманітність їх структур ускладнюють використання традиційних підходів до зберігання та обробки даних.

Виконано класифікацію інформаційно-вимірjuвальних комплексів за призначенням та встановлено, що кожен клас комплексів характеризується специфічними типами даних і вимогами до їх обробки. Це зумовлює необхідність застосування гнучких і масштабованих моделей даних, здатних ефективно працювати з великими масивами вимірjuвальної інформації.

У роботі проаналізовано основні моделі даних, що використовуються в технологіях Big Data, зокрема документоорієнтовану, графову, модель ключ–значення та стовпчикову модель, і обґрунтовано доцільність їх застосування в інформаційно-вимірjuвальних комплексах. Показано, що вибір конкретної моделі даних повинен здійснюватися з урахуванням характеру вимірjuвань, режиму роботи системи (реального часу або офлайн-аналізу) та вимог до швидкодії й надійності.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Lande D. V., Subach I. Yu., Gladun A. Ya. Processing of very large data sets (Big Data): a textbook. Kyiv. 2021. 168 p. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46129> [in Ukrainian]
2. Talakh M. V. Big Data processing technologies. A textbook. Chernivtsi: Chernivtsi National University. 2024. 454 p. URL: <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/8993> [in Ukrainian]
3. Chen M., Mao S., Liu Y. Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*. 2014. Vol. 19(2). P. 171- 209. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11036-013-0489-0>
4. Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*. 2015. Vol. 35(2). P. 137–144. doi: [10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007)
5. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. doi: [10.1016/j.mfglet.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001)
6. Stankovic J. A. Research directions for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. Vol. 1(1). P. 3–9. doi: [10.1109/JIOT.2014.2312291](https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2312291)
7. Hashem I. A. T., et al. The rise of “Big Data” on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*. 2015. Vol. 47. P. 98–115. doi: [10.1016/j.is.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006)
8. Witten I. H., Frank E., Hall M. A. Data mining: Practical machine learning tools and techniques (4th ed.). Morgan Kaufmann. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780123748560/data-mining-practical-machine-learning-tools-and-techniques>
9. Buyya R., Vecchiola C., Selvi S. T. Mastering cloud computing. Morgan Kaufmann. 2013. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780124114548/mastering-cloud-computing>
10. Marz N., Warren J. Big Data: Principles and best practices of scalable real-time data systems. Manning Publications. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10279852/keywords#keywords>

11. Wang L., Törngren M., Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 37. P. 517–527. doi: [10.1016/j.jmsy.2015.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008)
12. Zhang Q., Chen M., Li L., Huang Y. Big data analytics for smart industrial systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14(4). P. 1530–1540.

BIG DATA TECHNOLOGY IN INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEXES

Demchyna M. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
King Danylo University
76018, Konovaltsya St., 35, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-9161-4843>
e-mail: mykolademchyna@gmail.com

Abstract. The article examines the features of data processing and storage in modern information and measuring complexes that operate in conditions of increasing volumes of measuring information and increased requirements for speed and reliability. The main requirements for data of information and measuring complexes are analyzed, in particular, regarding the volume, speed of receipt, structural diversity and reliability of measuring information. The classification of information and measuring complexes by purpose is presented and the characteristic types of data for each class are determined. The main data models used in Big Data technologies are considered, and the feasibility of their use in information and measuring complexes is substantiated, depending on the specifics of measuring processes. It is shown that the use of flexible and scalable data models provides effective integration, analysis and long-term storage of large arrays of measuring information. Special attention is paid to the possibility of comparing the obtained data with additional sources of information, including data from the Internet, which allows to increase the accuracy of analysis and forecasting. Examples of practical application of data models in control and measuring, diagnostic, monitoring and control complexes are also considered, which demonstrates their effectiveness in various applied tasks. The results obtained can be used in the design and modernization of information and measuring complexes with increased requirements for productivity and analytical capabilities.

Keywords: Big Data technology, information and measuring complex, data set, model, analysis, information flow.



Прийнято 22.07.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 620

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-32-40

СУЧАСНІ СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ОПАЛЕННЯ: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Нагірний В. І.

Національний університет «Львівська політехніка»

76013, вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна

<https://orcid.org/0009-0005-7825-8858>

e-mail: vasyi.i.nahirnyi@lpnu.ua

Анотація. У статті здійснено комплексний огляд сучасних сенсорних технологій, що застосовуються в автономних системах опалення, зокрема у двоконтурних конфігураціях, які поєднують контури опалення та гарячого водопостачання. Розглянуто основні типи температурних сенсорів – термістори, термопари типу ТССТ, цифрові датчики DS18B20, а також RFID-сенсори, які використовуються для дистанційного зчитування параметрів. Проаналізовано їхні конструктивні особливості, принципи роботи, діапазони вимірювань і вплив точності сенсорів на енергоефективність систем. Особливу увагу приділено питанню підвищення стабільності роботи теплообмінників і котлів, що безпосередньо залежать від точності та швидкодії температурного контролю. Окремо розглянуто проблеми, пов'язані з деградацією сенсорів унаслідок високотемпературних впливів, утворенням накипу на теплообмінних поверхнях, а також впливом вологості та електромагнітних завад на достовірність вимірювань. У роботі наведено аналітичний огляд методів компенсації похибок, калібрування сенсорів і застосування алгоритмів фільтрації даних. Розкрито можливості впровадження систем віддаленого моніторингу та управління температурними параметрами за допомогою бездротових технологій, зокрема протоколів Wi-Fi, Bluetooth та ZigBee. Такі рішення дозволяють здійснювати централізований контроль роботи котлів і теплообмінників, прогнозувати відмови та підвищувати надійність експлуатації системи загалом. Запропоновано практичні підходи до підвищення точності вимірювань і ефективності регулювання теплових процесів за рахунок використання інтелектуальних сенсорних пристроїв, здатних до самодіагностики та адаптації до змін робочого середовища. Проведене дослідження базується на аналізі технічних характеристик сенсорів, математичних моделей теплопередачі та принципів функціонування цифрових систем керування. Отримані результати мають прикладне значення для створення енергоефективних, надійних і адаптивних систем автономного опалення в житлових будівлях, спрямованих на зниження енергоспоживання та підвищення комфорту користувачів.

Ключові слова: двоконтурна система опалення, температурний контроль, термістор, ТССТ, RFID-сенсори, DS18B20, тепловий моніторинг.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку систем опалення зумовлюють необхідність впровадження новітніх технологій діагностики, контролю та оптимізації теплових процесів.

Інтелектуальні та гібридні системи, які використовують сенсори, мікроконтролери та цифрові алгоритми обробки даних, відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності та зменшення витрат ресурсів.

Запропоноване посилання: Нагірний, В. І. (2025). Сучасні сенсорні технології в системах автономного опалення: огляд і перспективи застосування. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 32-40. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-32-40

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

У ряді досліджень доведено, що ефективність котельного обладнання значною мірою залежить не лише від його конструктивних особливостей, а й від логіки керування та якості вимірювань температури. Використання стохастичних моделей, комбінованих гібридних систем та регресійного аналізу дозволяє точно передбачити поведінку теплоносія в умовах змінних зовнішніх параметрів.

Незважаючи на суттєвий прогрес, проблема стабільної та точної роботи температурних сенсорів в опалювальних системах, особливо у двоконтурних конфігураціях, залишається актуальною. Саме тому дане дослідження спрямоване на аналіз ефективності впровадження сенсорних елементів у структуру опалювальних систем із метою підвищення їх функціональності та надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку систем опалення зумовлюють необхідність впровадження новітніх технологій діагностики, контролю та оптимізації теплових процесів. Інтелектуальні та гібридні системи, які використовують сенсори, мікроконтролери та цифрові алгоритми обробки даних, відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності та зменшення витрат ресурсів.

У роботі [1] розглянуто перспективи переходу житлового фонду Великобританії з традиційних газових котлів на гібридні системи типу CoCo (Cognitive Computing). Ці системи поєднують газовий котел і повітряний тепловий насос у єдиному компактному пристрої. Автори моделюють роботу таких гібридних установок та аналізують, як алгоритми керування (контрольні стратегії CoCo) впливають на розподіл тепла між котлом і тепловим насосом, а отже, і на споживання енергії та рівень викидів CO₂.

Дослідження показало, що навіть при незмінній апаратній конфігурації, продуктивність системи значно залежить від логіки управління, яка визначає, коли саме тепло має постачатися від котла, а коли – від теплового насоса. Отже, не всі гібридні си-

стеми однаково ефективні, і цей аспект має бути врахований під час стандартизації, тестування та впровадження таких систем. Висновок авторів однозначний: ефективна стратегія керування – ключ до зниження споживання енергії та декарбонізації опалення.

Інше дослідження, представлене в роботі [2], зосереджене на аналітичному моделюванні роботи водогрійного газового котла у системах централізованого теплопостачання. Автори дослідили, як змінні зовнішні умови (зокрема температура навколишнього середовища і теплові навантаження) впливають на роботу котла, і запропонували математичну модель, що враховує ці фактори.

Використовуючи стохастичний підхід, вони побудували рівняння множинної лінійної регресії, яке описує залежність вихідної температури теплоносія від кількох параметрів: вхідної температури, витрати газу та температури навколишнього середовища. Модель була перевірена статистичними критеріями (t-критерій Стьюдента, F-критерій Фішера), що підтвердило її достовірність та практичну цінність.

Таким чином, обидва дослідження акцентують увагу на необхідності точного моніторингу температурних параметрів і оптимізації керування котельними системами. Це підтверджує важливість впровадження сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів, які здатні адаптивно реагувати на змінні умови роботи.

Незважаючи на суттєвий прогрес, проблема стабільної та точної роботи температурних сенсорів в опалювальних системах, особливо у двоконтурних конфігураціях, залишається актуальною. Саме тому дане дослідження спрямоване на аналіз ефективності впровадження сенсорних елементів у структуру опалювальних систем із метою підвищення їх функціональності та надійності.

Постановка проблеми. У сфері систем опалення зберігається кілька проблем, які впливають на їх ефективність і функціональність. Одним із критичних питань є підтримання оптимальної температури те-

плоносія через проблему з накопиченням на стінках теплообмінників так званого накипу, у вигляді карбонатів, що може погіршити їх роботу. Іншою проблемою є продуктивність термісторів на теплообмінниках. Ці сенсори мають вирішальне значення для точного вимірювання температури. Іонізаційні електроди, що використовуються для контролю полум'я в газових котлах, представляють свої проблеми. Під час запуску котла часто виникають проблеми, які можуть вплинути на процес розпалювання та стабільність полум'я. Нарешті, сучасні системи опалення все частіше пропонують користувачам можливість контролювати кімнатну температуру за допомогою стаціонарних регуляторів, а також додатків для смартфонів. Ця функція заснована на сенсорах температури, встановлених на радіаторах або в різних частинах кімнати. Точність і чутливість цих сенсорів життєво важливі для ефективного керування температурою та зручності користувача.

Мета роботи – аналіз та оцінка ефективності впровадження сучасних сенсорних технологій у структуру автономних систем опалення з метою підвищення точності температурного моніторингу, енергоефективності та надійності роботи теплових приладів, зокрема в умовах змінних зовнішніх параметрів і навантажень.

Викладення основного матеріалу дослідження. Двоконтурна система опалення складається з двох окремих контурів. Як правило, один контур призначений для забезпечення опалення приміщення (наприклад, нагріву радіаторів або теплої підлоги), а інший контур використовується для гарячого водопостачання (наприклад, підігріву води тощо). Це налаштування дозволяє системі незалежно контролювати та керувати потребами для опалення приміщень і нагріву води, забезпечуючи ефективно та одночасне постачання обох.

Для порівняння використаємо триконтурні системи опалення.

Триконтурна система опалення, як впливає з назви, складається з трьох окремих контурів. Вони можуть бути налашто-

вані різними способами залежно від конкретних вимог будівлі чи застосування. Наприклад, один контур може бути призначений для опалення радіаторів, другий – для теплої підлоги, а третій – для гарячої води. Крім того, у більших або складніших установках один контур може обслуговувати опалення для певної зони або ділянки будівлі (наприклад, окремої квартири), інший для іншої зони, а третій для гарячого водопостачання. Такі системи, як правило, є складнішими за двоконтурні системи, пропонуючи більшу гнучкість у тому, як опалення розподіляється та контролюється між різними зонами чи функціями. До того ж, триконтурна система забезпечує кращий контроль за різними зонами або функціями опалення, дозволяючи точніше керувати температурою та споживанням енергії в різних частинах будівлі. Однак описані переваги є виправданими лише за умови, що системи опалення використовуватимуться у великих або складніших будівлях, де наявні кілька зон або окремі потреби в опаленні (наприклад, різні поверхи або великі приміщення) потребують окремого керування. У іншому випадку, двоконтурні системи виявляються простішим рішенням та є поширеними в житлових приміщеннях, де опалення та гаряча вода є основними потребами.

Фокусом поточного дослідження є системи, які поєднують структурні особливості котлів, використовуваних у домашніх умовах, та теплових електронних насосних систем. Комбіновані котли забезпечують як опалення приміщень, так і миттєве виробництво гарячої води в одному приладі без окремого бака для гарячої води. Таким чином, вони компактніші, дешевші та швидші в установці, ніж традиційні системні котли з резервуарами для гарячої води. Миттєва гаряча вода є корисною для енергоефективності, з точки зору уникнення втрат тепла з накопичувального баку, але неефективність комбінованих втрат та обмежений діапазон модуляції може негативно вплинути [3] на ефективність.

Забруднення теплообмінника є основною проблемою для експлуатації котлів. Ця проблема викликана накопиченням ка-

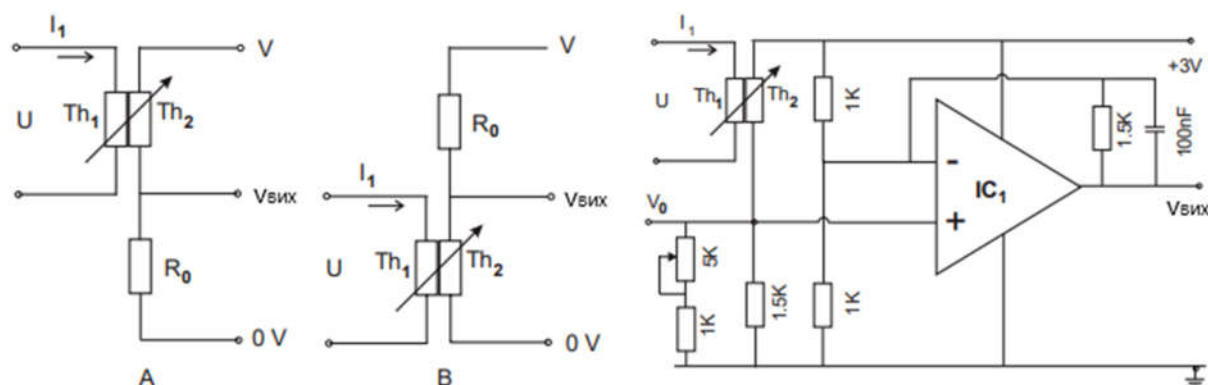


Рисунок 1 – Схема роботи термістора з термічною мікросхемою [6] (ТССТ)

рбонатних відкладень на внутрішніх поверхнях теплообмінників з часом [4]. Першим наслідком є зменшення теплопродукції через втрату тепловіддачі і, нарешті, зупинка котла через засмічення. Більша частина забруднень складається з дрібних частинок, які походять від реакцій випаровування лужних металів та реакцій відновлення переважно сіркою, хлором і вуглецем. Температура є найбільш часто вимірюваною величиною. Вимірювання температури може здійснюватися як за допомогою прямого контакту з джерелом тепла, так і дистанційно – шляхом використання випромінюваної енергії. RTD-сенсори (термометри опору) забезпечують високу точність і стабільність, що робить їх придатними для точних вимірювань. Термістори, зі свого боку, вирізняються високою чутливістю та швидкою реакцією на зміни температури.

Основу температурних сенсорів у котлових системах складають напівпровідникові типи резисторів – термістори. Термістори класифікуються за типом провідності. Термістори з негативним температурним коефіцієнтом [5] (NTC–Negative-temperature-coefficient) мають менший опір при вищих температурах, тоді як термістори з позитивним температурним коефіцієнтом (PTC–Positive-temperature-coefficient) мають більший опір при вищих температурах. Вони часто застосовуються для вимірювання та контролю температури завдяки високій чутливості та точності. Крім того, вони мають широкий діапазон робочих температур і випускаються в різних розмірах та конструкціях, що дозволяє адаптувати їх під конкретні вимоги проєкту. Маленький

розмір і швидка реакція на зміну температури роблять їх придатними для застосувань, де важливі просторові обмеження та час реагування. Оскільки опір термісторів NTC зменшується зі збільшенням температури, що сприяє моніторингу та контролю температури в системі котла, то вони найчастіше використовуються у таких системах. Для визначення придатності або непридатності термісторів на теплообмінниках, їх правильної роботи та необхідності ранньої заміни, застосування пристрою термістора з термічною мікросхемою [6] (ТССТ – thermally coupled chip thermistor) є рішенням вибору. Пристрій ТССТ працює через два термістори Th1 і Th2, де Th1 самонагрівається, а Th2 діє як теплоприймач. Вихідний опір, який змінюється залежно від температури та напруги, є ключовим для моніторингу продуктивності термістора та виявлення потенційних проблем.

Пристрій налаштовується за модифікованою мостовою схемою, як показано на рисунку 1, де вихідна напруга ($V_{вих}$) залежить від різниці температур між Th1 і Th2. Струм самонагрівання I_1 в Th1 генерує тепло P_1 , яке передається Th2, тим самим впливаючи на його опір R_2 і вихідну температуру T_2 . Це співвідношення дозволяє перетворювати температуру та потужність у сигнали напруги, які можна використовувати для моніторингу роботи термістора.

Стабільність струму самонагрівання є критичною для забезпечення належної роботи термістора. Критерії стабільності застосовуються, щоб гарантувати, що тепло, яке виділяється, знаходиться в балансі з теплом, що розсіюється. Будь-яке відхи-

лення від цього балансу може свідчити про проблеми з терморезистором, такі як старіння, деградація матеріалу або зовнішні впливи, що вимагатиме завчасної заміни.

Теплові характеристики ТССТ можна повністю зрозуміти, проаналізувавши динаміку теплопередачі в системі. Це передбачає перевірку вхідної потужності, що подається на термістори, передачу тепла через епоксидний інтерфейс, який з'єднує термістори, і розсіювання тепла в навколишнє повітря. Ключовим параметром є різниця температур між двома термісторами, ΔT , яка відображає ефективність теплового зв'язку між ними. Цей зв'язок відіграє вирішальну роль в оцінці продуктивності та придатності термісторів для точного вимірювання температури.

Потужність, що подається на термістор і перетворюється на тепло, визначається за формулою:

$$P_{\text{вх}} = I^2 \times R,$$

де I – струм через термістор, а R – його опір.

Швидкість теплопередачі через епоксидну поверхню описується законом Фур'є:

$$Q_t = k \times A \times \frac{(T_{h1} - T_{h2})}{d},$$

де k позначає теплопровідність епоксидної смоли, A – площу поперечного перерізу теплопередачі, T_{h1}, T_{h2} – температури з двох сторін термістора, d – товщину епоксидного шару.

Швидкість розсіювання тепла в навколишнє повітря можна описати конвективним теплообміном:

$$Q_d = h \times A \times (T_{h1} - T_{\text{пов}}),$$

де h – коефіцієнт конвективної теплопередачі, A – площа поверхні, яка піддається впливу повітря, $T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря.

На практиці пристрій ТССТ можна використовувати для керування перетворювачами змінного/постійного струму малої потужності шляхом моніторингу вхідної потужності P_1 як функції вихідної температури T_2 . Аналізуючи термічну поведінку та стабільність пристрою, можна визначити, чи правильно працюють термістори, чи наближаються до кінця терміну своєї служби, тому потребують заміни.

Таким чином, пристрій ТССТ пропонує метод постійного моніторингу продуктивності термісторів на теплообмінниках. Аналізуючи співвідношення “температура-напруга” та “потужність-напруга”, а також забезпечуючи стабільність струму самонагрівання, можна визначити придатність термісторів для подальшого використання або виявити необхідність ранньої заміни, таким чином забезпечуючи надійну роботу теплообмінної системи.

Однією з можливих технологій, що лежать в основі сучасних систем контролю температури в будівлях, є використання бездротових сенсорів температури в поєднанні з додатками для смартфонів. Ця технологія дозволяє користувачам автоматично, або вручну регулювати параметри температури в окремих кімнатах будівлі, забезпечуючи оптимальний комфорт і ефективне використання енергії.

Центральним компонентом цієї системи є сенсор температури, який можна стратегічно розмістити на радіаторах або в певних частинах кімнати. Ці сенсори постійно контролюють температуру навколишнього середовища та передають дані на центральний контролер, часто інтегрований у додаток для смартфона. Додаток служить інтерфейсом, що дозволяє користувачеві встановлювати бажані температури для різних приміщень і регулювати їх віддалено з будь-якого місця, маючи доступ до мережі інтернет.

На відміну від традиційних термостатів, ці системи забезпечують більш детальний контроль, дозволяючи регулювати температуру в кожній кімнаті, а не для всієї будівлі. Сенсори здатні виявляти навіть незначні зміни температури, які потім передаються в програму в реальному часі.

Зв'язок між сенсорами температури та додатком на смартфоні зазвичай здійснюється за допомогою бездротових протоколів, таких як Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee. Вибір протоколу зв'язку залежить від конкретних вимог системи, таких як діапазон, споживання енергії та швидкість передачі даних. Сенсори температури, які використовуються в цих системах, розроблені таким чином, щоб бути енергоефективними,

часто працюючи від акумулятора протягом тривалого часу. Це досягається шляхом оптимізації роботи сенсора для мінімізації споживання енергії, що передбачає передачу даних лише у разі значної зміни температури, або коли користувач запитує оновлення.

У наступному дослідженні [7] використовуються високочастотні сенсори RFID, які передають і отримують як енергію, так і дані за допомогою індуктивного зв'язку, що досягається через змінне магнітне поле між котушковими антенами зчитувача та мітки. Змінне магнітне поле генерується контуром резонансного бака, що складається з котушки індуктивності та конденсатора.

У системі RFID, призначеній для дистанційного контролю температури котла, RFID-мітки оснащені сенсорами температури [8]. Зчитувач RFID не тільки спілкується з мітками, але й контролює дані про температуру, які надсилаються цими мітками. Дані про температуру кодуються у відповідь мітки та надсилаються на зчитувач.

У системі використовується протокол RTF (reader-talks-first), за яким зчитувач ініціює передачу даних перед отриманням відповіді від ключових міток. У цьому протоколі використовується амплітудна модуляція з кодуванням позиції імпульсу на каналі зв'язку "зчитувач-мітка". Індекс модуляції становить 10%, а передача даних відбувається за схемою імпульсного кодування 1 позиції з 256 можливих. Стартовий імпульс 9,44 мкс сигналізує демодулятору RFID-мітки про те, що передається нова послідовність даних. Кожен біт даних має тривалість 18,88 мкс, а вся послідовність команд, що складається з 8 байтів, передається за 38,7 мс. Резонансна частота розраховується наступним чином:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}},$$

L_1 і C_1 утворюють резонансний контур бака для передачі енергії з резонансною частотою f_0 , зазвичай 13,56 МГц для високочастотних RFID.

Індуктивна напруга антени мітки прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Ψ через котушки, яка може бути виражена як:

$$v_2 = \frac{d\Psi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left[\int B \cdot dS \right],$$

де N_2 та N_1 – кількість витків у котушках мітки та зчитувача відповідно, Φ – магнітний потік через кожен котушку, B – магнітна індукція, а S – площа котушки. Для кута між B і S , що дорівнює 0° , v_2 можна обчислити як:

$$v_2 = \left[\frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt},$$

де M – коефіцієнт взаємної індуктивності. Напруга може бути оброблена за допомогою схеми випрямляча та регулятора для живлення мікросхеми RFID і модуля датчика температури для збору та передачі даних.

Температурні сенсори відіграють вирішальну роль у підтриманні оптимальних умов, підвищенні ефективності та забезпеченні надійності різноманітних систем, зокрема і систем опалення.

На рисунку 2 зображено попередньо підключена та водонепроникна версія сенсора DS18B20. [9]. Вона особливо зручна у випадках, коли потрібно вимірювати температуру на відстані або в умовах підвищеної вологості. Сам сенсор здатний працювати при температурах до 125°C .

Завдяки цифровому інтерфейсу ми не втрачаємо сигналу, навіть при використанні на великих відстанях. Ці цифрові температурні сенсори з однією лінією зв'язку досить точні ($\pm 0,5^\circ\text{C}$ – у більшості діапазону) та можуть забезпечити до 12-бітної точності завдяки вбудованому в сенсор цифро-аналоговому перетворювачу.

Даний сенсор чудово працює з будь-яким мікроконтролером, що використовує лише один цифровий пін, і, навіть, дозволяють підключати декілька сенсорів до одного виводу. Кожен сенсор має унікальний 64-бітний ідентифікатор, який записано на заводі для його розпізнавання. Працюють від живлення в діапазоні від 3.0 до 5.0 В.

Сенсор DS18B20 сумісний з Arduino (5 В) та ESP8266 (3,3 В). Однією з великих переваг цього пристрою є можливість монтажу на значній відстані від плати мікроконтролера – щонайменше до 20 метрів.

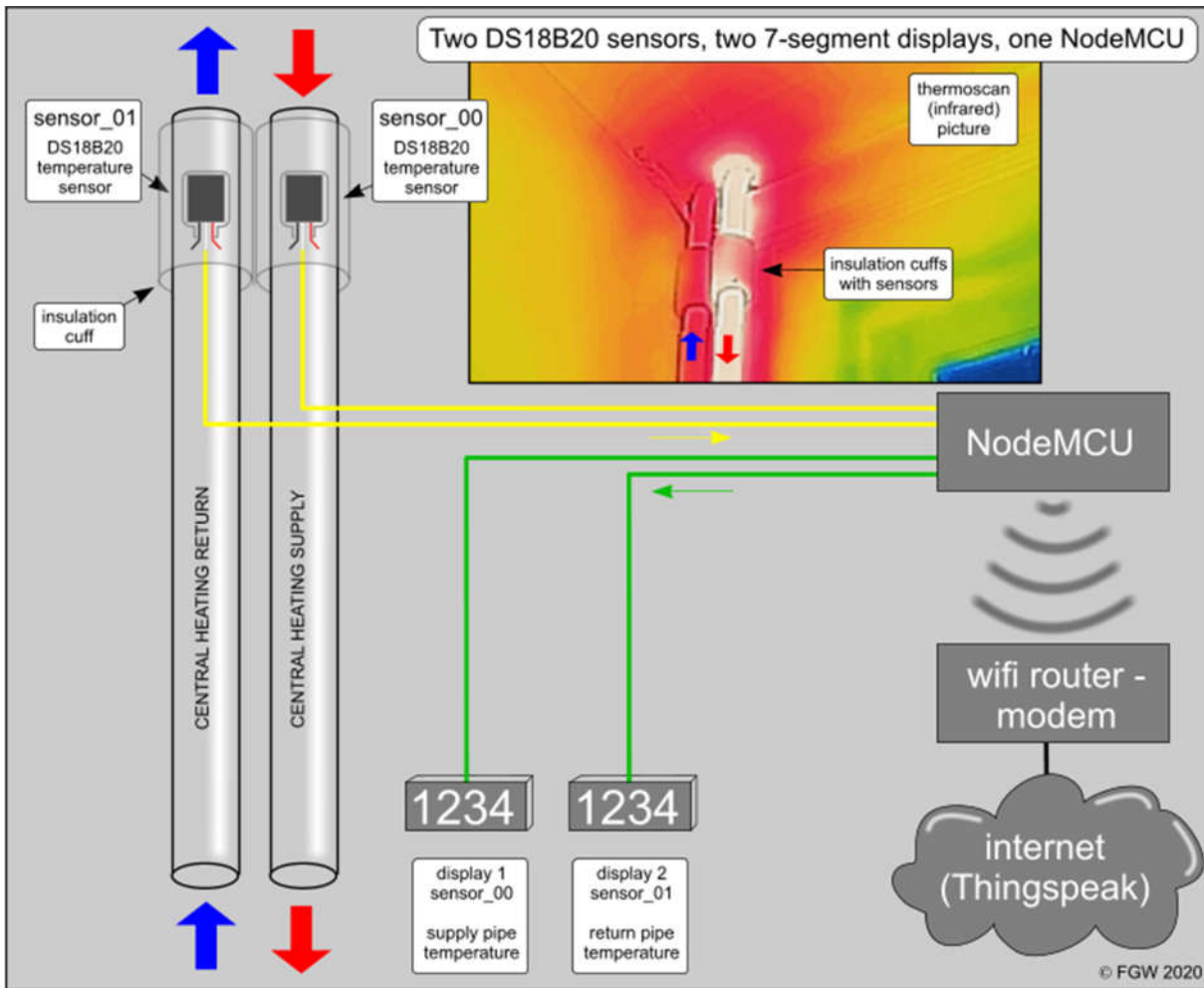


Рисунок 2 – Схема підключення сенсора DS18B20

Інші сенсори, наприклад ті, що використовують протокол I2C, мають бути встановлені значно ближче до мікроконтролера. Ця дальність з'єднання є критично важливою, оскільки сенсори встановлюються на трубах, розташованих на певній відстані від плати NodeMCU та постійного джерела живлення.

Фактично, живлення 5 В DC (через micro USB роз'єм) для NodeMCU подається від Wi-Fi роутера, що дозволяє уникнути використання окремої розетки 230 В AC та адаптера живлення.

Відстань у 5 метрів між температурними сенсорами та мікроконтролером перекривається за допомогою трижильного кабелю: живлення, дані та земля (GND). На обох кінцях лінії даних встановлені підтягуючі резистори: 6,8 кОм на боці DS18B20 та 4,7 кОм на боці NodeMCU. Значення резистора 6,8 кОм було підібране емпірично.

Для роботи сенсора DS18B20 у звичайному режимі необхідне трипровідне або трипровідне з'єднання [10]. У цьому режимі вивід VCC датчика підключається до джерела живлення 5 В.

На рисунку 3 показано схему підключення сенсора DS18B20 до Arduino у звичайному режимі.

Отже, термістори NTC (з негативним температурним коефіцієнтом), так і температурні сенсори DS18B20 можуть бути обрані для різних потреб залежно від їхніх технічних.

Висновки

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних сенсорних технологій, що використовуються в автономних системах опалення, з акцентом на температурні сенсори, їх точність, надійність і вплив на ефективність теплових процесів. Доведено, що

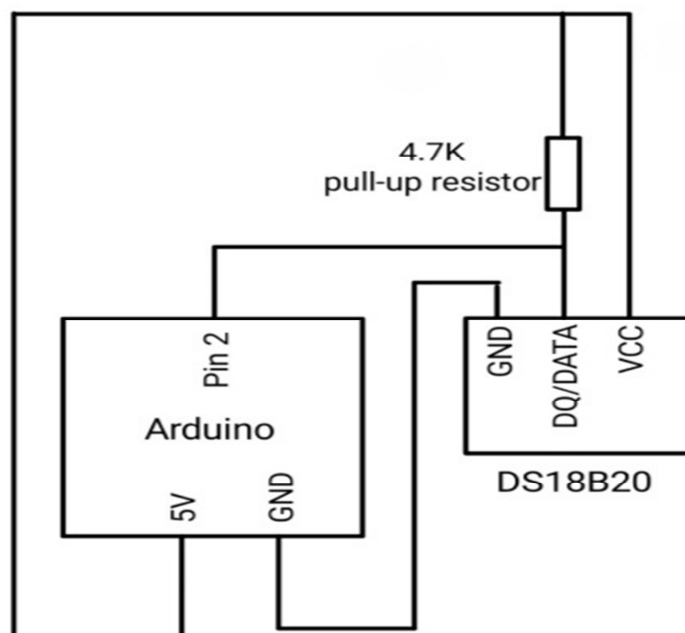


Рисунок 3 – Схема підключення сенсора DS18B20 до Arduino

вибір і правильне застосування сенсорів (зокрема термісторів NTC, ТССТ-модулів, цифрових сенсорів DS18B20 та RFID-технологій), є критичним для забезпечення стабільної роботи котлів, точного контролю температури та своєчасного реагування на зміну теплових умов.

Особливу увагу приділено аналізу проблем, пов'язаних з деградацією термісторів, утворенням накипу на теплообмінниках та точністю вимірювань у двоконтурних системах. Продемонстровано доцільність використання бездротових систем моніторингу з дистанційним керуванням температурою за допомогою мобільних застосунків, що відкриває нові можливості для автоматизації опалення в житловому секторі.

Отримані результати вказують на те, що впровадження інтелектуальних сенсорних рішень дозволяє не лише покращити контроль за тепловими параметрами, а й оптимізувати енергоспоживання, підвищити безпеку експлуатації та продовжити ресурс систем опалення. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на адаптивних алгоритмах обробки сенсорних даних, моделюванні теплових навантажень і інтеграції сенсорів в розумні енергосистеми.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Bennett G., Watson S., Wilson, Oreszczyn T. Domestic heating with compact combination hybrids (gas boiler and heat pump): A simple English stock model of different heating system scenarios. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021. Vol. 43. Issue 2. P. 143-159. doi:[10.1177/01436244211040449](https://doi.org/10.1177/01436244211040449)
2. Snurnykov D., Krasnikov I., Babichenko A. Study of a District Heating System Water Boiler as a Object of Control. *Integrated Technologies and Energy Saving*. 2023. Vol. 1. P. 51-61. doi:[10.20998/2078-5364.2023.1.06](https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.1.06)
3. Bennett G., Elwell C. Effect of boiler oversizing on efficiency: a dynamic simulation study. *Building Serv Eng Res Technol*. 2020. №41(6). P. 709–726. doi: [10.1177/0143624420927352](https://doi.org/10.1177/0143624420927352)

4. Kazi S. Fouling and fouling mitigation of calcium compounds on heat exchangers by novel colloids and surface modifications. *Reviews in Chemical Engineering*. 2020. Vol. 36. Issue 6. P. 653-685. doi: [10.1515/revce-2017-0076](https://doi.org/10.1515/revce-2017-0076)
5. Anastase A., Tarlea G. Thermistor NTC Sensor Inaccuracies Impact On The HVAC/R Compressor Performance. *CLIMA 2022 Conference*. 2022. doi:[10.34641/clima.2022.110](https://doi.org/10.34641/clima.2022.110)
6. Bodić M., Aleksić S., Rajs V., Damjanovic M., Kisić M. Thermally Coupled NTC Chip Thermistors: Their Properties and Applications. *Sensors*. 2024. Vol. 24. 3547 p. doi:[10.3390/s24113547](https://doi.org/10.3390/s24113547)
7. Preradovic S., Karmakar N.C. RFID tag as a sensor: A review on RFID sensor networks. *IEEE Sensors Journal*. 2010. Vol.10(11). P. 1743–1756. doi:[10.1109/JSEN.2010.2051437](https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2051437)
8. Liu Y., Wang J., Zhang L. RFID integration into a low-power sensor platform for temperature monitoring. *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Sensor Networks*. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/319347409_RFID_Integration_into_a_Low_Power_Sensor_Platform
9. The Solar Universe. Waterproof version of the DS18B20 sensor: digital accuracy and Arduino compatibility. URL: <https://thesolaruniverse.wordpress.com/2020/02/01/1019>
10. ElProCus. (n.d.). DS18B20 Waterproof Temperature Sensor – Working and Its Applications. 2025. URL: <https://www.elprocus.com/ds18b20-waterproof-temperature-sensor>

MODERN SENSOR TECHNOLOGIES IN AUTONOMOUS HEATING SYSTEMS: REVIEW AND APPLICATION PROSPECTS

Nahirnyi V. I.

Postgraduate Student

Lviv Polytechnic National University

76013, S.Bandery St., 12, Lviv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0005-7825-8858>

e-mail: vasyli.nahirnyi@lpnu.ua

Abstract. The article presents a comprehensive review of modern sensor technologies used in autonomous heating systems, particularly in dual-circuit configurations that combine heating and domestic hot water supply circuits. The main types of temperature sensors – thermistors, TCCT thermocouples, digital DS18B20 sensors, and RFID sensors used for remote parameter acquisition – are examined. Their design features, operating principles, measurement ranges, and the influence of sensor accuracy on the overall energy efficiency of heating systems are analyzed. Special attention is paid to improving the operational stability of heat exchangers and boilers, which directly depend on the precision and response speed of temperature control. The study also addresses issues related to sensor degradation caused by high-temperature exposure, scale formation on heat exchange surfaces, and the impact of humidity and electromagnetic interference on measurement reliability. An analytical overview of error compensation methods, sensor calibration techniques, and data filtering algorithms is provided. The article explores the potential for implementing remote temperature monitoring and control systems based on wireless technologies, including Wi-Fi, Bluetooth, and ZigBee protocols. These solutions enable centralized supervision of boiler and heat exchanger performance, facilitate fault prediction, and enhance overall system reliability. Practical approaches are proposed to improve measurement accuracy and optimize thermal process control through the use of intelligent sensor devices capable of self-diagnosis and adaptation to changing operating conditions. The research is grounded in the analysis of sensor technical specifications, heat transfer models, and the functional principles of digital control systems. The obtained results have practical significance for the development of energy-efficient, reliable, and adaptive autonomous heating systems for residential buildings, aimed at reducing energy consumption and enhancing user comfort.

Keywords: dual-circuit heating system, temperature control, thermistor, TCCT, RFID sensors, DS18B20, thermal monitoring.



Методи і засоби неруйнівного контролю

Прийнято 17.12.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

UDK 620.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-41-49

WIRELESS INFORMATION TRANSMISSION TECHNOLOGIES IN AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS

Nechai I. B.

Postgraduate Student

National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine

03041, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0006-741-7394>

e-mail: i.nechai@nubip.edu.ua

Lutsak D. L.

Senior Lecturer

King Danylo University

76018, 35 Konovalts St., Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9496-3542>

e-mail: d.l.lutsak@gmail.com

Demidov I. A.

Postgraduate Student

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

54007, 9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0002-7245-6907>

e-mail: Admildemidov@gmail.com

Bilyuk I. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

54007, 9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-1654-7468>

e-mail: ivan.bilyuk@nuos.edu.ua

Запропоноване посилання: Nechai, I. B., Lutsak, D. L., Demidov, I. A., Bilyuk, I. S. & Zivenko, O. V. (2025). Wireless information transmission technologies in automated non-destructive testing systems. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 41-49. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-41-49

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Zivenko O. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
54007, 9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1539-8360>
e-mail: oleksii.zivenko@nuos.edu.ua

Abstract. The article presents an analysis of modern wireless information transmission technologies and their application in automated non-destructive testing (NDT) systems. The main wireless protocols used in industry are considered, in particular Bluetooth, Wi-Fi, UWB, GPRS, as well as the latest solutions for distributed sensor networks of the new generation. Each technology is evaluated according to the criteria of range, data transfer rate, power consumption and resistance to interference, which allows determining their feasibility for various types of non-destructive testing, including monitoring the condition of metal structures, pipelines, tanks, aviation and shipbuilding elements, as well as equipment of nuclear and chemical enterprises. Considerable attention is paid to wireless network topologies, among which point-to-point, star, multi-cell (mesh) and ring are considered. A comparison of their characteristics in terms of reliability, scalability, configuration complexity and integration efficiency into industrial facilities is presented. In the context of NDT, topologies determine not only the efficiency of data transmission, but also the ability of the network to provide fault tolerance and continuous monitoring of critical objects, where loss of communication even for a short time can lead to unreliable assessment of the technical condition. The article shows that the correct combination of modern technologies and appropriate topology allows you to create scalable, reliable and energy-efficient NDT systems that can provide timely detection of defects, predict the condition of materials and structures, and increase the safety of production processes. In addition, the use of wireless networks simplifies the organization of remote monitoring, reduces the need for physical access to objects and allows you to integrate data from various sources into diagnostic systems.

Keywords: non-destructive testing, star topology, wireless data transmission, parameter measurement, data acquisition system.

Introduction

The development of modern industrial sectors, such as aviation, chemical, oil and gas processing, coal and metallurgy, as well as the intensive improvement of vehicles, is accompanied by a constant increase in the technical complexity of production processes [1]. With the emergence of new technologies related to the processing of gases, liquids and solids in difficult and extreme conditions (high temperatures, pressure, humidity, aggressive environments, radiation exposure), there is a need to improve safety control systems and equipment reliability [2].

Modern industry requires not only the creation of new technological means for monitoring and controlling processes, but also the development of high-precision analytical equipment, modern sensors and materials that have unique physicochemical properties, resistance to extreme conditions and versatility of application [3]. This need is especially acute in areas of increased risk: during the operation of large-capacity aircraft, supertankers, main oil and gas pipelines (including those located on the seabed), nuclear power

plants, as well as other critical infrastructure facilities [4]. The probability of man-made accidents at such facilities is largely determined by the level of development and efficiency of non-destructive testing (NDT) systems [5].

That is why one of the key tasks of modern science and technology is to create a perfect, technologically diverse complex of NDT technologies and tools based on the achievements of physics, chemistry, materials science, electronics and information technologies [6]. The development of such systems ensures timely detection of defects, prediction of the state of materials and structures, and also guarantees safe and efficient operation of complex technical systems in all industries [7].

Given the increasing requirements for the speed of data acquisition and analysis, the use of wireless technologies for transmitting information in NDT systems is becoming increasingly relevant. The use of wireless communication channels in non-destructive testing opens up the possibility of creating mobile, autonomous and distributed monitoring

systems capable of transmitting measurement results in real time [8]. This is especially important for monitoring objects located in hard-to-reach or dangerous areas, for example, oil and gas pipelines, tanks, nuclear power units, aviation and shipbuilding structures, where laying wired connections is technically difficult or economically unjustified.

Thanks to the development of modern wireless technologies, such as Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRaWAN, 5G, NB-IoT, the transmission of large amounts of data with high speed, low latency and stable communication quality is ensured even in difficult operating conditions. This allows integrating NK sensors into intelligent technical condition monitoring systems, creating sensor networks (Wireless Sensor Networks, WSN) and implementing the concept of the Internet of Things (IoT) in the field of quality control and safety [7].

The use of wireless technologies helps to increase the efficiency of data processing, simplifies the organization of remote monitoring and reduces the need for physical access of personnel to controlled objects, which increases the safety of service. In addition, it provides the possibility of centralized collection, storage and analysis of information, which is crucial in building intelligent systems for diagnostics and forecasting the condition of equipment.

The aim of the work is to identify key technical means of automated information exchange between measurement objects.

Types of wireless sensor network technologies

Currently, the most common wireless data transmission technologies in the industrial environment are Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, GPRS, etc. [9]. Typically, such systems are used in separate areas of production to perform highly specialized tasks - collecting telemetry, transmitting data from sensors, monitoring process parameters, etc. [10]. Fig. 1 presents possible areas of application of such technologies.

However, with the acceleration of the development of technologies for the extraction and processing of raw materials, there is a need for a wider implementation of wireless networks in automated control systems, in particular in the field of non-destructive testing [11]. This opens up opportunities for optimizing technological processes, increasing the efficiency of decision-making, and ensuring stable product quality at all stages of production.

Bluetooth is an industry specification for short-range wireless personal area networks. It enables data exchange between devices over a publicly available and free radio frequency range of up to 50 m (the actual distance

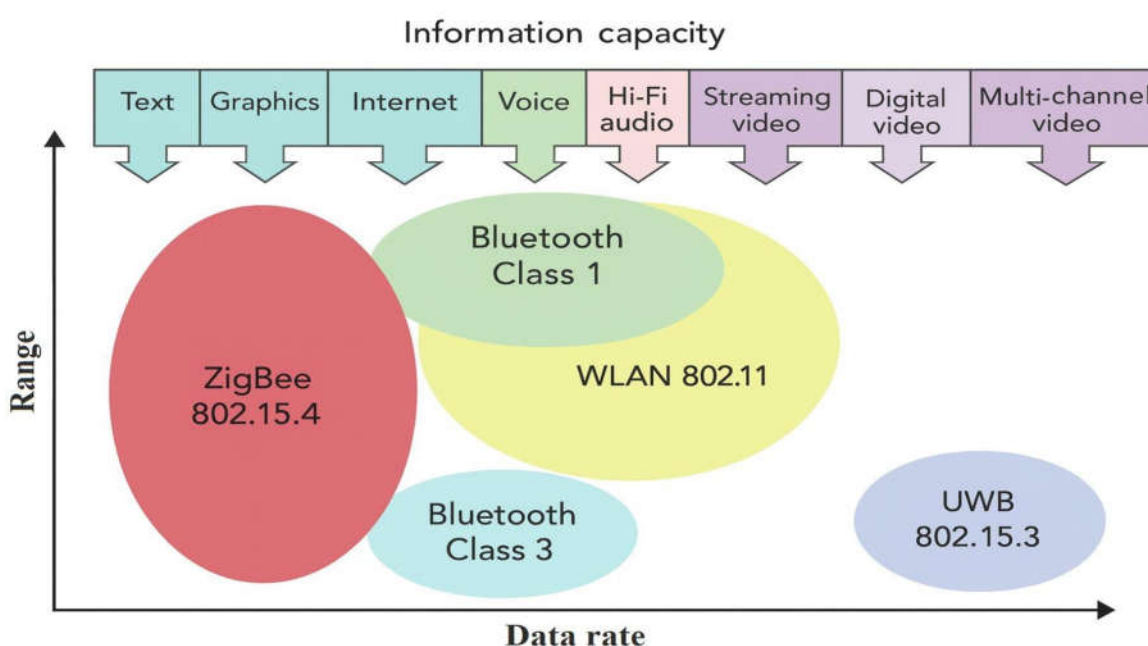


Figure 1 – Classification of some wireless standards

depends on physical obstacles in the signal path). Bluetooth operates in the ISM (Industry, Science and Medicine) band of 2.4–2.4835 GHz, which is unlicensed and widely used in everyday life and [12]. Bluetooth uses the FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) method, which is a hopping modification of the carrier frequency.

Typical data transfer rate is 1 Mbps, packet size is 8–27 bytes. Due to its low power consumption, Bluetooth is used for sensors, portable NDT devices, and mobile measurement systems.

Wi-Fi is a wireless local area network technology that is widely used in automated monitoring systems. Although it is not yet supported by many manufacturers in the industrial market, there are specialized solutions, in particular from Siemens Automation & Drives, that operate according to the IEEE 802.11g standard in the 2.4 GHz band. Wi-Fi is capable of providing speeds of up to 54 Mbps at distances of up to 300 m, although the actual range depends significantly on interference and obstacles.

The technology is developing rapidly. One of the promising directions has been the implementation of the IEEE 802.22 standard, which allows: to transmit data at speeds up to 22 Mbps, to operate at distances up to 100 km from the transmitter. This opens up opportunities for using Wi-Fi in large, geographically distributed control systems.

WiMAX is a telecommunications technology for providing broadband wireless communication over long distances. It is based on the IEEE 802.16 (Wireless MAN) standard and includes: base stations, subscriber stations, network equipment for their connection to the provider and the Internet. The 1.5–11 GHz range is used for station interaction.

Under favorable conditions, the speed can reach 70 Mbps, and there is no need for direct visibility between the station and the receiver. The coverage area is several tens of kilometers, but for operation it is necessary to obtain a license to use the appropriate frequencies. WiMAX is suitable for creating regional or inter-site monitoring systems in the NDT.

GPRS is a superstructure of GSM mobile communication technology, which provides packet data transmission. The principle of operation of GPRS resembles the operation of the Internet: data is divided into packets, transmitted along independent routes and collected in receiving devices. When establishing a connection, each device receives a unique address, which actually makes it an analogue of a server. Advantages of GPRS: transparent work with the TCP/IP protocol, the ability to integrate into the Internet, coverage of large mobile communication areas. The maximum speed is up to 171.2 Kbit/s, and the operating area is limited to the coverage of the mobile operator. These technologies are summarized in Table 1.

New wireless technologies and their importance for automated non-destructive testing systems. The development of industry and the increasing requirements for monitoring efficiency have led to the emergence of new wireless solutions capable of operating in extreme conditions and transmitting large amounts of data with high accuracy. Modern wireless technologies that are actively implemented in automated non-destructive testing systems include LoRaWAN, NB-IoT, 5G and new generation UWB. LoRaWAN provides data transmission over a distance of up to 15–20 km with very low power consumption, which makes it ideal for distributed sensor networks of NDT over large areas. NB-IoT (Narrowband IoT) uses the infrastructure of cellular networks and supports thousands of sensors on a single base station, ensuring reliable operation in rooms, mines and underground tunnels. 5G is characterized by ultra-low latency – less than 1 ms, high bandwidth up to gigabits per second and support for networks with very high sensor density (mMTC), which makes it a promising solution for real-time, in particular for monitoring aerospace or nuclear facilities. The new generation UWB provides high positioning accuracy up to 10 cm and immunity to interference, which allows it to be used for zonal monitoring of structures and control of equipment movement.

Table 1 – Comparison of Wireless Communication Standards

Standard	802.15.4 ZigBee™			802.15.1 Bluetooth	802.15.3a* UWB	802.11b Wi-Fi
Applications	Monitoring, control, sensor networks, home/industrial automation			Voice, data, cablereplacement	Streaming media, audio/video system cable replacement	Data, video, LAN
Advantages	Price, energy savings, network size, less crowded bands	Price, energy savings, network size, global range		Price, energy - savings, voice transmission, frequency hopping	High speed, energy saving	Speed, flexibility
Frequency, GHz	0.868	0.915	2.4	2.4	3.1 - 10.6	2.4
Max speed	20 kbps	40 kbps	250 kbps	1 Mbps	110 Mbps (Yum), 200 Mbit/s (4 m) (additional 480 Mbit/s)	11 Mbps
Output power (nom.), dBm	0			0 (class 3) 4 (class 2) 20 (class 1)	<20 (110Mbps) <24 (200Mbps)	20
Range, m	10-100			10 (class 3) 100 (class 1)	10 (110Mbps) 4 (200Mbps)	100
Sensitivity (specification, dBm)	92		-85	-70	-	-76
Stack size, KB	4-32			>250	-	> 1000
Battery life, days	100- 1000+			1-7	theoretically more than 1000	0.5-5
Network size	65536 (16-bit addresses), 264 (64-bit addresses)			master +7	up to 127 per host	32

Types of sensor network topologies

The basis of the functioning of wireless networks is their topology and architecture, which determine the interaction between sensors, transmitters, receivers and computing modules. In addition, important characteristics of such networks are speed, power consumption, reliability, immunity to interference and security of transmitted data – especially in conditions of industrial facilities with increased danger.

When designing a wireless network, it is necessary to take into account the volume of data generated by sensors, the number and types of nodes, the scalability of the system, as well as the requirements for the speed and stability of information transmission. An important factor is the choice of the optimal topology, which determines the structure of the interconnections between the elements of the system. In the context of wireless, the topology describes not cable connections, but a logical scheme for organizing data flows – for example, a star, mesh, tree or hybrid structure.

Properly selected wireless network topology and architecture allow for the creation of highly efficient, mobile, and fault-tolerant NDT systems capable of providing continuous NDT in real time.

One of the simplest and most common structures for organizing wireless networks in non-destructive testing systems is the Point-to-Point topology. In this configuration, the network consists of only two devices, between which a direct data exchange channel is established. Both nodes, as a rule, are equal, which makes the network peer-to-peer and simplifies the process of information exchange.

The point-to-point topology is typical for many wireless technologies that are widely used in industrial monitoring systems. Among them: Bluetooth, ANT, RFID, RuBee, PDC, Wi-Fi, Insteon, UWB, ZigBee and other short and medium range standards. These technologies allow you to quickly organize data transmission between the sensor and the receiving module, especially in cases where the

monitored object has a complex geometry or is located in a hard-to-reach place.

The Star Network topology is one of the basic structures for organizing modern wireless and wired networks, providing high flexibility, scalability and reliability. In this configuration, all peripheral nodes (sensors, measurement modules, actuators) are connected to one central node – a controller, gateway or base station, which performs the functions of managing and routing data flows.

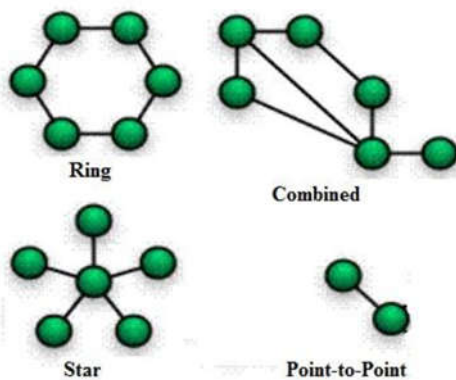


Figure 2 – Types of wireless sensor network topologies

The star topology is the basis for many modern wireless standards that are widely used in industrial diagnostic systems. Such technologies include Wi-Fi, Insteon, ZigBee, UWB, iDEN, CDMAOne, WiMAX, GSM,

GPRS, UMTS, and others. The use of these protocols provides different levels of range, bandwidth, and power consumption, which allows you to adapt the network to specific control tasks: local measurements, monitoring large areas, transmitting high-resolution signals, or organizing communication with remote objects

Combined topology (multicell network). Combined or multicell topology (multicell / mesh network) is one of the most stable and flexible structures for organizing modern wireless networks. It originates from the fully connected topology, in which each node can have several paths to connect to other nodes. Unlike the classic fully connected structure, in multicell networks not all possible connections are necessarily present, but multiple route exchange remains available, which ensures high reliability.

When organizing multi-cell networks, it is necessary to take into account the increased load on routing nodes, more complex configuration schemes and higher energy requirements, especially in the case of network-centric NK systems with a large number of autonomous sensors. Combined or multi-cell topology is characteristic of many modern wireless technologies, such as UWB, Wi-Fi, Insteon, ZigBee, iDEN, CDMAOne, WiMAX, GSM, GPRS, UMTS. Some of them (for example, ZigBee or UWB) directly support mesh functionality at the protocol level, ensuring efficient data exchange between a large number of nodes.

Ring Network topology involves organizing the network in the form of a closed loop, in which each node is connected to two neighboring ones, forming a continuous path for transmitting information "in a circle". In such a structure, each device acts as a receiver and transmitter at the same time, relaying signals further along the ring to the next node. Although the classical ring topology is most typical for wired networks, in wireless systems it can be used in some cases, in particular for organizing data transmission between a number of stationary or stationary sensors arranged in a structural ring configuration. This is possible when each node is able to stably transmit the received data further, ensuring a closed circulation of information.

Some modern wireless technologies can support ring transmission schemes, although they do not use them as the underlying topology. These include: UWB, Wi-Fi in relay modes, ZigBee (with specific routing settings), Insteon, and other protocols that support serial relay.

Thus, the "ring" topology, although rarely used as the main one in wireless networks, still finds its application in specialized automated non-destructive testing systems. It is useful where the structure of the object or the features of the technological process require the organization of information transmission "in a circle", and each sensor can act as a receiving and transmitting node.

A comparative analysis of the application of technologies and topologies is presented in Table 2.

Table 2 – Comparative analysis of the application of technologies in wireless network topologies

Techno logy	Point– point	Star	Ring	Mesh / multi-cell
Bluetoo th	✓	Partially (via central device)	×	×
ANT	✓	×	×	×
RFID	✓ (reader –tag)	×	×	×
RuBee	✓	×	×	×
PDC	✓	×	×	×
Wi-Fi	✓ (in P2P modes)	✓	Limited	Partially (due to Wi-Fi 6/6E mesh modes)
Insteon	✓	✓	Limited	✓
UWB	✓	✓	Can be used	✓
ZigBee	✓	✓ (ZigBee star)	Maybe in some scenarios	✓ (ZigBee mesh)
iDEN	×	✓	×	Limited
CDMA One	×	✓	×	×
WiMAX	×	✓	×	×
GSM	×	✓	×	×
GPRS	×	✓	×	×
UMTS	×	✓	×	×

Conclusions

The paper considered modern wireless information transmission technologies and their application in automated NDT systems, as well as the main topologies of wireless networks used to organize monitoring of the technical condition of equipment.

The analysis showed that wireless systems are becoming an integral part of industrial processes, providing mobility, speed of data collection and the ability to remotely control complex objects. The most common technologies at the industrial level are Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, GPRS, which are used in local production areas to solve specialized tasks. Their characteristics - data transfer speed, range and resistance to interference - make them effective for working with sensors and NDT devices. The use of these technologies allows you to increase the efficiency of automated NDT systems, reduce the risk of accidents and improve product quality management at all stages of production.

As for the organization of networks, the main wireless network topologies used in NK systems were considered: point-to-point, star, multi-cell (mesh), cluster tree and ring. Each of them has its own advantages and limitations: the point-to-point topology is simple

and reliable for two nodes, the star provides centralized management and scalability, the multi-cell network allows for the implementation of self-healing systems with high fault tolerance, the cluster tree optimizes data transmission in large distributed networks, and the ring topology can be used for specialized systems with sequential data transmission, where each node acts as a transceiver.

Thus, the combination of modern wireless technologies and a properly selected network topology allows you to create effective, reliable and scalable non-destructive testing systems capable of ensuring the safe operation of complex industrial facilities, operational monitoring of the condition of materials and structures, as well as data integration into forecasting and analytics systems.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

References

1. Balaban M., Smirnov P. Industrial safety and monitoring systems: Modern approaches. Springer. 2019
2. Clarke R., Bishop J. Extreme environments and material degradation. Elsevier. 2020.
3. Wang X., Chen Y. Wireless technologies in hazardous industrial environments. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20(4). P. 3560–3585.
4. Hollnagel E. Safety-II in practice: Human factors for complex systems. CRC Press. 2017.
5. Hellier C. Handbook of nondestructive evaluation. McGraw-Hill. 2012. 640 p.
6. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things: A vision for smart environments. *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29(7). P. 1645–1660. doi: [10.1016/j.future.2013.01.010](https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010)
7. Lynch J. P., Loh K. J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*. 2006. Vol. 38(2). P. 91–128. doi: [10.1177/0583102406061499](https://doi.org/10.1177/0583102406061499)
8. Chong C.Y., Kumar S.P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*. 2003. Vol. 91(8). P. 1247–1256. doi: [10.1109/JPROC.2003.814918](https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.814918)
9. Minoli D. Innovating with wireless industrial networks: Applications of Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and LoRa. Wiley. 2017.
10. Willig A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2008. Vol. 4(2). P. 102–124. doi: [10.1109/TII.2008.923194](https://doi.org/10.1109/TII.2008.923194)
11. Silva I., Guedes L. A., Portugal P. Wireless networks in industrial automation: A survey. *Journal of Communications*. 2013. Vol. 8(4). P. 263–270
12. Bluetooth SIG. Bluetooth core specification. Bluetooth Special Interest Group. 2022.

БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Нечай І. В.

спірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0006-741-7394>

e-mail: i.nechai@nubip.edu.ua

Луцак Д. Л.

Старший викладач

Університет Короля Данила

76018, вул. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9496-3542>

e-mail: d.l.lutsak@gmail.com

Демідов І. А.

Аспірант

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-7245-6907>

e-mail: Admildemidov@gmail.com

Білюк І. С.

Кандидат технічних наук, доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1654-7468>

e-mail: ivan.bilyuk@nuos.edu.ua

Зівенко О. В.

Кандидат технічних наук, доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1539-8360>

e-mail: oleksii.zivenko@nuos.edu.ua

Анотація. У статті представлено аналіз сучасних технологій бездротової передачі інформації та їх застосування в автоматизованих системах неруйнівного контролю (НДК). Розглянуто основні бездротові протоколи, що використовуються в промисловості, зокрема Bluetooth, Wi-Fi, UWB, GPRS, а також новітні рішення для розподілених сенсорних мереж нового покоління. Кожна технологія оцінюється за критеріями дальності, швидкості передачі даних, енергоспоживання та стійкості до перешкод, що дозволяє визначити їх доцільність для різних видів неруйнівного контролю, включаючи моніторинг стану металевих конструкцій, трубопроводів, резервуарів, елементів авіації та суднобудування, а також обладнання атомних та хімічних підприємств. Значна увага приділяється топологіям бездротових мереж, серед яких розглянуто точка-точка, зірка, багатостільникова (mesh) та кільцева. Представлено порівняння їх характеристик з точки зору надійності, масштабованості, складності конфігурації та ефективності інтеграції в промислові об'єкти. У контексті неруйнівного контролю (НК) топології визначають не лише ефективність передачі даних, але й здатність мережі забезпечувати відмовостійкість та безперервний моніторинг критичних об'єктів, де втрата зв'язку навіть на короткий час може призвести до ненадійної оцінки технічного стану. У статті показано, що правильне поєднання сучасних технологій та відповідної топології дозволяє створювати масштабовані, надійні та енергоефективні системи НК, які можуть забезпечити своєчасне виявлення дефектів, прогнозувати стан матеріалів та конструкцій, а також підвищити безпеку виробничих процесів. Крім того, використання бездротових мереж спрощує організацію дистанційного моніторингу, зменшує потребу у фізичному доступі до об'єктів та дозволяє інтегрувати дані з різних джерел у діагностичні системи.

Ключові слова: неруйнівний контроль, зіркоподібна топологія, бездротова передача даних, вимірювання параметрів, система збору даних.



Вимірювання фізико-механічних параметрів речовин

Прийнято 27.08.2025. Прорецензовано 21.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 620.179.16: 620.179.17

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-50-59

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТРАДИЦІЙНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

Кальницький М. Е.

Аспірант

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>

e-mail: kalnytsky94@gmail.com

Сучков Г. М.*

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>

e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Мигущенко Р. П.

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>

e-mail: mrp1@ukr.net

Кропачек О. Ю.

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>

e-mail: kropachek@ukr.net

Запропоноване посилання: Кальницький, М. Е., Сучков, Г. М., Мигущенко, Р. П. & Кропачек, О. Ю. (2025). Розширення можливостей традиційних ультразвукових приладів для досліджень, вимірювань, контролю та діагностики. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 50-59. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-50-59

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Переваги використання електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) при контролі якості поверхні та внутрішніх об'ємів феромагнітних металовиробів поздовжніми та поперечними хвилями та хвилями Релея відомі і широко використовуються. Частина традиційних контактних ультразвукових дефектоскопів, товщиномірів тощо, як правило, постачаються ЕМАП з постійними магнітами, які мають ряд суттєвих недоліків. Останнім часом розроблено перетворювачі, що і використовують імпульсні джерела магнітного поля, ускладнюючи, таким чином, конструкцію ультразвукових приладів та технологію їх використання. При цьому існує нагальна необхідність пристосовувати такі ультразвукові прилади для контролю металовиробів виготовлених з різних феромагнітних матеріалів. В результаті ультразвукові прилади з ЕМАП з імпульсним намагнічуванням є суттєво дорогими і потребують індивідуального налаштування при контролі металовиробів із різних феромагнітних матеріалів. Для вирішення цієї проблеми запропоновано розробити універсальний додатковий засіб до традиційних ультразвукових дефектоскопів, який дасть можливість виконувати контроль, не використовуючи ЕМАП індивідуального типу. В роботі наведено дані з розробки універсального додаткового засобу, який дає можливість використовувати ЕМАП з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів з будь-якого матеріалу з корекцією раціональних параметрів контролю; використання пакетних ультразвукових імпульсів; встановлення раціонального часового положення імпульсів намагнічування та високочастотного імпульсу; пригнічення вільних коливань у ланцюгах додаткового засобу. Такий засіб може використовуватися разом з більшістю стандартних ультразвукових приладів, зменшуючи витрати на їх виготовлення та експлуатацію.

Ключові слова: дослідження, якість, контроль, вимірювання, діагностика, ультразвуковий, електромагнітно-акустичний, імпульсне намагнічування, феромагнітний металовиріб.

Вступ

Керівництво України приділяє значну увагу підвищенню якості продукції [1] та розробки приладів для її забезпечення [2].

Традиційно для ультразвукового контролю, діагностики та вимірювань використовують прилади з п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) [3]. Останнім часом доволі часто для контролю металовиробів, які випускаються великими об'ємами (листи, рейки, балки, швелери тощо), використовують прилади з електромагнітно-акустичними перетворювачами [4-7]. Перевагами приладів з ЕМАП є висока продуктивність контролю, низькі вимоги до якості поверхні та температури, висока виявлюваність надтонких дефектів [8]. Але є і недоліки: необхідність забезпечення значних величин індукції постійного магнітного поля, значна сила притягування до феромагнітних металовиробів, когерентні завади від окалини і інших феромагнітних частинок [7, 9]. Багато авторів пропонують вирішити вказані недоліки шляхом використання імпульсного намагнічування металовиробів [10-12]. Нові хімічні джерела електроенергії та потужні радіоелементи [13] забезпечують можливості щодо створення малогабаритних приладів з ЕМАП для ультразвукового контролю феромагнітних металовиробів, в яких може використовуватися імпульсне намагнічування. Проте для використання імпульсного на-

магнічування необхідне доволі серйозне ускладнення конструкції ультразвукового приладу. Причому, при ультразвуковому контролі металовиробів різного типу і з різних матеріалів необхідно додаткові технічні і технологічні розробки [14]. Таке положення вимагає значних економічних вкладень. Для кожного серійного ультразвукового приладу це не є доцільним.

Автори статті пропонують доповнити серійні ультразвукові дефектоскопи, товщиноміри тощо (далі прилади) окремими додатковими засобами, які б дозволяли враховувати особливості ультразвукового контролю металовиробів різного типу і з різних матеріалів. Універсальний додатковий засіб може використовуватися з різними серійними ультразвуковими приладами, що зменшує витрати на виготовлення ультразвукових приладів, оскільки нові засоби можуть забезпечити дослідження якості більшості феромагнітних металовиробів, які випускаються та експлуатуються в промисловості.

Мета роботи – розширення можливостей серійних ультразвукових приладів за рахунок універсального додаткового засобу для контролю феромагнітних металовиробів електромагнітно-акустичними перетворювачами з імпульсним намагнічуванням.

Розроблення додаткового засобу з ЕМАП перетворювачем з імпульсним намагнічуванням для традиційних ультразвукових приладів.

На основі відомих досліджень з використання ЕМАП, в яких застосовується постійне та імпульсне намагнічування, авторами розроблено блок-схему додаткового засобу до ультразвукового приладу (рис. 1).

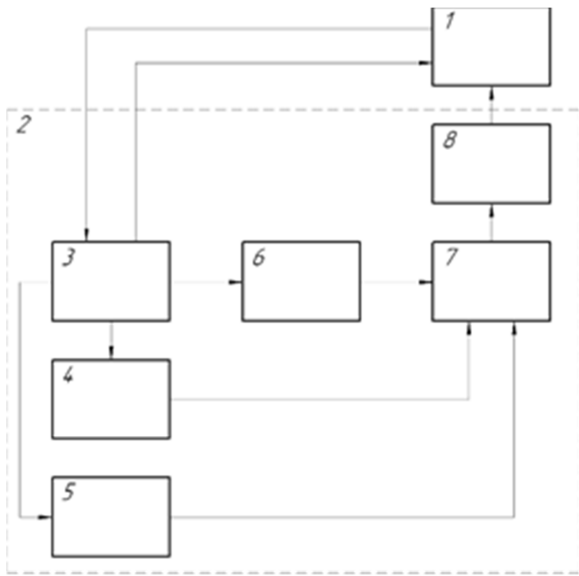


Рисунок 1 – Спрощена блок-схема ультразвукового приладу з додатковим засобом для безконтактного контролю феромагнітних металовиробів

На рисунку 1 позначено: 1 – серійний ультразвуковий прилад; 2 – додатковий засіб; 3 – формувач імпульсів управління; 4 – блок пригнічення вільних коливань у ланцюгах і блоках додаткового засобу та ЕМАП; 5 – блок живлення імпульсного магніту ЕМАП; 6 – генератор високочастотних пакетних імпульсів для живлення ЕМАП; 7 – ЕМАП; 8 – попередній посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів.

Пояснення роботи ультразвукового приладу з додатковим засобом наступне. Серійний ультразвуковий прилад 1 видає на додатковий засіб 2 синхронізуючий імпульс, який поступає на формувач імпульсів управління 3. Формувач імпульсів управління 3 виробляє: синхронізуючий імпульс, затриманий у часі для запуску розгортки ультразвукового приладу 1;

імпульс тривалості високочастотного пакетного імпульсу, необхідного для живлення ЕМАП 7; два імпульси у вигляді меандрів, зміщених у часі один відносно одного на 180^0 ; імпульс пригнічення вільних коливань для блоку 4 та імпульс управління блоком 5 для збудження імпульсу струму живлення імпульсного магніту ЕМАП 7. Попередній посилювач 8 посилює прийняті ЕМАП 7 ультразвукові імпульси до рівня, що забезпечує ефективну роботу ультразвукового приладу.

Слід відзначити, що генератор високочастотних пакетних імпульсів 6 може бути виконаний в різних відомих модифікаціях [5, 15-16]. ЕМАП 7 повинен використовувати для своєї роботи пакетні високочастотні імпульси, наприклад, як в роботах [5, 17]. В якості блоку 4 пригнічення вільних коливань в ланцюгах і блоках додаткового засобу доцільно використати розробку, наведену в статті [18]. Дані щодо блоку живлення імпульсного магніту ЕМАП наведені в [14], а щодо попереднього посилювача 8 прийнятих ультразвукових імпульсів – в дисертації [5]. Можуть використовуватися також інші аналогічні блоки та пристрої.

Основним блоком додаткового пристрою є формувач 3 імпульсів управління, який був розроблений авторами. Його спрощена блок-схема наведена на рис. 2.

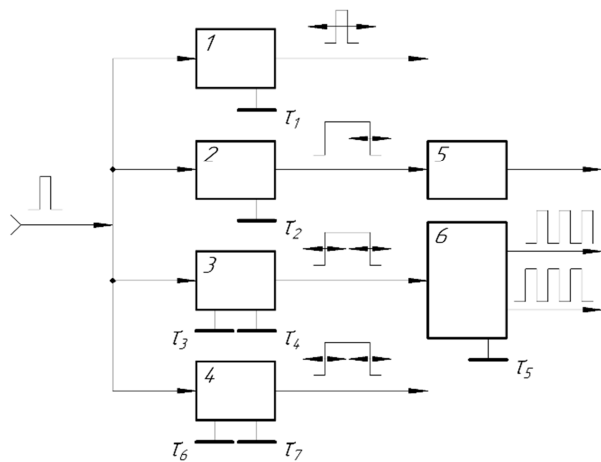


Рисунок 2 – Спрощена блок-схема формування затриманого синхроімпульсу для запуску розгортки ультразвукового приладу

На рисунку 2 позначено: 1 – блок формування затриманого синхроімпульсу для запуску розгортки ультразвукового при-

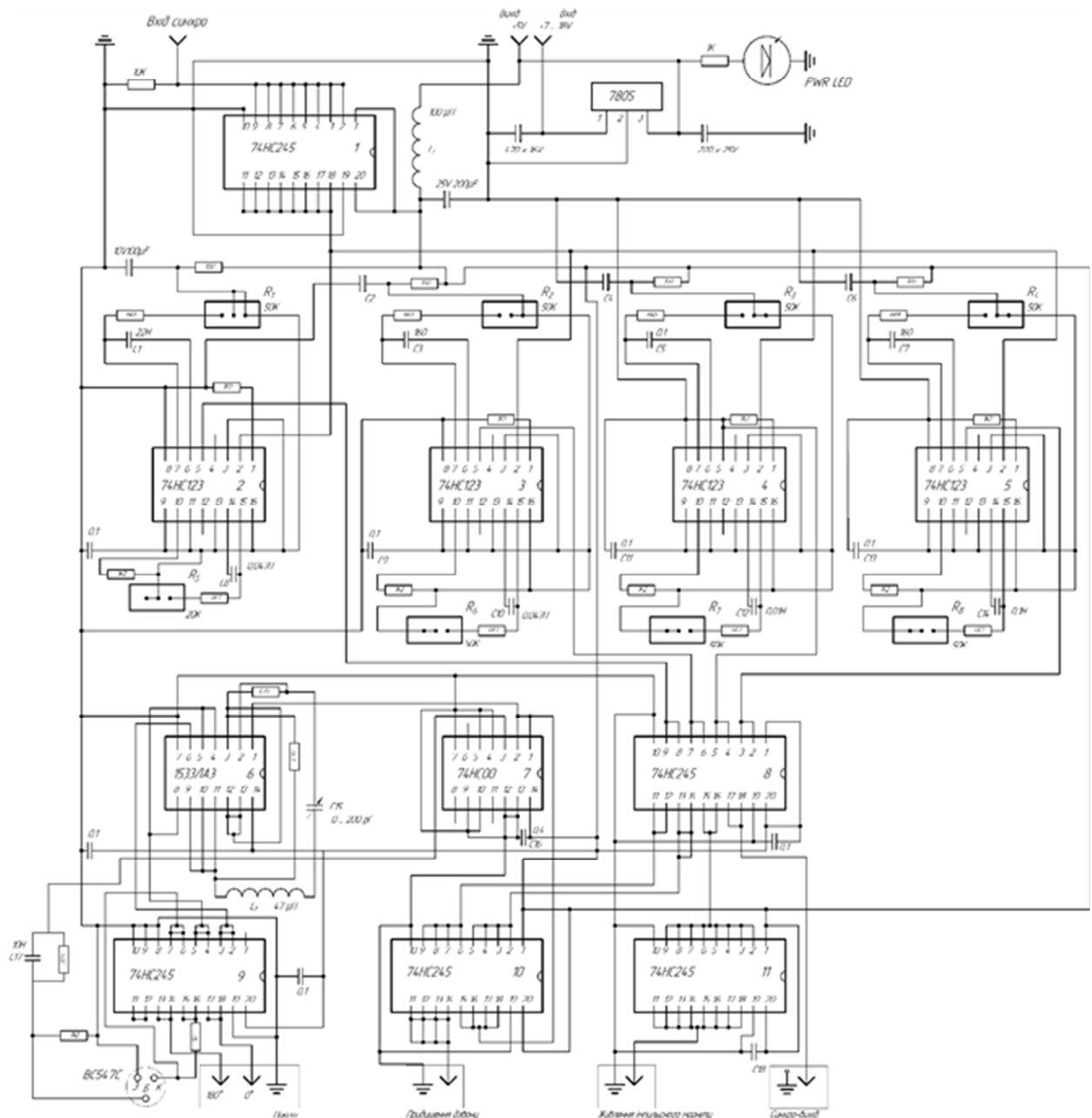


Рисунок 3 – Принципова електрична схема засобу для формування, управління та збудження імпульсів, необхідних для забезпечення роботи ультразвукового приладу

ладу за рис. 1, затримка якого встановлюється регулятором τ_1 ; 2 – блок формування імпульсу намагнічування, тривалість якого встановлюється регулятором τ_2 ; 3 – блок формування імпульсу тривалості пакетного імпульсу, яка визначається регулятором τ_3 , та його часового положення, яке визначається τ_3 ; 4 – блок формування імпульсу для пригнічення вільних коливань у ланцюгах і блоках додаткового засобу, тривалість якого визначається регулятором τ_5 , та його часового положення, яке визначається регулятором τ_6 ; 5 – посилювач поту-

жності струму живлення імпульсного магніту; 6 – блок формування імпульсів у вигляді двох меандрів, зсунутих один відносно одного на 180°, з яких складається пакетний височастотний імпульс, частота заповнення якого встановлюється регулятором τ_6 .

На рис. 3. наведена розроблена авторами електрична принципова схема формувача імпульсів управління додаткового пристрою. Формувач імпульсів працює наступним чином. З ультразвукового приладу на мікросхему 1 надходить синхроімпульс

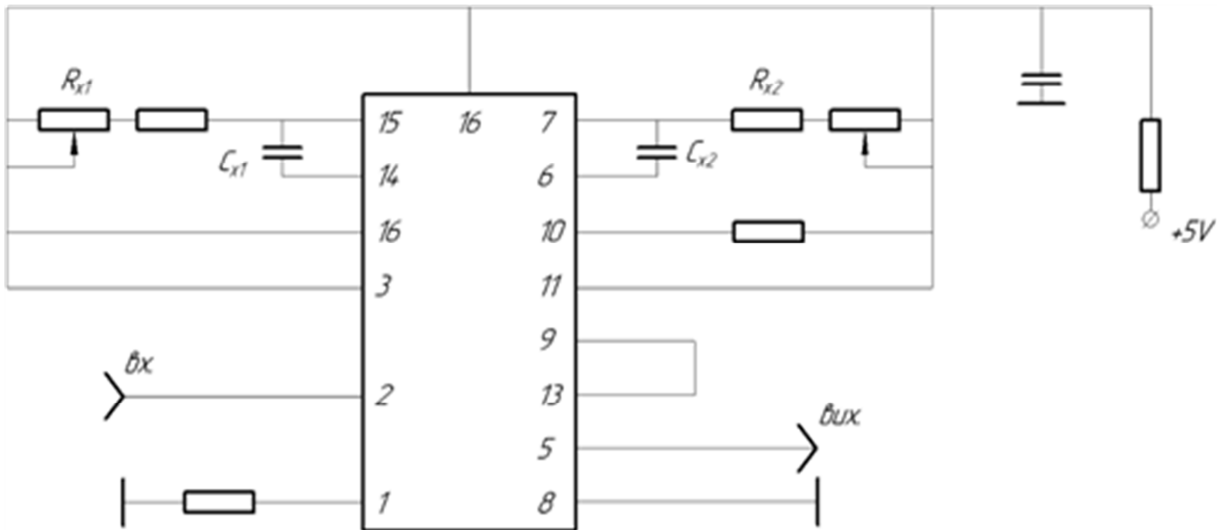


Рисунок 4 – Типова принципова електрична схема моностабільного мультивібратора з регулюванням часу включення і вимкнення імпульсу, що формується [14]

де він посилюється і передається на мікросхеми 2 – 5. На мікросхемах 2 – 5 виготовлені блоки 1 – 4 (рис. 2) за типовою схемою, наведеною на рис. 4. Надалі імпульси, що сформовані мікросхемами 2 – 5, посилюються.

За допомогою мікросхеми 6 (LC генератор) збуджуються, а потім з використанням мікросхем 6 та 9 виділяються по 2 послідовності меандрів з фазами 00 і 1800 відповідно.

Посилені мікросхемами 9 – 11 імпульси, сформовані блоками 1 – 4 (рис. 2), надходять на виходи формувача 3 за рис. 1.

Сформувати імпульси з часовою тривалістю та часовим положенням можна за типовою схемою, що наведена на рис. 4 [14].

В конкретному випадку блок, що відповідає рис. 4, виконаний за типовою схемою на базі мікросхеми 1533АГЗ без використання мікропроцесорної техніки, що обумовлено необхідністю виключення широкосмугових шумів від роботи тактових генераторів.

Регулювання переднього фронту імпульсу формування високочастотного сигналу (за необхідності) (рис. 4), виконується змінним опором R_{x1} , а заднього фронту – змінним опором R_{x2} .

Наведений на рис. 4. блок включається при надходженні синхронізуючого імпульсу тривалістю близько 1 мкс на вхід 2 мік-

росхеми. Отриманий в результаті імпульс формується на виході 5 мікросхеми.

Параметри сформованих імпульсів визначені експериментально на зразках з вуглецевих сталей і наведені в таблиці.

Зовнішній вигляд розробленого формувача імпульсів наведено на рис. 5.

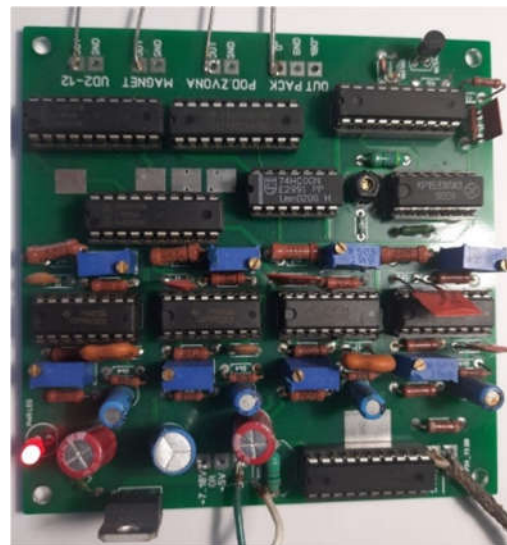


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд виготовленого формувача імпульсів

Узагальнюючи викладене, технологічні операції та послідовність роботи ультразвукового приладу з додатковим засобом (технологічна карта) можливо представити наступним чином (рис. 6).

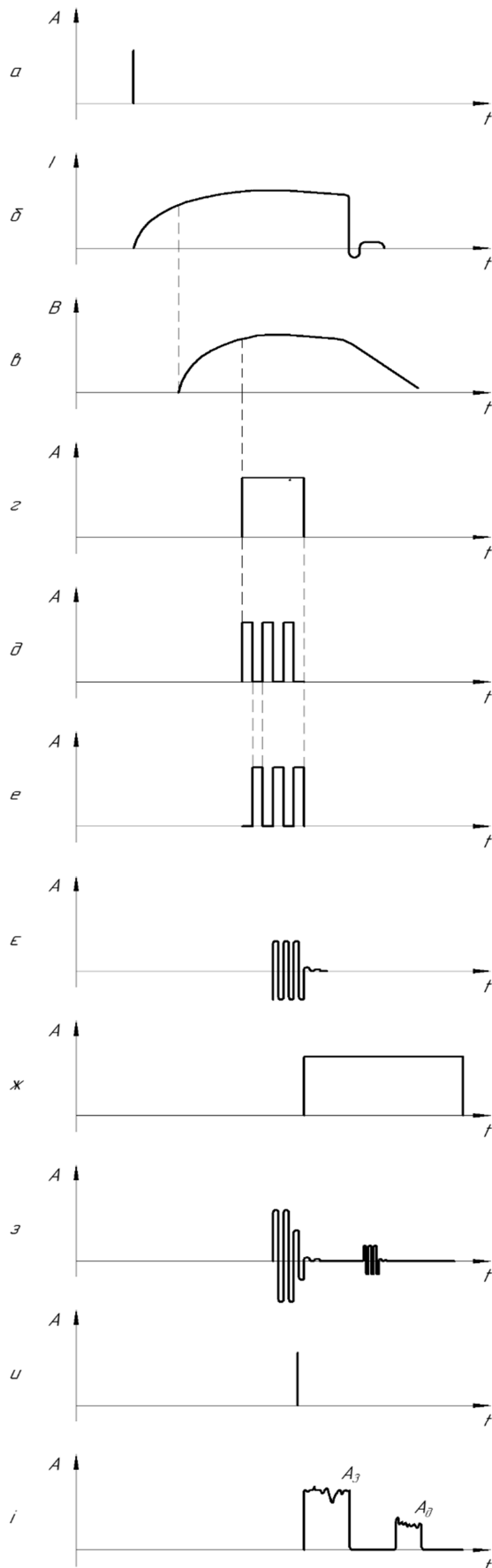


Рисунок 6 – Технологічна карта роботи ультразвукового приладу з додатковим засобом

На рис. 6 позначені: *a* – часова розгортка з синхроімпульсом, що формується ультразвуковим приладом; *б* – імпульс струму в імпульсному магніті; *в* – імпульс індукції магнітного поля, що створюється в поверхневому шарі феромагнітного металовиробу; *г* – імпульс тривалості пакетного високочастотного імпульсу; *д* – послідовність імпульсів для формування високочастотного пакету з фазою 00; *е* – послідовність імпульсів для формування високочастотного пакету з фазою 1800; *є* – високочастотний пакетний імпульс, наведений в ЕМАП; *ж* – імпульс пригнічення вільних коливань в елементах додаткового засобу; *з* – прийняті ЕМАП ультразвукові імпульси і посилені попереднім посилювачем; *и* – затриманий синхронізуючий імпульс, який запускає розгортку ультразвукового дефектоскопа; *і* – інформаційні імпульси на екрані дефектоскопа. *A* – напруга. *B* – індукція магнітного поля. *I* – струм. *A_з* – амплітуда зонduючого імпульсу. *A_д* – амплітуда імпульсу, відбитого дефектом з об'єму феромагнітного металовиробу.

Згідно з рис. 6 ультразвуковий прилад (рис. 1), формує синхроімпульс (розгортка *a*). В обмотці імпульсного магніту збуджується потужний струм (розгортка *б*), в результаті дії якого із затримкою, що залежить від матеріалу металовиробу, призводить до створення в поверхневому шарі феромагнітного металовиробу індукції магнітного поля (розгортка *в*). Після формування із затримкою, що залежить від матеріалу металовиробу, максимального значення індукції магнітного поля створюється імпульс тривалістю високочастотного пакетного імпульсу (розгортка *г*). В рамках дії цього імпульсу формуються дві послідовності (розгортки *д* і *е*), які необхідні для створення пакетного високочастотного імпульсу з заданою кількістю періодів заповнення (в прикладі наведено три періоди). Посилений пакетний імпульс збуджує в ЕМАП потужний зонduючий імпульс (розгортка *є*). Після завершення зонduючого імпульсу збуджується імпульс пригнічення вільних коливань (розгортка *ж*).

Прийняті з металовиробу ЕМАП ультразвукові імпульси посилюються до зада-

ної величини (розгортка z); після цього на ультразвуковий прилад з додаткового засобу подається другий затриманий синхронізований імпульс (розгортка u), який запускає розгортку i на екрані ультразвукового приладу. За параметрами прийнятих ультразвукових імпульсів визначають якість дослідженого об'єму металовиробу.

Висновки

Визначено та обґрунтовано необхідність розроблення універсального додаткового засобу до серійних ультразвукових приладів, що зменшить витрати на їх виготовлення та експлуатацію:

– показано, що в складі універсального додаткового засобу доцільно використати відомі ЕМАП, малозавадний посилювач прийнятих ультразвукових імпульсів, блок придушення вільних коливань в ланцюгах засобу;

– розроблено технологічну карту функціонування блоків універсального додаткового засобу разом з ультразвуковим приладом;

– розроблено блок формування імпульсів живлення пристроїв універсального додаткового засобу та управління їх роботою.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року : від 15.03.2006р. № 145-р. Розпорядження Кабінету Міністрів України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua>

2. Закон України № 3715-VI від 05.12.2012 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні». (Напрямок «Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва»).

3. Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., Бондаренко О.Г., Карпаш О.М. К-21. Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія. Видавництво: ФНТУНГ. 2012. 420 с.

4. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Гарькавий В.В. Возможности бесконтактных электромагнитных методов неразрушающего контроля качества труб. *Питання розвитку газової промисловості України. Вип. XXVIII. Діагностування трубопроводів, технологічного і енергомеханічного обладнання нафтової та газової промисловості. УкрНДІГаз.* 2000. С.102–109.

5. Десятиченко О.В. Электромагнитно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями: дис. канд. техн. наук. Харків: НТУ «ХП», 2015. 172 с.

6. Сайт канадської фірми Innerspec [електронний ресурс]. URL: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors> (Дата звернення: 19.09.2021).

7. Сучков Г.М. Розробка і впровадження технології безперервного автоматичного виявлення дефектів макроструктури об'ємно-зміцнених рейок безконтактним ультразвуковим методом: автореф. дис. канд. техн. наук. Харків: УкрНДІМет". 1988. 24 с. doi: [10.15407/techmed2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techmed2025.02.085)

8. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плєснецов С.Ю., Плєснецов Ю.О., Курандо О.І., Алексієв А.Г., Бороденко О.М., Бутенко О.І., Рибалко А.О. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю, вимірювання і діагностики феромагнітних металовиробів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля (огляд). *Технічна електродинаміка.* 2025. № 2. С. 85-95. doi: [10.15407/techmed2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techmed2025.02.085)

9. Суворова М.Д. Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів. *Вісник НТУ «ХП».* Серія: *Електроенергетика та перетворювальна техніка.* 2019. № 1. С. 63-73. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content>

10. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. Патент на корисну модель №156088. Накладний суміщений електромагнітно-акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю феромагнітних металовиробів. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
11. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*. Chengdu, China. 20-23 June 2014. doi: [10.1109/FENDT.2014.6928272](https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272)
12. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin and Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(16). doi: [10.3390/app10165534](https://doi.org/10.3390/app10165534)
13. Сайт компанії International Rectifier [електронний ресурс]. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf/643573/InternationalRectifier/> (Дата звернення: 10.03.2023).
14. Сучков, Г. М., Кальницький, М. Е., Дмитренко, М. В. Бобров, О. Г. Універсальний стенд та обладнання для дослідження електромагнітно-акустичних перетворювачів з імпульсним джерелом поляризованого магнітного поля. *Методи та прилади контролю якості*. 2025. 1(54).С. 13-28. doi: [10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28)
15. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P. etc Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics. *Electrical Engineering Electromechanics*. 2018. No 2. С. 31-35. doi: [10.20998/2074-272X.2018.2.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.05)
16. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Тараненко Ю.К. та інші. Генератори зондуючих імпульсів для живлення портативних електромагнітно – акустичних перетворювачів. *Методи та прилади контролю якості*. 2015. № 2 (35). С. 5-11. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/267>
17. Буссі Салам. Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів. Дис. к.т.н. 2020. НТУ «ХПІ». 158 с.
18. Познякова М.С. , Сучков Г.М. , Мигущенко Р.П. , Кропачек О.Ю. , Донченко А.В. Вдосконалення вимірювального ультразвукового електромагнітно-акустичного перетворювача. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. с. 27-33. doi: [10.24027/2306-7039.1.2023.282540](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282540)

References

1. Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku : vid 15.03.2006r. № 145-r. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy - Rezhym dostupu: <http://zakon.rada.gov.ua> [in Ukrainian]
2. Zakon Ukrainy № 3715-VI vid 05.12.2012 «Pro priorityetni napriamy innovatsiinoi diialnosti v Ukraini», (Napriam «Pryladobuduvannia, yak osnova vysokotekhnolohichnoho onovlennia vsikh haluzei vyrobnytstva»). [in Ukrainian]
3. Karpash M.O., Rybitskyi I.V., Koturbash T.T., Bondarenko O.H., Karpash O.M.. K-21. Akustychnyi kontrol konstruksii ta ustatkovannia u naftohazovii haluzi. Monohrafiia. Vydavnytstvo: IFNTUNH. 2012. 420 p. [in Ukrainian]
4. Suchkov H.M., Katasonov Yu.A., Harkavyi V.V. Vozmozhnomy beskontaktnykh elektromagnitnykh metodov nerazrushaiushcheho kontroliia kachestva trub. Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy. Vyp. KhKhVIII. Diahnostuvannia truboprovodiv, tekhnolohichnoho i enerh?-mekhanichnoho obladnannia naftovoi ta hazovoi promyslovosti. UkrNDIHaz. 2000. P.102–109. [in Ukrainian].
5. Desiatnichenko O.V. Elektromagnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymu pokryttiamy: dys. kand. tekhn. nauk. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2015. 172 p.[in Ukrainian].
6. Sait kanadskoi firmy Innerspec [elektronnyi resurs] URL: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors> (Data zvernennia: 19.09.2021). [in Ukrainian].
7. Suchkov H.M. Rozrobka i vprovadzhennia tekhnolohii bezperevnoho avtomatychnoho vyivlennia defektiv makrostruktury obiemno-zmitsnennykh reiook bezkontaktnym ultrazvukovym metodom: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk. Kharkiv: UkrDNDIMet”. 1988. 24 p. doi: [10.15407/techned2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085) [in Ukrainian].

8. Suchkov H.M., Myhushchenko R.P., Pliesnetsov S.Iu., Pliesnetsov Yu.O., Kurando O.I., Aleksiiv A.H., Borodenko O.M., Butenko O.I., Rybalko A.O. Pidvyshchennia chutlyvosti elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia kontroliu, vymiriuvannia i diahnostryky feromahnitnykh metalovyrobiv za rakhunok zbilshennia velychyny induktsii mahnitnoho polia (ohliad). *Tekhnichna elektrodynamika*. 2025. № 2. P. 85-95. doi: [10.15407/techned2025.02.085](https://doi.org/10.15407/techned2025.02.085) [in Ukrainian].

9. Suvorova M.D. Rozrobka namahnichuvalnykh dzherel dlia EMA peretvoriuvachiv na osnovi potuzhnykh postiinykh mahnitiv. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Elektroenerhetyka ta peretvoriuvalna tekhnika*. № 1. 2019. P. 63-73. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b622d95b-faa3-4ee4-afce-ae6a33c54c67/content> [in Ukrainian].

10. Donchenko A.V., Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Kropachek O.Iu. Patent na korysnu model №156088. Nakladnyi sumishchenyi elektromahnitno - akustychnyi peretvoriuvach z impulsnym namahnichuvanniam dlia kontroliu feromahnitnykh metalovyrobiv. Zaiavka № U202304534 vid 25.05.2023 r. Opubl. 08.05.2024. *Biul.* №19. [in Ukrainian].

11. Heng Zhang, Shu-juan Wang, Guo-fu Zhai, Ri-liang Su. Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet. *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*. Chengdu, China. 20-23 June 2014. doi: [10.1109/FENDT.2014.6928272](https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928272)

12. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin and Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(16). doi: [10.3390/app10165534](https://doi.org/10.3390/app10165534)

13. Sait kompanii International Rectifier [elektronnyi resurs]. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf/643573/InternationalRectifier> (Data zvernennia: 10.03.2023). [in Ukrainian]

14. Suchkov H. M., Kalnytskyi M. E., Dmytrenko M. V. Bobrov O. H. Universalnyi stend ta obladnannia dlia doslidzhennia elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv z impulsnym dzherelom poliaryzuiuchoho mahnitnoho polia. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2025. 1(54). P.13-28. doi: [10.31471/1993-9981-2025-1\(54\)-13-28](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-1(54)-13-28) [in Ukrainian].

15. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P. etc Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics. *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. 2018. № 2. p. 31-35. doi: [10.20998/2074-272X.2018.2.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.05)

16. Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Taranenکو Yu.K. ta insh. Heneratory zondiuchykh impulsiv dlia zhyvlennia portatyvnykh elektromahnitno – akustychnykh peretvoriuvachiv. *Metody ta prylady*. 2015. № 2 (35). p.5-11. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/267> [in Ukrainian].

17. Bussi Salam. Elektromahnitno – akustychni peretvoriuvachi dlia ultrazvukovoho kontroliu metalovyrobiv. *Dys. k.t.n.* 2020. NTU «KhPI». 158 p. [in Ukrainian].

18. Pozniakova M. Ie. , Suchkov H.M. , Myhushchenko R.P. , Kropachek O.Iu. , Donchenko A.V. Vdoskonalennia vymiriuvalnogo ultrazvukovoho elektromahnitno-akustychnoho peretvoriuvacha *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2023. № 1. p. 27-33. doi: [10.24027/2306-7039.1.2023.282540](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282540) [in Ukrainian].

EXPANDING THE CAPABILITIES OF TRADITIONAL ULTRASONIC INSTRUMENTS FOR RESEARCH, MEASUREMENT, INSPECTION AND DIAGNOSTICS

Kalnytskyi M. E.

Postgraduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, St. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-5056-2085>
e-mail: kalnytsky94@gmail.com

Suchkov G. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, St. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>
e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Migushchenko R. P.

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, St. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>
e-mail: mrp1@ukr.net

Kropachek O. Yu.

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, St. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>
e-mail: kropachek@ukr.net

Abstract. The advantages of using electromagnetic–acoustic transducers (EMATs) for surface-quality control and internal-volume inspection of ferromagnetic metal products with longitudinal and transverse waves, as well as Rayleigh waves, are well known and widely applied. A portion of traditional contact ultrasonic flaw detectors, thickness gauges, and similar devices are typically equipped with EMATs based on permanent magnets, which have a number of significant drawbacks. Recently, EMATs using pulsed magnetic-field sources have been developed, which complicates the design of ultrasonic instruments and the technology of their application. At the same time, there is an acute need to adapt such ultrasonic instruments for the inspection of metal products manufactured from different materials. As a result, ultrasonic instruments with pulsed-magnetization EMATs turn out to be substantially more expensive and require individual setup when inspecting metal products made of different ferromagnetic materials. To address this problem, we propose the development of a universal add-on for traditional ultrasonic flaw detectors that enables inspection without the need for EMATs of an individual type. This work presents data on the development of a universal auxiliary device that allows the use of pulsed-magnetization EMATs to inspect ferromagnetic metal products made of any material, with correction of rational inspection parameters, such as: the use of packet ultrasonic pulses; setting the rational temporal position of magnetization pulses and the high-frequency pulse; and suppression of free oscillations in the circuits of the auxiliary device. Such a device can be used with most standard ultrasonic instruments, reducing the costs of their manufacture and operation.

Keywords: research, quality, inspection, measurement, diagnostics, ultrasonic, electromagnetic-acoustic, pulsed magnetization, ferromagnetic, metal product.



ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ КРАПЛІ РІДИНИ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Біліщук В. Б. *

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0196-412X>
e-mail: viktor.bilishchuk@nung.edu.ua

Криницький О. С.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>
e-mail: hipnoz23@ukr.net

Витвицька Л. А.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8491-1239>
e-mail: lidiia.vytvytska@nung.edu.ua

Анотація. В статті вирішується задача визначення розмірів краплі рідини на цифровому зображенні з використанням технологій комп'ютерного зору засобами бібліотеки OpenCV, що може бути використано для слідження поверхневих властивостей рідин, зокрема крайового кута змочування. Крайовий кут змочування розраховують на основі виміряного радіуса основи або меридіану і заданого об'єму краплі рідини. Вимірювати радіус краплі рідини пропонується шляхом отримання цифрового зображення краплі, а радіус визначати алгоритмами комп'ютерного зору. В статті показано, що алгоритми комп'ютерного зору передбачають виконання ряду операцій. Спочатку кольорове зображення перетворюють на сіре. Далі виконують розмиття зображення згортокою гаусовим ядром для зменшення впливу шуму. Наступним етапом є виділення контурів об'єктів на зображенні алгоритмом Кенні, який обчислює згортку за допомогою оператора Собеля. Подальша обробка зображення виконується шляхом фільтрації для проріджування країв контурів і придушення контурів з використанням двох порогових рівнів. Це дозволяє отримати контури товщиною в один піксель і усунути ізольовані ділянки контурів, що не належать дійсному контуру краплі, а є результатом неусуненого шуму на зображенні. В роботі вказано, що правильний вибір цих порогів впливає на ефективність алгоритму детектування країв. Заключним етапом є застосування алгоритму сканування зображення для формування масивів координат пікселів зображення, які належать контуру краплі. На основі масиву координат пікселів визначають радіус кола, який їм відповідає. Реальні розміри краплі на зображенні перераховують з використанням калібрувального об'єкта відомих розмірів. Таким об'єктом

Запропоноване посилання: Біліщук, В. Б., Криницький, О. С. & Витвицька, Л. А. (2025). Застосування комп'ютерного зору для визначення розмірів краплі рідини на цифрових зображеннях. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 60-67. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-60-67.

* Відповідальний автор



може бути тіло простої форми – квадрат, круг тощо. На основі виміряних і відомих розмірів калібрувального тіла розраховують коефіцієнт перетворення цифрового зображення. Запропонований алгоритм реалізується функціями бібліотеки OpenCV: `cvtColor`, `GaussianBlur`, `findContours` і `minEnclosingCircle`, що дозволяє ефективно розробляти програмне забезпечення із використанням бібліотек OpenCV. Таке програмне забезпечення може бути впроваджене на мікрокомп'ютерах, що відкриває широкі можливості для розроблення приладів для дослідження поверхневих властивостей рідин.

Ключові слова: крайовий кут змочування, OpenCV, згортка зображення, контур.

Вступ

Обробка зображень і алгоритми ідентифікації об'єктів на зображенні з використанням технологій комп'ютерного зору відіграють важливу роль у розвитку автоматизованих систем та штучного інтелекту. З допомогою комп'ютерного зору вирішують актуальні питання знаходження, відстежування, ідентифікації та класифікації об'єктів, оброблення даних і аналізу отриманої інформації з зображень. Розроблення програмного забезпечення з використанням технологій комп'ютерного зору застосовують для вирішення різноманітних завдань, що відкриває багато можливостей у різних галузях. Окремо можна виділити завдання визначення розмірів різних об'єктів на зображеннях. Застосування технологій комп'ютерного зору для таких цілей дозволяє автоматизувати процеси визначення розмірів об'єктів на зображеннях, що автоматизує і прискорює процеси проведення вимірювань [1].

Мета роботи полягає у розробленні методики визначення розмірів краплі рідини на горизонтальній твердій поверхні, що може бути використано для дослідження поверхневих властивостей рідин, зокрема крайового кута змочування. У роботі розглядається методика розпізнавання країв краплі рідини і визначення її геометричних розмірів з використанням бібліотеки OpenCV.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Зараз відома велика кількість робіт, присвячених застосуванню різних алгоритмів і методів вилучення потрібної інформації із цифрових зображень. Однією із задач є пошук і вимірювання розмірів потрібного об'єкта на зображенні.

У роботі [2] розглядають задачу вимірювання розмірів об'єктів за допомогою функцій OpenCV. В публікації зазначено, що використовуючи функції OpenCV можна виявити об'єкти на зображенні, обчислити їх ширину та висоту.

Відома інша робота [3], в якій вирішують задачу вимірювання розмірів об'єкта за допомогою функцій бібліотеки OpenCV. Зазначають, що задача реалізується шляхом пошуку контурів, перетворенням зображення на градації сірого і застосовують пороговий рівень яскравості для відокремлення об'єкта від фону з подальшим пошуком контуру об'єкта. Обчислення площі об'єкта спочатку здійснюють в пікселях, і потім перераховують площу, виражену в реальних одиницях вимірювання за допомогою масштабного коефіцієнта.

В роботі [4] представлена розроблена методика аналізу цифрових зображень фіксованої обертової краплі для визначення координат точок контурів таких крапель. У ній пропонується грубий пошук контуру краплі здійснювати шляхом сканування зображення, а прецизійне встановлення координат точок контуру здійснювати з використанням методу Кенні із субпіксельним розрахунком координат точок контурів. В іншій праці [5] запропоновано використовувати кореляційний метод аналізу цифрових зображень. У ньому здійснюють порівняння зразкового образу шуканого об'єкта на цифровому зображенні, що дозволяє ідентифікувати розташування шуканого об'єкта на зображенні. У зазначених роботах програмне забезпечення розроблялося без використання спеціалізованих бібліотек, тому процес розроблення програмного забезпечення був досить трудомістким.

Основний текст статті

Використання спеціалізованих програмних бібліотек дозволяє спростити процес розробки програмного забезпечення. Одним із таких засобів є бібліотека OpenCV (Open Source Computer Vision Library), яка дозволяє виконувати обробку зображень, включаючи виявлення і розпізнавання об'єктів, відстеження руху і рухомих об'єктів, об'єднання зображень для отримання цілої сцени з високою роздільною здатністю і багато іншого. Бібліотека OpenCV налічує понад 2500 оптимізованих алгоритмів, які полегшують розроблення програмного забезпечення засобами мов програмування Python, Java, Matlab та інших, і може вільно використовуватися в академічних і комерційних цілях на умовах ліцензії BSD [6].

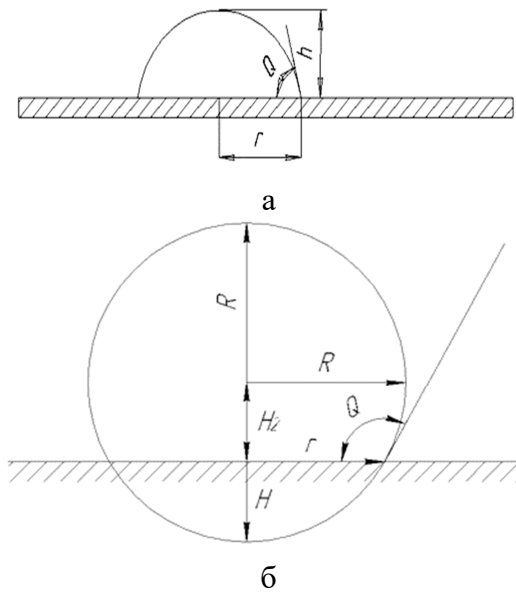
При використанні алгоритмів розпізнавання об'єктів на зображеннях виділяють типові послідовності дій:

- попередню обробку зображення: згладжування, фільтрація перешкод, підвищення контрасту;
- бінаризацію зображення і виділення контурів об'єктів;
- фільтрацію контурів за розмірами, площею, формою;
- пошук контуру, максимально схожого на шаблон.

Відомий метод визначення крайового кута змочування рідинами твердих тіл, в якому розміщують краплю із заданим об'ємом V на поверхні твердого тіла, вимірюють радіус основи краплі r або радіус меридіану R і розраховують крайовий кут змочування [7]. Якщо об'єм краплі V невеликий, то крапля приймає форму, близьку до сферичної. Розглянемо краплю на гідروفільній поверхні, тобто коли крайовий кут лежить в межах від 0° до 90° (рис. 1, а). У цьому випадку крайовий кут змочування розраховують згідно з такими залежностями:

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{2R - H}{\sqrt{\frac{2V}{\pi H} - \frac{H^2}{3}}} \right), \quad (1)$$

де



*а – гідروفільна поверхня;
б – гідрофобна поверхня*

Рисунок 1 – Форма краплі на поверхні

$$H = \frac{\sqrt[3]{\frac{2 \cdot (\gamma(R, V))^2}{\pi} + R^2 \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \pi} + R \cdot \sqrt[3]{\gamma(R, V)}}}{\sqrt[3]{\gamma(R, V)}}.$$

На гідрофобній поверхні (рис. 1, б) значення кута змочування змінюються від 90° до 180° . Залежності для розрахунку кута змочування є дещо складнішими:

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{2R - H}{\sqrt{\frac{2V}{\pi H} - \frac{H^2}{3}}} \right), \quad (2)$$

де

$$H = \frac{\sqrt[3]{\frac{2 \cdot (\gamma(R, V))^2}{\pi} + R^2 \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \pi} + R \cdot \sqrt[3]{\gamma(R, V)}}}{\sqrt[3]{\gamma(R, V)}}$$

$$\gamma(R, V) = -3V + 2R^3\pi + \sqrt{3 \cdot [-V \cdot (-3V + 4R^3\pi)]}$$

Вимірювання радіусів краплі рідини можна автоматизувати, скориставшись мікроскопом з відеокамерою, якою отримують зображення цієї краплі. Розміри краплі рідини на отриманому зображенні визначають відповідним програмним забезпеченням. Отже, існує задача розроблення програмного забезпечення для обробки зображення і визначення розмірів краплі рідини в розглянутому методі.

На початковому етапі розробки програмного забезпечення актуальним є вибір мови програмування. Зараз використовують безліч мов програмування. Однак основними лідерами можна вважати C++ та Python, оскільки саме в цих мовах можна використовувати бібліотеку комп'ютерного зору – OpenCV. Мова програмування Python приваблює простотою освоєння завдяки лаконічному синтаксису, що робить її доступною для початківців у програмуванні. Додатковою перевагою Python є активна спільнота, яка постійно розробляє безліч корисних бібліотек для використання у різних проєктах. Python – це мова програмування загального призначення, орієнтована на підвищення продуктивності розроблення різноманітного програмного забезпечення. Синтаксис ядра Python – мінімалістичний. У той же час стандартна бібліотека включає великий обсяг корисних функцій. Розроблене програмне забезпечення з використаною кросплатформовою бібліотекою OpenCV може працювати на різних операційних системах та платформах, таких як Windows (включаючи Windows 10, 8, та 7), Linux (Ubuntu, Fedora, Debian тощо), macOS, Android, iOS, Raspberry Pi, а також вбудованих системах.

Кожне зображення проходить певні етапи: попередньої обробки і аналізу. Попередня обробка зображення – це важливий етап в комп'ютерному зорі, який підготовляє зображення для подальшої обробки та аналізу. Метою попередньої обробки є підвищення якості зображення шляхом видалення шумів і покращення контрасту.

Спочатку відбувається перетворення зображення в градації сірого, щоб зменшити складність обробки, перетворивши кольорове зображення в шкалу сірого, що зменшує кількість каналів від трьох (червоний, зелений, блакитний) до одного. Інтенсивність кожного пікселя на сірому зображенні – це зважене середнє кольорових каналів оригінального пікселя, яке враховує людську чутливість до різних кольорів. Перетворення зображення з кольорового простору RGB (Red, Green,

Blue) – червоний, зелений, синій в градації сірого Y здійснюється функцією `cvtColor`, виражається як перерахунок яскравостей пікселів:

$$Y=0,299R+0,587G+0,114B, \quad (3)$$

де Y відповідає інтенсивності сірого кольору, а R , G , і B – інтенсивності червоного, зеленого і синього каналів відповідно. Коефіцієнти відображають важливість кожного кольору для сприйняття яскравості людським оком.

Наступним пунктом попередньої обробки є розмиття зображення, метою якого є зменшити вплив шуму та несуттєвих деталей на зображенні, що спрощує процес виявлення країв та контурів. Цього можна досягти з використанням гаусового ядра, що дає менше розмиття на краях і більше у центрі.

Розмиття зображення згортою гаусовим ядром в OpenCV реалізується функцією `cv2.GaussianBlur`. В цій функції задають розмір ядра згортки, який визначає ступінь розмиття. Більший розмір ядра дає сильніше розмиття і навпаки. Для кожного пікселя обчислюється зважена сума його сусідів, де ваги визначені гаусівським ядром:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

де x та y – відстані від центру ядра по горизонталі та вертикалі відповідно, σ – стандартне відхилення розподілу, яке контролює рівень розмиття. Ядро згортки нормалізується так, щоб сума всіх елементів дорівнювала 1. Це забезпечує незмінність загальної яскравості зображення після розмиття.

Наступним етапом є виділення контурів об'єктів на зображенні. Для знаходження контурів об'єктів на зображенні використовують функцію `findContours`.

Функція `findContours` для виявлення країв об'єктів на зображенні використовує алгоритм Кенні. Він вважається одним з найефективніших алгоритмів виявлення країв і часто використовується в комп'ютерному зорі. У цьому алгоритмі обчислюється градієнт зображення для

визначення напрямку та інтенсивності зміни яскравості. Обчислення градієнтів здійснюється обчисленням згортки за допомогою оператора Собеля, який виявляє горизонтальні та вертикальні зміни:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I; \quad (5)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I, \quad (6)$$

де I — це зображення у відтінках сірого.

Величина та напрямок градієнта:

$$G_{z,x} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}; \quad (7)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right), \quad (8)$$

де G_x та G_y – градієнти в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно [8].

Після пошуку контурів відбувається їх фільтрування на основі різних критеріїв, таких як площа, форма або розмір, щоб ізолювати контур цільового об'єкта [9].

Для усунення розривів контурів і фіктивних контурів далі виконують ще ряд операцій. Немаксимальне придушення застосовується для “проріджування” країв. Для кожного пікселя перевіряється, чи є він максимумом у напрямку градієнта. Якщо ні, піксель придушується – його значення яскравості встановлюється в нульове. Таке перетворення створює краї границь об'єктів як тонкі лінії. В алгоритмі підпрограми `findContours` використовують два порогові значення σl і σh для визначення справжніх країв. Сильні краї з значенням градієнта, який вищий за високий поріг σh , визнаються як справжні краї. Краї зі значенням градієнта нижче низького порогу σl відкидаються. Інші краї з значенням градієнта, що знаходяться між двома порогамі, позначаються як слабкі краї. Такі області потребують додаткової перевірки.

Таким чином, нижній поріг для процесу гістерезису σl – це мінімальна інтенсивність, яка вважається досить сильною, щоб бути визначеною як край.

Верхній поріг для процесу гістерезису σh визначає мінімальну інтенсивність для пікселів, які можуть бути визнані як край, якщо вони з'єднуються з сильними краями. Правильний вибір цих порогів визначає ефективність алгоритму детектування країв. Низькі порогові значення залишають на зображенні багато шуму, а при виборі високих значень на зображенні можуть бути пропущені деякі краї. Для досягнення найкращих результатів відповідно до конкретного зображення та завдання значення порогів σl і σh встановлюють експериментально. Алгоритм придушення можна описати наступними виразами:

Сильні краї: $G(x,y) > \sigma h$;

Слабкі краї: $\sigma l < G(x,y) \leq \sigma h$,

Край відсутній: $G(x,y) \leq \sigma l$.

$$P(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{якщо край слабкий} \\ & \text{або сильний;} \\ 0, & \text{якщо край відсутній} \\ & \text{або слабкий, що не з'єднаний} \\ & \text{з сильним.} \end{cases}$$

Інші параметри функції `findContours mode` і `method` визначають алгоритм сканування зображення і збереження контурів. Наприклад, виклик функції `findContours` з параметром `mode` рівним `cv2.RETR_EXTERNAL`, вказує функції `findContours` знаходити тільки зовнішні контури, тобто ті, які не містяться всередині інших контурів. У процесі сканування зображення згідно з алгоритмом визначається, чи слід з'єднувати знайдені слабкі краї з сильними. Якщо слабкий край з'єднаний з сильним краєм, він вважається справжнім краєм, інакше він відкидається. А застосування параметра `method` із значенням `cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE` вказує, що контури будуть апроксимовані лініями між сусідніми точками.

Функція `findContours` повертає кортеж: послідовність контурів $S = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ та ієрархію H . Кожен контур S визначений як послідовність точок $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Ієрархія H може представлятись у вигляді матриці або деревовидної структури, що описує взаємозв'язки між контурами.

Кожен елемент p_{ij} контуру C_i містить координати (x, y) пікселя у вихідному зображенні. Ці елементи утворюють форму або границю об'єкта, яка може бути використана для аналізу та обробки. N – кількість контурів, що були знайдені на зображенні. Кожний контур C_i може містити різну кількість точок, що представляють границю об'єкта.

Крім цього, створюється ієрархія контурів, вона ж H – це матриця або вектор, що містить інформацію про ієрархічні зв'язки між контурами на зображенні.

Ієрархія визначає, як контури пов'язані між собою: які з них є “дитячими”, “батьківськими”, а також наступними та попередніми на даному рівні ієрархії H . Інформація про ієрархію може використовуватись для аналізу структури об'єктів на зображенні, визначення та інтерпретації взаємозв'язків між контурами. Кожний i -й елемент ієрархії H має таку структуру:

$$H_i = (\text{next}, \text{prev}, \text{first_child}, \text{parent}),$$

де next , prev – це індекси наступного і попереднього контурів на цьому рівні ієрархії. Якщо немає таких контурів, next і prev дорівнюють -1 . first_child – це індекс першого «дитячого» контуру. parent – це індекс «батьківського» контуру. Якщо немає таких контурів, ці значення рівні -1 .

При якісно зробленій фотографії краплі на зображенні має бути один контур круглої форми, який відповідає розмірам основи або меридіану краплі рідини. Тому наступною задачею є знаходження розмірів, а точніше радіусу контуру у формі кола на зображенні.

Для визначення розмірів контуру об'єкта у вигляді еліпса або кола в бібліотеці OpenCV, використовують функції «minEnclosingCircle» або «cv2.fitEllipse». Оскільки контур краплі рідини на зображенні за формою найближчий до кола, то доцільніше використовувати функцію «minEnclosingCircle». Ця функція призначена для знаходження найменшого кола, яке може повністю охопити контур, заданий набором точок.

Завдання визначення найменшого охоплюючого кола (Minimum Enclosing Circle, МЕС) для набору точок є класичною

задачею геометричної оптимізації. OpenCV імплементує ефективний метод для знаходження МЕС, але деталі внутрішньої реалізації не розкриті. Для вирішення задачі визначення найменшого охоплюючого кола зазвичай використовують ітераційні методи, методи найменших квадратів, алгоритм Веллца тощо [10].

Функція minEnclosingCircle визначає розміри кола як кількість точок зображення (пікселів), яка йому відповідає. Наступним етапом є визначення реальних розмірів кола на зображенні. Для цього разом із об'єктом невідомих розмірів на зображенні розміщують об'єкт з відомими розмірами. В якості такого об'єкта розміщують тіло простої форми – квадрат чи круг, розміри якого також вимірює програма комп'ютерного зору. На основі вимірювань і відомих розмірів розраховують коефіцієнт перетворення цифрового зображення.

Висновки

В роботі зроблений аналіз алгоритмів ідентифікації і визначення розмірів об'єктів на цифрових зображеннях. На основі зробленого аналізу запропоновано використання бібліотеки OpenCV для розробки програмного забезпечення, яке використовують у задачах визначення крайового кута змочування на основі вимірювання розмірів краплі рідини. Застосування спеціалізованої бібліотеки дозволить пришвидшити і полегшити процес розроблення такого програмного забезпечення.

Запропонований алгоритм ідентифікації і визначення розмірів краплі рідини з використанням технологій комп'ютерного зору дозволить застосувати програмне забезпечення для мікрокомп'ютерів, що відкриває широкі можливості для проектування приладів для дослідження поверхневих властивостей рідин.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Малкіна В. М., Мозговенко А. А. Визначення геометричних характеристик плодів черешні на основі технологій комп'ютерного зору. *Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*. С. 49-52. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/kn/wp-content/uploads/sites/16/malkyna-1.pdf>
2. Accurate Object Measurement with OpenCV Python. URL: <https://www.toolify.ai/ai-news/accurate-object-measurement-with-opencv-python-551694> (Дата звернення: 24.03.2025 р.)
3. Measure Size of an Object Using Python OpenCV. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/measure-size-of-an-object-using-python-opencv/> (Дата звернення: 24.03.2025 р.)
4. Біліщук В. Б., Костів Б. В., Боднар Р. Т. Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії. *Методи та прилади контролю якості*. 2014. № 2 (33). С. 59-65. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/231/235>
5. Біліщук В. Б. Застосування зразкових зображень для аналізу цифрових зображень фіксованих обертових крапель. *Методи та прилади контролю якості*. 2015. № 2 (35). С. 48- 53. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/273/277>
6. OpenCV. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenCV> (Дата звернення: 12.03.2025 р.)
7. Боднар Р. Т., Біліщук В. Б. Контроль змочування в промислових умовах оптичним методом. Збірник тез доповідей 8-ої міжнародної н/т конференції Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання 14 - 16 листопада 2017. м. Івано-Франківськ: ФІНТУНГ. С. 111-112. URL: <http://194.44.112.14/bitstream/123456789/5588/1/6177p.pdf>
8. Satoshi Suzuki and others. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985. Vol. 30(1). P. 32-46. doi: [10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7)
9. Canny J. A Computation Approach to Edge Detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell* 1986. Vol. 8. №6. P. 679-698. doi: [10.1109/TPAMI.1986.4767851](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851)
10. Задача про найменше коло. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/ Задача_про_найменше_коло](https://uk.wikipedia.org/wiki/Задача_про_найменше_коло) (Дата звернення: 24.03.2025 р.)

References

1. Malkina V. M., Mozghovenko A. A. Vyznachennia heometrychnykh kharakterystyk plodiv chereszni na osnovi tekhnolohii kompiuternoho zoru. *Materialy I Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Suchasni kompiuterni ta informatsiini systemy i tekhnolohii»*. P. 49-52. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/kn/wp-content/uploads/sites/16/malkyna-1.pdf> [in Ukrainian]
2. Accurate Object Measurement with OpenCV Python. URL: <https://www.toolify.ai/ai-news/accurate-object-measurement-with-opencv-python-551694> (Accessed: 24.03.2025 p.)
3. Measure Size of an Object Using Python OpenCV. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/measure-size-of-an-object-using-python-opencv/> (Accessed: 24.03.2025 p.)
4. Bilishchuk V. B., Kostiv B. V., Bodnar R. T. Metodyka analizu tsyfrovyykh zobrazhen dlia vyznachennia koordynat tochkov konturu fiksovanoi obertovoi krapli v mizhfaznii tenziometrii. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2014. No 2 (33). P. 59-65. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/231/235> [in Ukrainian]
5. Bilishchuk V. B. Zastosuvannia zrazkovyykh zobrazhen dlia analizu tsyfrovyykh zobrazhen fiksovanykh obertovyykh krapel. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2015. No 2 (35).P. 48- 53. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/273/277> [in Ukrainian]
6. OpenCV. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenCV> (Accessed: 12.03.2025 p.). [in Ukrainian]
7. Bodnar R. T., Bilishchuk V. B. Kontrol zmochuvannia v promyslovykh umovakh optychnym metodom. Zbirnyk tez dopovidei 8-oi mizhnarodnoi n/t konferentsii Suchasni prylady, materialy i tekhnolohii dlia neruivnogo kontroliu i tekhnichnoi diahnostyky mashynobudivnogo i naftohazopromysloвого обладнання 14 - 16 lystopada 2017. Ivano-Frankivsk: IFINTUNH. P. 111-112. URL: <http://194.44.112.14/bitstream/123456789/5588/1/6177p.pdf> [in Ukrainian]
8. Satoshi Suzuki and others. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985. Vol. 30(1). P. 32-46. doi: [10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7)

9. Canny J. A Computation Approach to Edge Detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell 1986. Vol. 8. No 6. P. 679-698. doi: [10.1109/TPAMI.1986.4767851](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851)

10. Zadacha pro naimenshe kolo. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/ Задача_про_найменше_коло](https://uk.wikipedia.org/wiki/Задача_про_найменше_коло) (Accessed: 24.03.2025 p.). [in Ukrainian]

APPLICATION OF COMPUTER VISION TO DETERMINE LIQUID DROP SIZE IN DIGITAL IMAGES

Bilishchuk V. B.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0196-412X>
e-mail: viktor.bilishchuk@nung.edu.ua

Krynytskyi O. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>
e-mail: hipnoz23@ukr.net

Vyvytska L. A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8491-1239>
e-mail: lidia.vyvytska@nung.edu.ua

Abstract. The article solves the problem of determining the size of a liquid drop in a digital image using computer vision technologies using the OpenCV library, which can be used to track the surface properties of liquids, in particular the marginal wetting angle. The marginal wetting angle is calculated based on the measured radius of the base or meridian and a given volume of the liquid drop. It is proposed to measure the radius of a liquid drop by obtaining a digital image of the drop, and determine the radius using computer vision algorithms. The article shows that computer vision algorithms involve performing a number of operations. First, the color image is converted to gray. Then the image is blurred by convolution with a Gaussian kernel to reduce the influence of noise. The next stage is to select the contours of objects in the image using the Kenny algorithm, which calculates the convolution using the Sobel operator. Further image processing is performed by filtering to thin out the edges of the contours and suppress the contours using two threshold levels. This allows us to obtain contours with a thickness of one pixel and eliminate isolated areas of contours that do not belong to the actual contour of the droplet, but are the result of unremoved noise in the image. The work indicates that the correct choice of these thresholds affects the efficiency of the edge detection algorithm. The final stage is the application of the image scanning algorithm to form arrays of image pixel coordinates that belong to the contour of the droplet. Based on the array of pixel coordinates, the radius of the circle that corresponds to them is determined. The real dimensions of the droplet in the image are recalculated using a calibration object of known dimensions. Such an object can be a body of a simple shape - a square, a circle, etc. Based on the measured and known dimensions of the calibration body, the conversion factor of the digital image is calculated. The proposed algorithm is implemented by the functions of the OpenCV library `cvtColor`, `GaussianBlur`, `findContours` and `minEnclosingCircle`, which allows us to effectively develop software using OpenCV libraries. Such software can be implemented on microcomputers, which opens up wide opportunities for the development of devices for studying the surface properties of liquids.

Keywords: contact angle; OpenCV; image convolution; contour.



**Методи і прилади вимірювання витрати
рідкої і газоподібної фаз**

Прийнято 29.10.2025. Прорецензовано 24.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 620.11:006

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-68-81

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ
ШЛЯХОМ ГРАДУЮВАННЯ НА ЕТАЛОННІЙ БАЗІ
ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»****Бас О. А.**

Кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії центру наукового забезпечення

Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0732-6906>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Середюк Д. О.

Кандидат технічних наук, начальник центру наукового забезпечення

Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-5454-4263>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Пелікан Ю. Т.

Начальник науково-дослідної лабораторії центру наукового забезпечення

Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-8302-9532>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Запропоноване посилання: Бас, О. А., Середюк, Д. О., Пелікан, Ю. Т., Тисяк, А. В., Катамай, В. Б. & Мануляк, Р. Т. (2025). Підвищення точності ультразвукових лічильників газу шляхом градуювання на еталонній базі ДП «Івано-Франківськстандартметрологія». *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 68-81. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-68-81

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Тисяк А. В.

Інженер з метрології випробувальної лабораторії центру наукового забезпечення Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0004-8730-9437>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Катамай В. Б.

Інженер з метрології випробувальної лабораторії центру наукового забезпечення Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-0724-3943>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Мануляк Р. Т.

Науковий співробітник науково-дослідної лабораторії центру наукового забезпечення Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

76006, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-6749-6632>

e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Анотація. У статті досліджується процес градування ультразвукових лічильників газу як ключовий елемент забезпечення надійності та точності системи обліку. Завдяки своїм перевагам – відсутності механічних рухомих елементів, високій точності вимірювань, стабільності характеристик і тривалому терміну служби – ультразвукові лічильники набувають дедалі більшого поширення. Водночас, для підвищення точності ультразвукових лічильників газу можливо провести їх градування, оскільки вони містять вбудовані пристрої корекції похибок. У роботі запропоновано та проаналізовано математичні методи корекції похибок, зокрема із застосуванням сталого коефіцієнта, поліноміальних функцій другого–четвертого порядків та кусково-лінійної апроксимації. Представлено результати експериментальних досліджень і проведено розрахунок середньозважених похибок. Показано, що виконання градування істотно зменшує невизначеність вимірювань дозволяє зменшити систематичні відхилення та підвищити достовірність даних вимірювань. Окрему увагу приділено еталонним установкам ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ», зокрема обґрунтовано необхідність проведення градування на еталонних установках, що забезпечують виконання вимірювань із найменшим значенням невизначеності. Додатково підкреслюється, що результати градування мають безпосередній вплив на комерційний облік газу, а отже, такі роботи повинні виконуватись тільки в акредитованих лабораторіях, які володіють відповідним досвідом та обладнанням.

Ключові слова: об'єм, об'ємна витрата газу, простежуваність, еталон, установка, калібрування, градування, невизначеність.

Вступ

Ультразвукові лічильники газу посідають одне з провідних місць у сучасних системах вимірювання та комерційного обліку природного газу. Їх стрімке поширення зумовлене поєднанням високої точності вимірювань, надійності, стабільності показників та відсутності механічних ру-

хомих елементів, що мінімізує вплив зносу і забезпечує тривалий термін експлуатації. Завдяки цим характеристикам ультразвукові лічильники широко застосовуються як на магістральних газопроводах, так і в системах розподільчих мереж, на комерційних вузлах обліку та промислових підприємствах.

Принцип роботи ультразвукових лічильників базується на вимірюванні часу проходження ультразвукових імпульсів крізь потік газу. Залежно від швидкості руху середовища, змінюється час поширення сигналу від одного перетворювача до іншого, що дозволяє точно визначити швидкість потоку, а отже та об'ємну витрату або об'єм газу. Використання кількох пар датчиків дає змогу враховувати профіль швидкостей у трубопроводі, компенсуючи турбулентність і нерівномірність потоку. На відміну від традиційних турбінних чи ротаційних лічильників, ультразвукові прилади характеризуються низьким гідравлічним опором, не викликають втрат тиску в системі та забезпечують вимірювання навіть у складних умовах, зокрема за наявності домішок, пилу, вологи або незначних коливань температури.

Переваги ультразвукових лічильників доповнюються широкими можливостями інтеграції з сучасними інформаційними системами моніторингу та автоматизованого керування. Вони підтримують цифрові протоколи зв'язку, здатні до самодіагностики та передавання даних у реальному часі, що робить їх важливим елементом інтелектуальних енергетичних мереж. Разом із тим, навіть найсучасніші конструкції потребують регулярного метрологічного контролю для забезпечення стабільності вимірювань упродовж усього терміну експлуатації.

Одним із ключових процесів, який гарантує достовірність показів ультразвукових лічильників, є процедура градування. На відміну від повірки, що лише підтверджує відповідність приладу встановленим нормам, градування передбачає визначення і коригування його метрологічних характеристик у реальних умовах експлуатації. Ця процедура дозволяє усунути систематичні відхилення, уточнити коефіцієнт перетворення лічильника та підвищити достовірність. Зокрема, для ультразвукових лічильників градування дає змогу адаптувати алгоритми обробки сигналів до індивідуальних особливостей конкретного зразка, що істотно покращує його метроло-

гічну характеристику та підвищує точність у всьому робочому діапазоні.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у вдосконаленні процесів градування ультразвукових лічильників газу з метою підвищення точності та достовірності їхніх метрологічних характеристик.

Мета роботи – аналіз, обґрунтування та експериментальна перевірка методів градування, що застосовуються на еталонній базі ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ», а також визначення їхнього впливу на загальну невизначеність вимірювань.

Основний текст статті

У практиці вимірювань витрати та об'єму газу особливого значення набуває градування ультразвукових лічильників. Хоча чинне законодавство України прямо не вимагає проведення цієї процедури, вона все частіше впроваджується операторами газотранспортних та газорозподільних мереж, які прагнуть досягти максимальної точності та відповідності європейським підходам.

На відміну від процесу повірки, градування не лише перевіряє відповідність метрологічних характеристик встановленим вимогам, а й дозволяє здійснювати їхнє коригування як на апаратному, так і на програмному рівнях. Завдяки багатопробним конфігураціям ультразвукові лічильники можуть проходити градування із застосуванням вбудованого програмного забезпечення, що адаптує алгоритми обробки сигналів до індивідуальних особливостей кожного приладу.

Процедура градування здійснюється відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 17089-1 [1] та експлуатаційної документації. Процедура включає: перевірку метрологічних характеристик лічильника [2], виявлення та аналіз помилок, а також їх подальшу корекцію. Для забезпечення достовірності результатів необхідно дотримуватись регламентованих при проведенні повірки умов температури, тиску та вологості. Окрім зазначеного, важливим моментом є застосування еталонної установки, яка

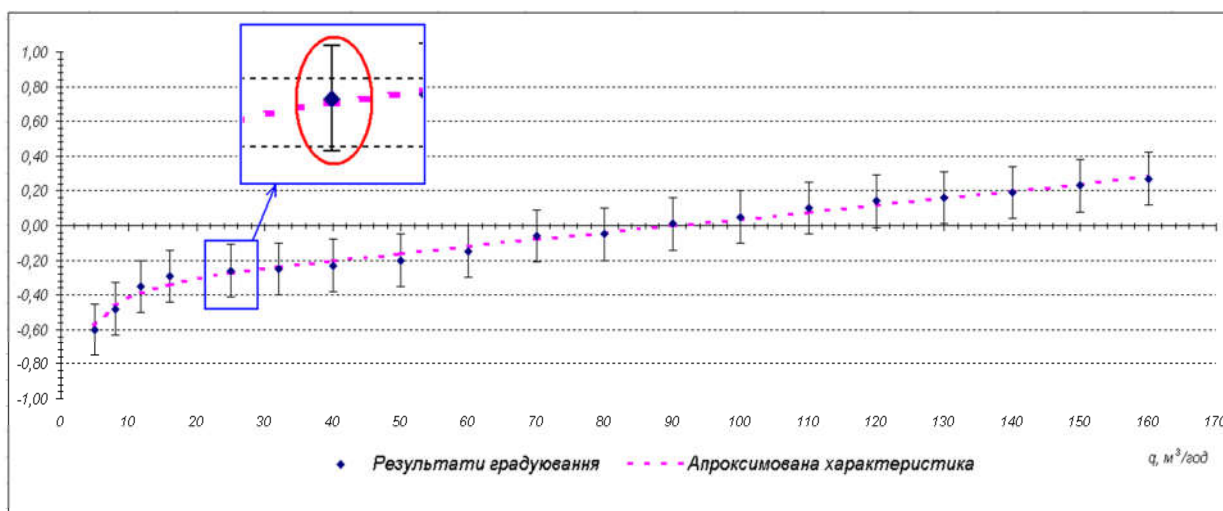


Рисунок 1 – Градувальна характеристика лічильника газу зі значенням невизначеності

забезпечує виконання вимірювань із мінімальним значенням невизначеності. Слід звернути увагу на те, що під час здійснення процедури градування змінена характеристика лічильника газу буде застосована зі значенням невизначеності, яке не може бути меншим від невизначеності отриманих результатів вимірювань за допомогою відповідної еталонної установки, на якій проводилося градування.

На рис. 1 наведені результати градування лічильника газу у вигляді набору окремих похибок. За допомогою програмного продукту виробника або ж програми Excel здійснюється апроксимація отриманих даних для побудови характеристики лічильника, яку можливо описати лінійною залежністю (в ідеальному варіанті) або ж поліноміальною залежністю різних порядків. Також на рис. 1 зображений фрагмент характеристики лічильника газу із границями невизначеності, яка присвоєна лічильнику газу після процедури градування. Границі невизначеності, якщо розглянути спрощену модель вимірювання, будуть складатися із випадкової складової, яка характеризує повторюваність лічильника (тип А) та невизначеності еталонної установки, на якій проводилося градування (тип В). Розрахунок розширеної невизначеності вимірювання лічильником матиме наступний вигляд:

$$U_M = \sqrt{2 \cdot (u_{AM})^2 + U_E^2}, \quad (1)$$

де u_{AM} – невизначеність по типу А лічильника, градування якого проводиться на еталоні;

U_E – розширена невизначеність еталона.

Тому, при проведенні процедури градування лічильника газу ультразвукового типу надзвичайно важливим є відповідальний вибір еталонної установки, на якій буде проводитись дана процедура. Оскільки, на перший погляд, процедура, яка наразі є не обов'язковою і здебільшого добровільною, має під собою цілком метрологічне підґрунтя. Проведення градування на установці, яка не пройшла процедуру калібрування, не простежується та не отримала розмір одиниці вимірювання від державного первинного та вторинного еталонів або ж її оцінені під час калібрування значення невизначеності, які складають суттєву величину від границь максимально допустимої похибки (МДП) лічильника газу під час градування лічильника суттєво погіршить достовірність його вимірювання, а не покращить її. Таким чином, за деяких обставин можлива ситуація, коли процедура градування насправді тільки «погіршить» характеристику лічильника, оскільки реальне значення буде близьке або ж навіть і перевищувати його МДП. Хоча, за результатами градування в лічильника буде практично лінійна характеристика.

З огляду, на вищезазначене, процедури градування лічильників газу ультразвукового типу рекомендовано проводити на



Рисунок 2 – Національний державний первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕГУ 03-01-15

еталонних установках, які мають найвищу точність в Україні, та, відповідно, здійснюють вимірювання з найменшою невизначеністю.

В ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» як науковому метрологічному центрі створений комплекс еталонів та еталонних установок, які мають найширший динамічний діапазон об'ємної витрати газу в Україні та забезпечують отримання результату вимірювань зі значенням найменшої невизначеності. Зокрема, вимірювальні та калібрувальні можливості національного первинного та вторинних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу занесені до Баз даних проведених звірень національних еталонів Міжнародного бюро мір та ваг (KCDV BIPM) з ідентифікатором СМС – рядків під шифрами UA1 – UA4 в діапазоні об'ємної витрати газу від 0,016 до 7800 м³/год [3].

Залежно від необхідного діапазону об'ємної витрати газу, ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» може провести градування ультразвукових лічильників газу на одному із наступних еталонів.

Державний первинний еталон являє собою установку дзвоного типу [4], яка реалізує відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу шляхом витіснення з дзвоного мірника порції повітря, приведеної до стандартних умов, об'єм якої чітко визначений шляхом забезпечення стабільності геометричних параметрів мірника: діаметра та висоти. Відтворення одиниці об'ємної витрати газу, в свою чергу, реалізується при умові стабільного вертикального переміщення дзвоного мірника з різним значенням заданої швидкості за певний часовий проміжок. Метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу (рис. 2) наступні: діапазон вимірювання об'ємної витрати газу від 1 м³/год до 250 м³/год, розширена невизначеність 0,07 %.

Вторинні еталони функціонально об'єднані в одну еталонну установку [5]. Принцип роботи установки побудовано з використанням методу сумування або ж накопичення значення об'ємної витрати газу шляхом застосування в складі установки наборів паралельно встановлених спе-



Рисунок 3 – Процес градуювання ультразвукового лічильника газу із застосуванням вторинних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12

ціалізованих еталонних лічильників, кожен з яких отримує одиницю об'єму та об'ємної витрати газу шляхом індивідуального калібрування безпосередньо на державному первинному еталоні ДЕТУ 03-01-15 (UA1) або від набору аналогічних ідентичних еталонів порівняння, які, в свою чергу, також застосовуються паралельно для отримання необхідного значення об'ємної витрати газу. В склад установки входять дев'ять еталонних лічильників газу. На рис. 3 показаний процес градуювання ультразвукового лічильника газу із застосуванням вторинних еталонів ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12 (UA4).

Сумарний об'єм еталонної установки, приведений до стандартних умов V_E , з врахуванням індивідуальної поліноміальної характеристики еталонних лічильників розраховується за формулою:

$$V_E = \sum_i^n \left(\frac{V_{N,i} \cdot \frac{P_{N,i} \cdot 293,15K}{T_{N,i} \cdot 101,325Pa}}{1 + \frac{\delta_{N,i}}{100}} \right), \quad (2)$$

де V_N – об'єм вимірний i -им еталонним лічильником; δ_N – значення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника, розрахованого згідно апроксимаційного полінома; P_N – абсолютне значення тиску на i -му еталонному лічильнику; T_N – значення температури на i -му еталонному лічильнику.

Метрологічні характеристики вторинних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12 (UA4) наступні: в діапазоні вимірювання об'ємної витрати газу від 1 до 1250 м³/год розширена невизначеність становить 0,11%; в діапазоні від 50 до 6500 м³/год розширена невизначеність – 0,12%; в діапазон від 6500 до 7800 м³/год розширена невизначеність – 0,14 %.

Окрім комплексу національних еталонів, фахівцями ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» спроектована та виготовлена еталонна установка з максимальною витратою до 25000 м³/год, яка складається із системи трубопроводів з агрегатами для створення потоку газу, набору паралельно встановлених еталонних



Рисунок 4 – Еталонна установка одиниць об'єму та об'ємної витрати газу Stand-25000 в діапазоні об'ємної витрати від 1 м³/год до 25000 м³/год

лічильників газу (ЕЛ) і досліджуваного лічильника газу, встановленого послідовно до еталонних лічильників, системи регулювання витрати, перетворювачів температури й тиску, системи збору, передачі та обробки інформації. В складі установки паралельно встановлені еталонні лічильники DN 300 з можливістю одночасної роботи. При цьому набір з шести ЕЛ механічно розв'язаний від агрегатів створення потоку газу і досліджуваного лічильника газу через спеціалізовані вібровставки, чотири паралельних еталонних ліній з ЕЛ з витратою 6500 м³/год пропорційні зростанню значення досліджуваної витрати [6].

Принцип установки побудований на порівнянні приведеного до стандартних умов об'єму газу, який облікував еталонний лічильник з об'ємом, вимірним дослідним лічильником, який повіряється. В якості еталонних лічильників в установці застосований набір з чотирьох турбінних та двох роторних лічильників. На рис. 4 представлений зовнішній вигляд установки одиниць об'єму та об'ємної витрати газу з еталонними лічильниками Stand-25000 в діапазоні об'ємної витрати від 1 до 25000 м³/год.

Паралельне використання таких еталонних лічильників газу у складі еталонної установки дозволяє збільшити діапазон вимірюваної витрати газу, що залежить від кількості встановлених і задіяних еталонних лічильників газу, забезпечити метрологічну простежуваність вимірювань до національної еталонної бази, а саме до вторинних еталонів. Лічильники пройшли калібрування на вторинних еталонах одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12 (UA4), які за результатами міжнародних звірень мають підтверджені метрологічні характеристики, таким чином їхні динамічні діапазони будуть перетинатися за декількох значень об'ємних витрат. Це дає суттєві переваги, в порівнянні із типовими повірочними установками з еталонними лічильниками, в яких діапазони еталонних лічильників перетинаються тільки за одного спільного значення об'ємної витрати газу.

Метрологічні характеристики установки з еталонними лічильниками Stand-25000 наступні: діапазон вимірювання об'ємної витрати газу від 1 до 25000 м³/год, розширена невизначеність – 0,167 %.

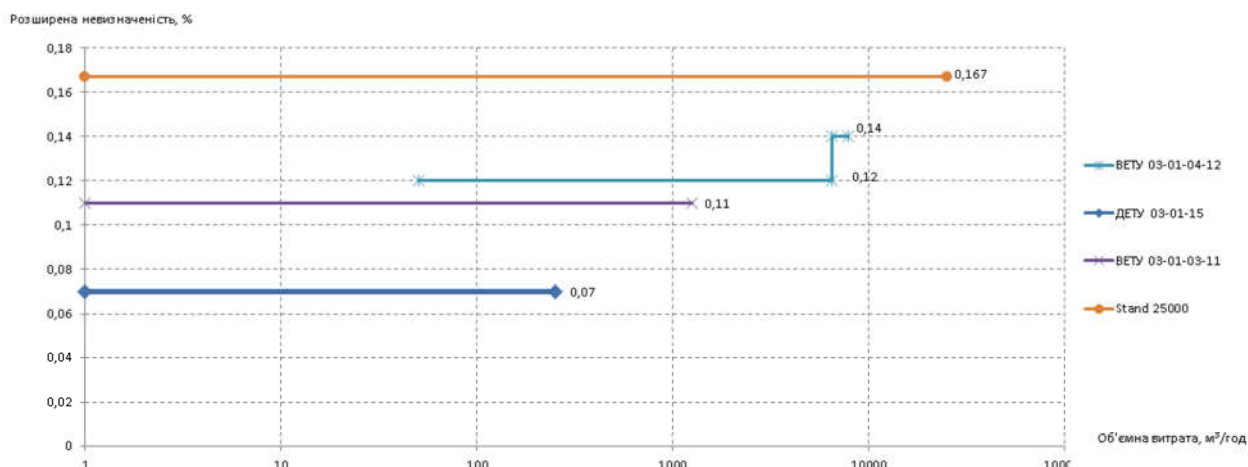


Рисунок 5 – Графічна інтерпретація співвідношення діапазонів одиниці об'ємної витрати газу еталонними установками із значеннями розширеної невизначеності вимірювання

Для візуального оцінювання співвідношення діапазонів вимірювання одиниці об'ємної витрати газу національного первинного еталона ДЕТУ 03-01-15 (UA1), вторинних еталонів ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12 (UA4) та установок з еталонними лічильниками Stand- 25000 з врахуванням значення розширеної невизначеності, наведений рис.5. Для наочності значення одиниці об'ємної витрати газу представлені у вигляді логарифмічної шкали в діапазоні об'ємної витрати від 1 до 25000 м³/год, що наразі є найширшим діапазоном в Україні із найменшим значенням розширеної невизначеності.

Тепер розглянемо основні етапи проведення градування лічильників газу ультразвукового типу на еталоні. Основні етапи градування передбачають: підготовку до досліджень, визначення метрологічних характеристик лічильника, розрахунок середньозваженої похибки та застосування методів корекції (постійний коефіцієнт, поліноміальна апроксимація, кусочно-лінійна інтерполяція), після чого виконується повторна перевірка метрологічних характеристик та пломбування.

Підготовка до градування передбачає, що ультразвуковий лічильник газу монтується на еталонну установку, після чого проводиться перевірка герметичності та контроль витоків, щоб забезпечити його правильну роботу.

Процедура градування:

1. Визначення метрологічних характеристик лічильника

На цьому етапі проводиться серія вимірювань у визначених точках діапазону витрат, щоб оцінити точність приладу та виявити характер відхилень.

2. Розрахунок середньозваженої похибки

На основі отриманих результатів вимірювань обчислюється середньозважена похибка, яка враховує вплив кожної точки в діапазоні на загальну точність лічильника.

3. Градування одним із методів, залежно від характеру відхилень:

Постійний коефіцієнт: застосовується, якщо похибка стабільна по всьому діапазону.

Поліном: використовується у випадку плавного нелінійного відхилення, дозволяє побудувати коригувальний поліном (наприклад, II, III, порядку або IV порядку).

Кусково-лінійна апроксимація: ефективна при наявності ділянок з різною поведінкою похибки, де точність краще забезпечити розділенням діапазону на інтервали з окремими коефіцієнтами.

В таблиці 1 та на рис. 6 наведені реальні метрологічні характеристики ультразвукового лічильника газу типорозміру G1600. На його прикладі проведемо градування для усіх доступних методів та оцінимо результати такої процедури.

Для здійснення градування методом постійного коефіцієнта необхідно провести

Таблиця 1 – Результати дослідження ультразвукового лічильника газу типорозміру G1600

Об'ємна витрата, м ³ /год	20 Q _{min}	125 0.05Q _{max}	250 0.1Q _{max}	625 0.25Q _{max}	1000 0.4Q _{max}	1750 0.7Q _{max}	2500 Q _{max}
Похибка, %	-0,23	-0,14	-0,53	-0,60	-0,63	-0,76	-0,88

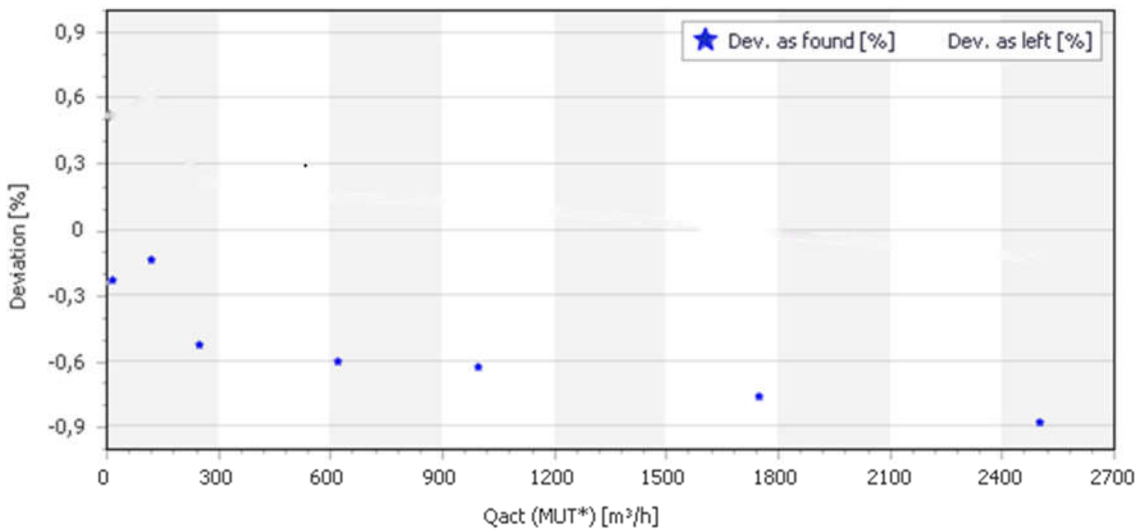


Рисунок 6 – Отримане значення метрологічних характеристик ультразвукового лічильника

розрахунок середньозваженої похибки (WME). Розрахунок здійснюється за такою формулою:

$$WME = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (3)$$

δ – основна відносна похибка лічильника, що повіряється (у відсотках); q_i – значення об'ємної витрати газу;

$$k_i = \frac{q_i}{q_{max}} \text{ при } q_i \leq 0,7q_{max};$$

$$k_i = 1,4 - \frac{q_i}{q_{max}} \text{ при } 0,7q_{max} < q_i \leq q_{max}.$$

Для отриманої метрологічної характеристики лічильника газу, розраховане значення складає WME = -0,7479.

Проведемо градування методом постійного коефіцієнта AF, розрахунок якого здійснюється згідно:

$$AF = \frac{1}{1 + \frac{WME}{100\%}} = 1,00753. \quad (4)$$

Наступний метод градування полягає у застосуванні поліноміальної корекції. Залежно від кількості точок визначення метрологічних характеристик в діапазоні від Q_{min} до Q_{max}, обирається порядок полі-

нома. Зокрема, градування може здійснюватися із застосування полінома II, III або IV порядку.

Наведемо розрахунок полінома II порядку при проведенні градування зі значенням метрологічних характеристик для 5 дослідних точок.

Формула градувального полінома наступна (5):

$$(Q1) = a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q. \quad (5)$$

Коефіцієнти полінома:

$$a_{-1} = -3,500830 \cdot 10^{-2};$$

$$a_0 = 1,003762;$$

$$a_1 = 2,218830 \cdot 10^{-6}.$$

Наступним представимо розрахунок полінома III порядку при проведенні градування зі значенням метрологічних характеристик для 6 дослідних точок.

Формула градувального полінома наступна (6):

$$(Q2) = a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q + a_2Q^2. \quad (6)$$

Коефіцієнти полінома:

$$a_{-1} = -1,251669 \cdot 10^{-2};$$

$$a_0 = 1,00280;$$

$$a_1 = 4,981434 \cdot 10^{-6};$$

$$a_2 = -1,041072 \cdot 10^{-9}.$$

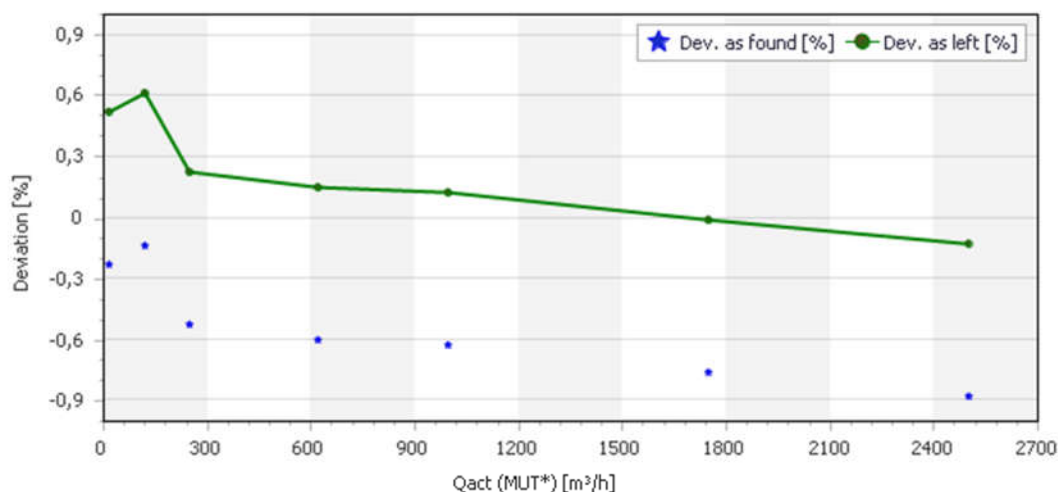


Рисунок 7 – Характеристика ультразвукового лічильника після градуювання методом постійного коефіцієнта

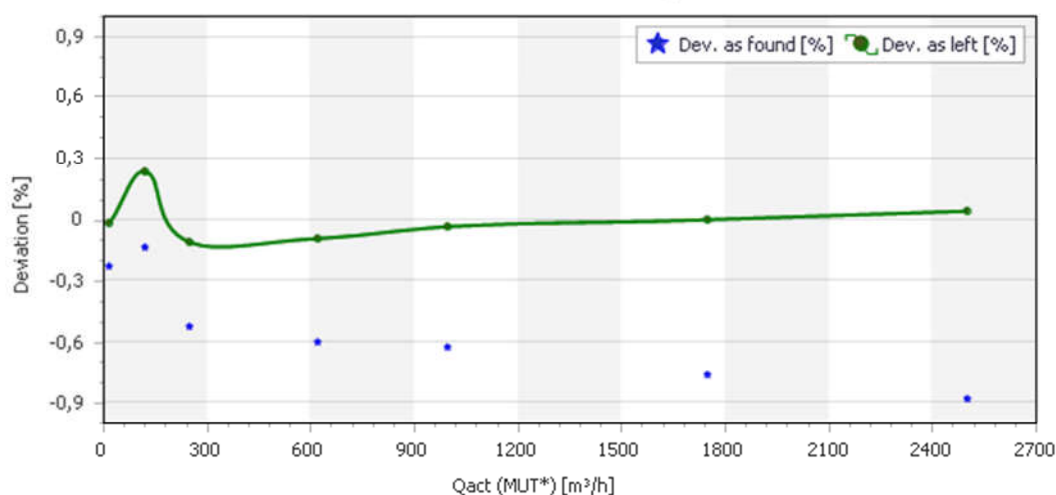


Рисунок 8 – Характеристика ультразвукового лічильника після градуювання із застосуванням полінома II порядку

Останній варіант передбачає застосування полінома IV порядку при проведенні градуювання зі значенням метрологічних характеристик для 7 дослідних точок.

Формула градуювального полінома наступна (7):

$$(Q3) = a_{-2}Q^{-2} + a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q + a_2Q^2. \quad (7)$$

Коефіцієнти полінома:

$$a_{-2} = 1,938767 \cdot 10^{-1};$$

$$a_{-1} = -1,115551;$$

$$a_0 = 1,009676;$$

$$a_1 = -3,261947 \cdot 10^{-6};$$

$$a_2 = 1,272136 \cdot 10^{-9}.$$

Останній метод градуювання передбачає застосування кусково-лінійної апроксимації, тобто характеристика лічильника описується набором лінійних прямих. При

цьому розрахункова характеристика лічильника виражена горизонтальною лінією, максимально наближеною до характеристики лічильника з «нульовим» відхиленням.

Висновки

З огляду на розвиток енергетичної інфраструктури України, підвищення точності обліку природного газу набуває стратегічного значення. Невеликі похибки у вимірюванні витрати та об'єму можуть призводити до значних фінансових втрат у комерційних операціях, тому впровадження регулярного градуювання із застосуванням високоточних еталонів є не лише технічним, а й економічно обґрунтованим кроком.

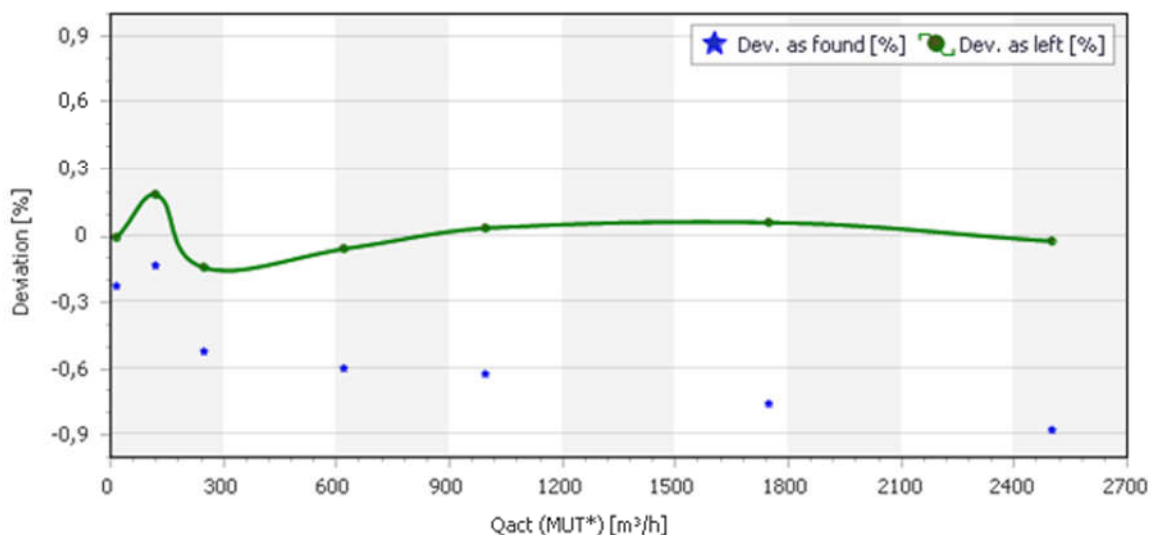


Рисунок 9 – Характеристика ультразвукового лічильника після градування із застосуванням полінома III порядку

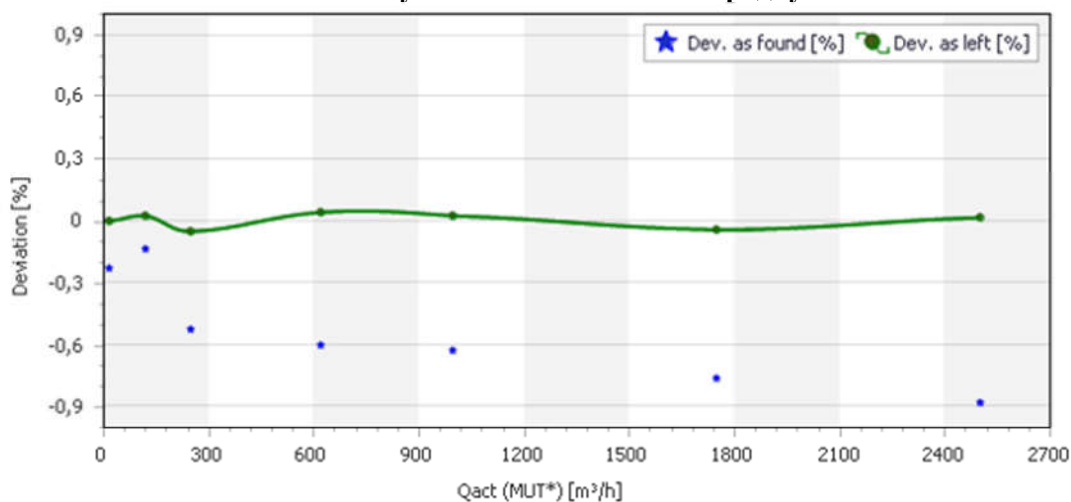


Рисунок 10 – Характеристика ультразвукового лічильника після градування із застосуванням полінома IV порядку

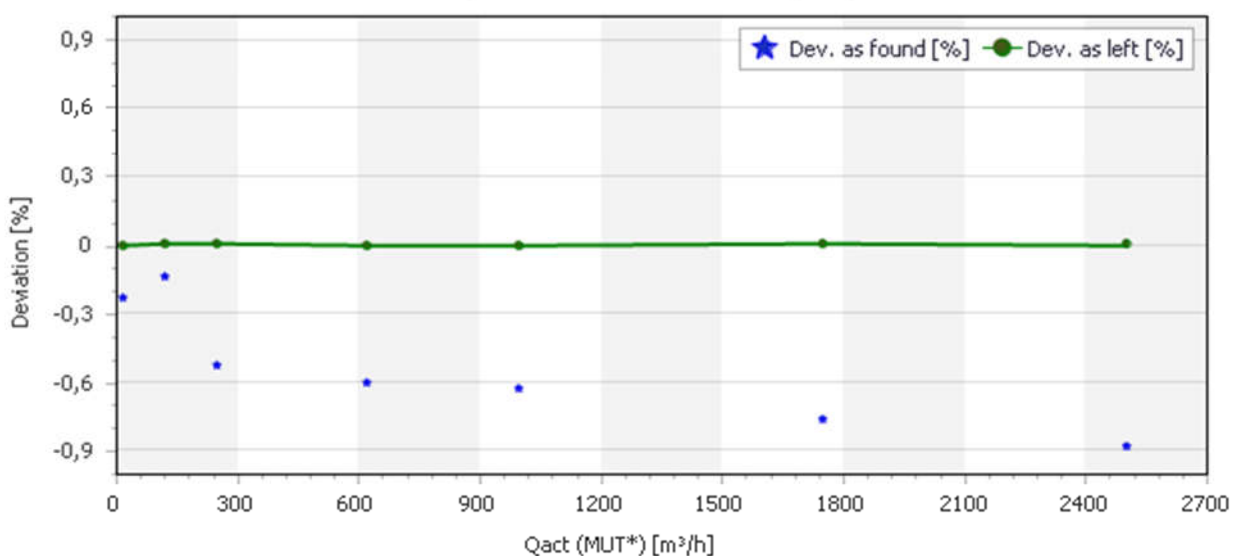


Рисунок 11 – Характеристика ультразвукового лічильника після градування із застосуванням кусково-лінійної апроксимації

На відміну від стандартної повірки, градування дозволяє не лише перевірити відповідність приладу метрологічним характеристикам, а й здійснити їх коригування, підвищивши точність вимірювань у всьому робочому діапазоні. Застосування різних методів корекції (метод постійного коефіцієнта, поліноміальна апроксимація, кусково-лінійна інтерполяція) дає змогу індивідуально враховувати особливості кожного приладу, мінімізуючи похибки вимірювань.

Здійснення градування можливе лише на еталонних установках із гарантованою простежуваністю до міжнародної системи SI. У цьому контексті особливе значення

має діяльність ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ», на базі якого створено комплекс еталонних установок одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Використання таких установок дає змогу отримувати результати вимірювань із мінімальними значеннями невизначеності, яке відповідає вимогам міжнародних стандартів ДСТУ ISO 17089-1 та ДСТУ OIML R 137-1-2.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 17089-1:2021 Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Ультразвукові лічильники газу. Частина 1. Лічильники для комерційного обліку та вимірювання в газорозподільчих системах (ISO 17089-1:2019, IDT)
2. ДСТУ OIML R 137-1-2:2018 ДСТУ OIML R 137-1-2:2018 Лічильники газу. Частина 1. Метрологічні й технічні вимоги. Частина 2. Методи підтвердження метрологічних і технічних характеристик (OIML R 137-1-2:2014, IDT)
3. Державне підприємство "Івано-Франківськстандартметрологія", Україна. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?includedFilters=cmcBranches.Fluid+flow&excludedFilters=&page=0&cmcStatus=&keywords=ukraine>
4. Петришин І. С., Вошинський В. С., Джочко П. Я., Безгачнюк Я. В., Середюк Д. О., Вошинський В. В., Андрук М. С. Удосконалення державного первинного еталона одиниці об'єму та об'ємної витрати газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2016. № 1 (36). С. 38 – 47. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/306/311>
5. Пристрій для калібрування, метрологічної атестації та повірки лічильників і витратомірів газу: пат 63180 Україна № u201105256; заявл. 26.04.2011; опубл. 26.09.2011 Бюл. № 18.
6. Малісевич В. В., Середюк, Д. О., Пелікан Ю. Т., Катамай В. Б. (2024). Проведення метрологічних досліджень лічильників газу в діапазоні об'ємної витрати газу до 25 000 м³/год в рамках енергетичної безпеки України. *Методи та прилади контролю якості*. 2024. № 2(53). С. 33–45. doi: 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-33-45

References

1. DSTU ISO 17089-1:2021. Measurement of fluid flow in closed conduits. Ultrasonic gas meters. Part 1: Meters for custody transfer and distribution metering (ISO 17089-1:2019, IDT) [in Ukrainian]
2. DSTU OIML R 137-1-2:2018. Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological and technical performance tests (OIML R 137-1-2:2014, IDT) [in Ukrainian]
3. State Enterprise "Ivano-Frankivskstandardmetrologia", Ukraine. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?includedFilters=cmcBranches.Fluid+flow&excludedFilters=&page=0&cmcStatus=&keywords=ukraine>
4. Petryshyn I. S., Voshchynskyi V. S., Dzhochko P. Ya., Bezhachniuk Ya. V., Seredyuk D. O., Voshchynskyi V. V., Andruk M. S. Improvement of the national primary standard of the unit of gas volume and volumetric flow rate. *Methods and Devices of Quality Control*. 2016. Vol. 1 (36). P. 38–47. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/306/311> [in Ukrainian]

5. Device for calibration, metrological certification, and verification of gas meters and flow meters: patent 63180 Ukraine No. u201105256; filed 26.04.2011; published 26.09.2011 Bulletin No. 18. [in Ukrainian]

6. Malisevych V. V., Seredyuk D. O., Pelikan Yu. T., Katamay V. B. Conducting Metrological Research of Gas Meters in the Flow Range up to 25,000 m³/h within the Framework of Ukraine's Energy Security. *Methods and Devices of Quality Control*. 2024. Vol. 2(53). P. 33–45. doi: [10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-33-45](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-33-45)[in Ukrainian]

IMPROVING THE ACCURACY OF ULTRASONIC GAS METERS THROUGH CALIBRATION AT THE REFERENCE STANDARDS OF SE "IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY"

Bas O. A.

Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the research laboratory of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0732-6906>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Serediuk D. O.

Candidate of Technical Sciences, head of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5454-4263>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Pelikan Yu. T.

Head of the scientific research laboratory of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8302-9532>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Tysiak A. V.

Metrology engineer of the testing laboratory of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-8730-9437>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Katamai V. B.

Metrology engineer of the testing laboratory of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology
and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-0724-3943>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Manuliak R. T.

Researcher of the research laboratory of the scientific support center
State enterprise "Ivano-Frankivsk scientific-production center for standardization, metrology
and certification"
76006, 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6749-6632>
e-mail: ifstandartmetrology@gmail.com

Abstract. The article explores the calibration process of ultrasonic gas meters as a key element in ensuring the reliability and accuracy of metering systems. Due to their advantages – the absence of mechanical moving parts, high measurement accuracy, stability of characteristics, and long service life – ultrasonic meters are becoming increasingly widespread. At the same time, to enhance the accuracy of ultrasonic gas meters, calibration can be carried out, as they contain built-in error correction devices. The paper proposes and analyzes mathematical methods of error correction, including the use of a constant coefficient, polynomial functions of the second to fourth order, and piecewise-linear approximation. The results of experimental studies are presented, and the calculation of weighted average errors is performed. It is shown that calibration significantly reduces measurement uncertainty, helps to minimize systematic deviations, and increases the reliability of measurement data. Special attention is given to the reference facilities of SE "IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY", in particular, the necessity of performing calibration on reference installations that ensure measurements with the lowest possible uncertainty is substantiated. Additionally, it is emphasized that calibration results have a direct impact on commercial gas metering. Therefore, such work must be performed only in accredited laboratories with the necessary experience and equipment.

Keywords: gas volume; volumetric flow rate; traceability; standard; prover; calibration; uncertainty.



МОДЕЛЬ ЛІЧИЛЬНИКА ОБ'ЄМУ ТА ЕНЕРГІЇ ГАЗУ

Шульга В. А.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0009-6420-4444>

e-mail: vitaliy.shulga@ifgas.com.ua

Анотація. Об'єктом дослідження в роботі є методи вимірювання об'єму та енергії природного газу. Метою роботи є розробка удосконаленого методу та моделі лічильника для вимірювання об'єму та енергії природного газу з використанням інфокомунікаційних технологій. Наведено огляд ряду існуючих засобів вимірювань об'єму природного газу та розроблених засобів та пристроїв для вимірювання енергії газу. Виявлено, що лічильники, які використовуються для комерційного обліку природного газу, вимірюють лише об'єм газу, а відповідне значення енергії газу визначається розрахунковим методом, що, з метрологічної точки зору, не є вимірюванням енергії. Розроблені та описані в науковій літературі нові моделі лічильників енергії природного газу мають можливість вимірювання тим чи іншим методом енергії природного газу та відображення значення виміряної енергії газу на їх відлікових пристроях, але у цих засобах вимірювань відсутні пристрої для передавання даних про виміряні значення енергії газу до газопостачальних організацій. Розроблено модель лічильника об'єму та енергії природного газу, який зможе реалізувати облік природного газу в одиницях об'єму та одиницях енергії газу з подальшим передаванням даних про обліковані обсяги газу до газопостачальних організацій. Використання запропонованого лічильника енергії газу забезпечить здійснення комерційного обліку енергії газу з усіма необхідними атрибутами такого обліку: вимірювання енергії природного газу, відображення виміряних значень на відліковому пристрої лічильника та автоматичне передавання показів про спожиту енергію до газопостачальних організацій. Проведено порівняльний аналіз розробленого в даній статті лічильника об'єму та енергії газу з лічильниками, що зараз використовуються для комерційного обліку природного газу та з розробленими конструкціями лічильників газу. Проведений аналіз засвідчив переваги розробленого лічильника у порівнянні з існуючими аналогами.

Ключові слова: енергія, природний газ, лічильник енергії, газопостачальна організація, комерційний облік.

Вступ

Останні 10 років актуальним питанням функціонування енергоринку України є реалізація обліку природного газу в одиницях енергії. Саме стільки часу вже діють нормативно-правові документи [1, 2], які регламентують перехід від обліку газу в кубометрах до обліку в одиницях енергії. Однак, це досі повноцінно не реалізовано в промисловості та майже не реалізовано в комунально-побутовій сфері. Наразі

здебільшого застосовуються розрахункові методи, які забезпечують перерахунок обсягів природного газу в метрах кубічних в енергетичні одиниці.

Ще одним аспектом складності переходу на енергетичний облік природного газу є матеріальна база. У побутовій сфері лише невелика частка лічильників газу має засоби для приведення виміряних в метрах кубічних об'ємів газу до стандартних умов з врахуванням його температури. Краща

Запропоноване посилання: Шульга, В. (2025). Модель лічильника об'єму та енергії газу. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 82-89. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-82-89

* Відповідальний автор



ситуація – в промисловому секторі, де повноцінно в парі з лічильниками застосовуються коректори та обчислювачі об'єму газу, які забезпечують приведення об'єму природного газу до стандартних умов за температурою, тиском та компонентним складом природного газу.

Для визначення енергії природного газу необхідним є вимірювання ще однієї фізичної величини: теплоти згоряння. Засоби вимірювання цієї величини є дорогартісними, тому їх встановлення в парі з лічильником є економічно невигідним не тільки в побуті, але і в промисловості.

Мета роботи – розробити удосконалений метод та модель лічильника для вимірювання об'єму та енергії природного газу з використанням інфокомунікаційних технологій.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Детальний аналіз нормативно-правових аспектів вимірювання енергії природного газу наведений в роботі [3]. Зокрема, проаналізовано вимоги українських та європейських правових та нормативних документів та проведено їх порівняльний аналіз. Ці документи встановлюють необхідність обліку природного газу в метрах кубічних з подальшим їх переведенням у енергетичні одиниці. Такий підхід до обліку природного газу суперечить вимогам іншого нормативно-правового документу [4], який стверджує, що «Зчитувані з показувального пристрою дані є результатом вимірювання, який служить основою для встановлення оплати».

Технічні аспекти реалізації приладового обліку енергії природного газу наведені в роботі [5], авторами якої запропоновано використовувати пристрої перетворення енергії газу. Фактично це непрямий метод вимірювання енергії природного газу на основі прямих вимірювань об'ємів газу, температури повітря навколо лічильника газу та теплоти згоряння газу.

$$E = \frac{VH_s T_b (1,0321 - 1,13812 \cdot 10^{-4} h)}{T_{nc}},$$

де E – енергія природного газу, V – вимірний лічильником об'єм природного газу, H_s – теплота згоряння природного газу, T_b – температура природного газу за стандартних умов, що дорівнює 273,15 К або 288,15 К (залежно від індивідуальних характеристик та місця встановлення лічильника газу надворі чи в приміщенні), h – географічна висота точки вимірювання (населеного пункту, де встановлений лічильник газу) над рівнем моря, T_{nc} – температура повітря навколо лічильника.

Методологія вимірювання об'єму природного газу з врахуванням температурних параметрів повітря в приміщенні біля газопроводу та лічильника газу і повітря навколишнього середовища наведена в роботі [6].

В роботі [5] розроблено методологію вимірювання енергії газу з врахуванням методології вимірювання об'єму газу [6], проведений метрологічний аналіз похибок, але не запропоноване технічне рішення для розроблення пристрою перетворення енергії природного газу. Відкритим залишається питання щодо вимірювання теплоти згоряння газу.

Автори роботи [7] запропонували лічильник об'єму газу відкалібрувати як лічильник енергії. Калібрування засновано на тому, що покази датчика, залежні від витрати градуовального газу або калібрувального газу, знімають і зберігають в газовому лічильнику у вигляді градуовальної або калібрувальної кривої датчика. Калібрувальну криву або значення сигналу датчика множать на коефіцієнт перетворення сигналу і коефіцієнт теплотворення для базової газової суміші так, щоб отриманий добуток виражав споживання газу у вихідних одиницях, а після інтеграції – в одиницях енергії. За допомогою додаткових поправочних коефіцієнтів можна врахувати фактичне теплотворення газової суміші, що подається, в одиницях енергії, щонайменше приблизно. Виміряне теплотворення, усереднене за певний тимчасомвий проміжок, можна використовувати як фактичне теплотворення.

Інший запропонований метод [8] полягає в тому, що у нерухомому газі вимірюють теплопровідність при постійному нагріванні і при імпульсному нагріванні, вимірюють теплоємність, ідентифікують газ і, на основі значення питомої теплоємності спільно з вимірюванням масової витрати, визначають повну теплотворну здатність газу. Відносно висока складність цього методу є недоліком при визначенні споживаної енергії на основі різних значень масової витрати і питомої теплоємності. Крім того, для достатньо точного визначення енергії, що подається, значення питомої теплоємності необхідно вимірювати безперервно і з великою точністю.

В роботі [9] розроблений побутовий лічильник об'єму та енергії газу. Вимірювання енергії газу цим лічильником відбувається наступним чином: природний газ із газопроводу поступає під корпус лічильника об'єму та енергії газу через вхідний отвір, здійснює обертання пристроїв вимірювального механізму, після чого через вихідний отвір поступає у газопровід. Інформація про кількість обертів роторів з датчика обертів надходить у пристрій перетворення, який перетворює кількість обертів вимірювального механізму у пропорційне значення об'єму газу, яке, в свою чергу, перетворюється пристроєм перетворення у значення об'єму газу за стандартних умов на основі інформації про температуру газу, отриманої з датчика температури. Інформація про виміряний об'єм газу та приведений цей об'єм до стандартних умов відображається на електронному відліковому пристрої. Електронний приймач отримує від зовнішніх передавачів газопостачальних організацій інформацію про теплотворність газу через телекомунікаційну мережу. Дані про теплотворність газу з високою точністю визначаються хроматографічним способом на газорозподільних станціях і передаються телекомунікаційним способом на електронний приймач лічильника об'єму та енергії газу, після чого ці дані з електронного приймача

надходять на електронний обчислювач енергії газу, в якому, за стандартизованою методикою, на основі значення об'єму газу, приведеного до стандартних умов, перетворюються у значення енергії газу, яке, в свою чергу, відображається на відліковому пристрої. Експлуатація цього лічильника вимагає періодичного зняття показів облікованих об'ємів та енергії газу інспекторами газових служб і надання їх газопостачальним організаціям.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

В результаті аналізу виявлено наступні недоліки:

- існуючі лічильники газу вимірюють об'єми газу в метрах кубічних, тож визначити обліковані енергії природного газу можна тільки розрахунковим методом, що, з метрологічної точки зору, не є вимірюванням енергії газу;

- однією із складових для визначення енергії природного газу є фізична величина: теплота згоряння газу, яку визначають потоковими хроматографами, але засоби передавання цієї вимірювальної інформації до лічильників газу відсутні;

- запропонований метод калібрування лічильника об'єму газу в одиницях енергії газу не є точним, оскільки використовуються усереднені за певний період часу значення, визначені за допомогою калібрувального газу, компонентний склад якого не відповідає складу реального газу;

- інший запропонований метод, що полягає у вимірюванні теплотворної здатності природного газу шляхом нагрівання газу, забезпечить достатню точність визначення цієї фізичної величини лише у випадку використання дорогих точних засобів вимірювань, що економічно неефективно;

- запропонована модель лічильника енергії природного газу є хорошим рішенням для приладового обліку енергії газу, але потребує додаткового зчитування показів про обліковані значення енергії та використання людського фактору для передачі і узагальнення цих даних.

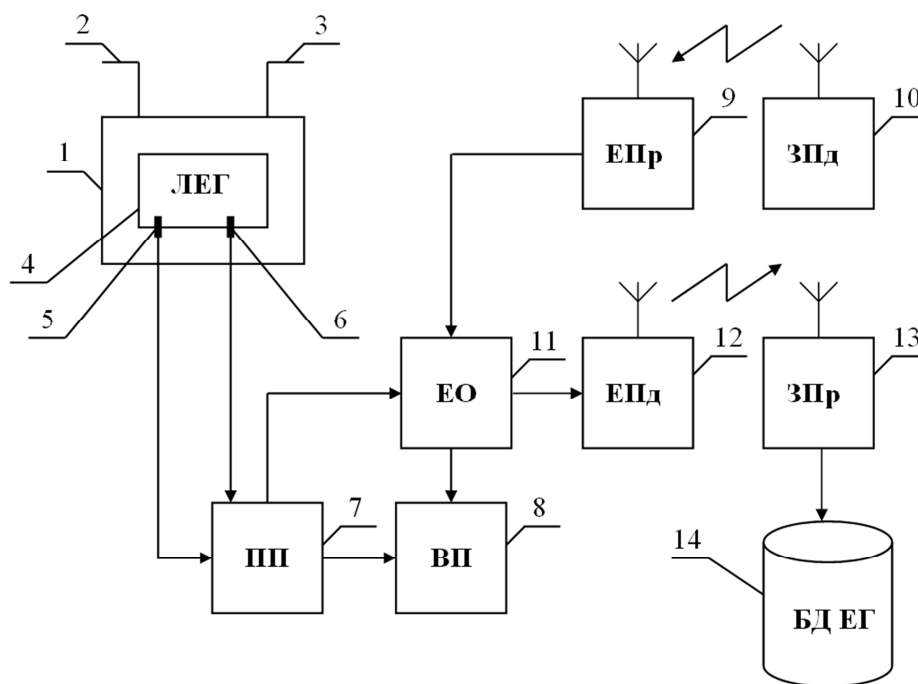


Рисунок 1 – Структурна модель лічильника об'єму та енергії газу

Формулювання цілей статті

Найоптимальнішим варіантом вирішення проблеми обліку газу є розроблення лічильника газу, який відображав би на своєму відліковому пристрої виміряні обсяги природного газу як в метрах кубічних, так і в одиницях енергії, а також автоматизованого передавання миттєвих значень виміряної енергії природного газу до газопостачальних організацій, що дозволить забезпечити ведення єдиної бази даних спожитої енергії газу.

Теоретична база роботи

У розробленому лічильнику об'єму та енергії газу [9], що містить корпус з входним та вихідним отворами, вимірювальний механізм, датчики обертів та температури, пристрій перетворення, електронний відліковий пристрій, електронний приймач. Вхідний контур приймача під'єднано через телекомунікаційну мережу до зовнішніх передавачів газопостачальних організацій, а вихід до входу електронного обчислювача енергії газу, вихід якого, в свою чергу, під'єднано до електронного відлікового пристрою, пропонується додатково встановлений електронний

передавач. Вхідний контур цього передавача під'єднано до виходу електронного обчислювача енергії газу, вихід якого, в свою чергу, під'єднано до зовнішніх приймачів газопостачальних організацій, а звітти – до єдиної бази даних спожитої енергії газу.

На рис. 1 зображена модель лічильника енергії газу, який містить: корпус 1; вхідний отвір 2; вихідний отвір 3; вимірювальний механізм 4; датчик температури 5; датчик обертів 6; пристрій перетворення 7; електронний відліковий пристрій 8; електронний приймач 9; зовнішні передавачі газопостачальних організацій 10; електронний обчислювач енергії газу 11; електронний передавач 12; зовнішні приймачі газопостачальних організацій 13; єдину базу даних спожитих об'ємів та енергії газу 14.

Лічильник енергії газу працює наступним чином.

Природний газ із газопроводу надходить під корпус 1 лічильника енергії газу через вхідний отвір 2, здійснює обертання пристроїв вимірювального механізму 4 і після цього через вихідний отвір 3 поступає у газопровід. Інформація про кількість обертів з датчика 6 надходить у

пристрій перетворення 7, який перетворює кількість обертів роторів у пропорційне значення об'єму газу, яке, в свою чергу, перетворюється пристроєм 7 у значення об'єму газу за стандартних умов на основі інформації про температуру газу, отриманої з датчика 5. Електронний приймач 9 отримує від зовнішніх передавачів газопостачальних організацій 10 інформацію про теплотворність газу через телекомунікаційну мережу. Дані про теплотворність газу з високою точністю визначаються хроматографічним способом на газорозподільних станціях і передаються телекомунікаційним способом на електронний приймач 9 лічильника газу, після чого ці дані з електронного приймача 9 надходять на електронний обчислювач енергії газу 11, в якому, за формулою (1), на основі значення об'єму газу, приведеного до стандартних умов, перетворюються у значення енергії газу, яке, в свою чергу, відображається на відліковому пристрої 8. Одночасно дані про значення об'єму та енергії природного газу з електронного обчислювача енергії газу 11 надходять на вхід електронного передавача 12 і передаються телекомунікаційним способом на зовнішні приймачі газопостачальних організацій 13, під'єднані до єдиної бази даних спожитих об'ємів та енергії газу 14.

Використання пропонованого лічильника енергії газу забезпечить здійснення комерційного обліку енергії газу з усіма необхідними атрибутами такого обліку: вимірювання енергії природного газу, відображення вимірних значень на відліковому пристрої лічильника та автоматичне передавання показів про спожиту енергію до газопостачальних організацій.

Переваги розробленого лічильника енергії газу над існуючими аналогами, розглянутими в даній статті, наведено в табл. 1.

Як видно із табл. 1 лічильники газу, які зараз застосовуються для комерційного обліку природного газу, забезпечують вимірювання об'єму природного газу, відображають значення облікованих

об'ємів на їх відлікових пристроях. Промислові лічильники газу здійснюють приведення облікованих об'ємів до стандартних умов за такими параметрами, як температура, тиск та компонентний склад газу, завдяки встановлених у парі з ними коректорів або обчислювачів. Невелика частка побутових лічильників газу здійснює приведення об'ємів газу лише за температурою завдяки наявності в їх складі механічних компенсаторів, або електронних пристроїв. Промислові лічильники газу мають пристрої для автоматичного передавання даних про обліковані об'єми газу до газопостачальних організацій.

Розроблені лічильники газу, описані в [7-9], мають можливість вимірювання тим чи іншим методом енергії природного газу та відображення значення вимірної енергії газу на їх відлікових пристроях. Але у цих засобах вимірювань відсутні пристрої для передавання даних про виміряні значення енергії газу до газопостачальних організацій.

Запропонований в цій статті лічильник об'єму та енергії газу має можливість облікувати об'єми та енергію природного газу, відображати значення облікованих об'ємів та енергії газу на його відліковому пристрої та передавати дані про виміряні значення об'ємів та енергії природного газу до газопостачальних організацій.

Висновки

1. Проаналізовано існуючі українські та зарубіжні дослідження щодо засобів та пристроїв вимірювання енергії природного газу. Виявлено, що існуючі засоби комерційного обліку газу не здійснюють вимірювання енергії газу, а лише об'єму газу з подальшим використанням розрахункового методу для обчислення енергії природного газу.

2. Створено модель лічильника об'єму та енергії природного газу, який зможе реалізувати облік природного газу в одиницях об'єму та одиницях енергії газу з подальшим передаванням даних про обліковані обсяги газу до газопостачальних організацій.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики лічильників об'єму та/або енергії газу

Наявна характеристика	Лічильник об'єму та/або енергії газу					
	Промисловий лічильник об'єму газу	Побутовий лічильник об'єму газу	Розроблений лічильник об'єму газу відкалібрований як лічильник енергії [7]	Розроблений лічильник масової витрати газу з вимірювачем теплопровідності [8]	Розроблений побутовий лічильник об'єму та енергії газу [9]	Рекомендований в даній статті лічильник об'єму та енергії газу
1. Вимірювання об'єму газу	+	+	+	-	+	+
2. Відображення виміряного об'єму газу на відліковому пристрої	+	+	-	-	+	+
3. Приведення виміряного об'єму газу до стандартних умов	+	+/-	-	-	+	+
4. Вимірювання масової витрати газу	-	-	-	+	-	-
5. Вимірювання енергії газу	-	-	+	+	+	+
6. Відображення виміряної енергії газу на відліковому пристрої	-	-	+	+	+	+
7. Автоматичне передавання даних про виміряні об'єми до газопостачальних організацій	+	-	-	-	-	+
8. Автоматичне передавання даних про виміряні енергії до газопостачальних організацій	-	-	-	-	-	+

3. Проведено порівняльний аналіз розробленого в даній статті лічильника об'єму та енергії газу з лічильниками, що зараз використовуються для комерційного обліку природного газу та з розробленими конструкціями лічильників газу, описаних в роботах [7-9]. Проведений аналіз засвідчив переваги розробленого лічильника порівняно з існуючими аналогами.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Про ринок природного газу : Закон України від 9.04.2015 р. № 329-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2015. № 27. Ст. 234.
2. Правила постачання природного газу : Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 р. № 2496. Офіційний вісник України. 2015. № 92. С. 3161.
3. Кузь М. В., Заміховський Л. М., Шульга В. А., Кузь Г. М. Якість природного газу: монографія. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г. М. 2023. Т. 1. 124 с. doi: [10.63048/978-617-7926-44-2](https://doi.org/10.63048/978-617-7926-44-2).
4. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 24.02.2016 р. № 163. Офіційний вісник України. 2016. № 21. С. 89.
5. M. Kuz, L. Zamikhovskiy, V. Shulha. Technical aspects of natural gas energy metering implementation. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. №1. P. 21-25. doi: [10.24027/2306-7039.1.2021.228205](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228205).
6. M. Kuz, L. Zamikhovskiy, V. Skliarov, H. Kuz. Methodology and software for measuring the specific differences of the calculated volumes of natural gas. *Ukrainian Metrological Journal*. 2020. №1. P. 62-67. doi: [10.24027/2306-7039.1.2020.204232](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204232).
7. Pat. WO 01/96819 A1 G01F 1/74, 25/00, 15/04. Gas meter / MATTER Daniel, PRETRE Philippe, KLEINER Thomas, WENK Alexander. priority 14.06.2000; Publ. 20.12.2001, Bull. № 20. – 23 p.
8. Pat. WO 01/18500 A1 G01F 1/684, G01N 27/18. Method and device for precision mass flow measurement / MAYER Felix, LECHNER Moritz. priority 09.09.1999; Publ. 15.03.2001, Bull. № 15. 17 p.
9. Пат. 142402 U, МПК (2020.01) G01N 33/22, G01F 1/00, G01F 5/00. Побутовий лічильник об'єму та енергії газу / Кузь М.В., Руденко А.М. заяв. 01.08.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11. 4 с.

References

1. Pro rynek przyrodnoho hazu : Zakon Ukrainy vid 9.04.2015 r. № 329-VIII. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. 2015. № 27. St. 234. [in Ukrainian]
2. Pravyla postachannia przyrodnoho hazu : Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh vid 30.09.2015 r. № 2496. Ofitsiyniy visnyk Ukrainy. 2015. № 92. P. 3161. [in Ukrainian]
3. Kuz M. V., Zamikhovskiy L. M., Shulha V. A., Kuz H. M. Yakist przyrodnoho hazu: monohrafiia. Akademiia tekhnichnykh nauk Ukrainy. Ivano-Frankivsk: Vydavets Kushnir H. M. 2023. T. 1. 124 p. doi: [10.63048/978-617-7926-44-2](https://doi.org/10.63048/978-617-7926-44-2). [in Ukrainian]
4. Tekhnichniy rehlement zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 24.02.2016 r. № 163. Ofitsiyniy visnyk Ukrainy. 2016. № 21. P. 89. [in Ukrainian]
5. M. Kuz, L. Zamikhovskiy, V. Shulha. Technical aspects of natural gas energy metering implementation. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. №1. P. 21-25. doi: [10.24027/2306-7039.1.2021.228205](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228205).
6. M. Kuz, L. Zamikhovskiy, V. Skliarov, H. Kuz. Methodology and software for measuring the specific differences of the calculated volumes of natural gas. *Ukrainian Metrological Journal*. 2020. №1. P. 62-67. doi: [10.24027/2306-7039.1.2020.204232](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204232).
7. Pat. WO 01/96819 A1 G01F 1/74, 25/00, 15/04. Gas meter / MATTER Daniel, PRETRE Philippe, KLEINER Thomas, WENK Alexander. priority 14.06.2000; Publ. 20.12.2001, Bull. № 20. – 23 p.
8. Pat. WO 01/18500 A1 G01F 1/684, G01N 27/18. Method and device for precision mass flow measurement / MAYER Felix, LECHNER Moritz. priority 09.09.1999; Publ. 15.03.2001, Bull. № 15. 17 p.
9. Pat. 142402 U, МПК (2020.01) G01N 33/22, G01F 1/00, G01F 5/00. Pobutovy lichylnyk obiemu ta enerhii hazu / Kuz M.V., Rudenko A.M. zaiav. 01.08.2019; opubl. 10.06.2020, Biul. № 11. 4 p. [in Ukrainian]

GAS VOLUME AND ENERGY METER MODEL

Shulha V. A.

Postgraduate Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0009-6420-4444>

e-mail: vitaliy.shulga@ifgas.com.ua

Abstract. The object of the study in the work is the methods of measuring the volume and energy of natural gas. The aim of the work is to develop an improved method and model of a meter for measuring the volume and energy of natural gas using infocommunication technologies. An overview of a number of existing means of measuring the volume of natural gas and developed means and devices for measuring gas energy is given. It was found that meters used for commercial metering of natural gas measure only the volume of gas, and the corresponding value of gas energy is determined by a calculation method, which from a metrological point of view is not an energy measurement. New models of natural gas energy meters developed and described in the scientific literature have the ability to measure natural gas energy by one method or another and display the value of the measured gas energy on their reading devices, but these measuring devices do not have devices for transmitting data on the measured values of gas energy to gas supplying organizations. A model of a natural gas volume and energy meter has been developed, which will be able to implement natural gas accounting in volume units and gas energy units with the subsequent transmission of data on the accounted gas volumes to gas supply organizations. The use of the proposed gas energy meter will ensure the implementation of commercial gas energy accounting with all the necessary attributes of such accounting: natural gas energy measurement, display of measured values on the meter reading device and automatic transmission of readings on the consumed energy to gas supply organizations. A comparative analysis of the gas volume and energy meter developed in this article with meters currently used for commercial natural gas accounting and with the developed gas meter designs has been carried out. The analysis has shown the advantages of the developed meter in comparison with existing analogues.

Keywords: energy, natural gas, energy meter, gas supply organization, commercial accounting.



Методи і прилади контролю технологічних параметрів

Прийнято 04.11.2025. Прорецензовано 21.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 681.518:004.42

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-90-100

РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ RTU SCADApack 474

Заміховський Л. М. *

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6374-8580>
e-mail: leozam@ukr.net

Николайчук М. Я.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6185-2272>
e-mail: mykola.nykolaichuk@nung.edu.ua

Стрілецький Ю. Й.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0105-8306>
e-mail: yurii.striletskyi@nung.edu.ua

Левицький І. Т.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6538-7734>
e-mail: ivan.levytskyi@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Заміховський, Л. М., Николайчук, М. Я., Стрілецький, Ю. Й. & Левицький, І. Т. (2025). Розроблення апаратно-програмного комплексу для тестування компонентів системи керування на базі RTU SCADApack 474. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 90-100. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-90-100

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Розроблення, тестування та експлуатація сучасних систем керування технологічними об'єктами передбачає комплексне вирішення окремих інженерно-технічних і наукових задач. Об'єктом досліджень є інформаційні процеси при забезпеченні режимів роботи технологічного обладнання. В роботі вирішується науково-технічна задача розроблення апаратно-програмних засобів для тестування компонентів систем керування на базі RTU SCADAPack 474 (Schneider Electric, Франція). RTU сімейства SCADAPack, крім іншого, забезпечують розширений робочий температурний діапазон та інтегрований протокол телекерування DNP3, що робить можливим та ефективним їх застосування для важких умов експлуатації. Розроблено апаратно-програмний комплекс для тестування компонентів систем керування на базі RTU SCADAPack 474, інструментального програмного забезпечення RemoteConnect, GEOScada Expert та промислової комунікації Modbus/TCP. Виконано конфігурування апаратних засобів, параметрування цифрових і аналогових входів-виходів, налагодження комунікаційного середовища. Розроблено прикладне програмне забезпечення на мові FBD (Function Block Diagram) стандарту IEC 61131-3. Виконано параметрування цифрових і аналогових тегів на рівні RTU SCADAPack та їх інтеграцію в GEOScada Expert. Розроблено проєкт в GEOScada Expert для задач тестування компонентів систем керування. Досліджено інформаційні процеси взаємодії між окремими компонентами апаратно-програмного комплексу, що дозволило вирішити задачу побудови цілісної, вертикально-інтегрованої системи керування. Особливість дослідження – апробація застосування RTU SCADAPack 474 в режимі симуляції, що дозволяє використовувати і масштабувати інструментальне програмне забезпечення RemoteConnect в межах навчальних програм і курсів без наявного фізичного обладнання.

Ключові слова: Система керування; PLC; RTU; SCADA; DNP3; Modbus/TCP; IEC 61131-3; Simulator PLC.

Вступ

Розроблення апаратно-програмних комплексів для тестування компонентів систем керування є актуальною науково-технічною задачею в напрямку створення інструментарію для дослідження режимів роботи технологічного обладнання об'єктів керування. Деякі технологічні об'єкти, зокрема нафтогазової промисловості, відносяться до територіально розподілених з важкими умовами експлуатації і вимагають особливих методів, підходів і апаратно-програмних засобів для керування ними. При побудові систем керування такими об'єктами, часто застосовують специфічні PLC (Programmable Logic Controller) з розширеною функціональністю телекерування RTU (Remote Terminal Unit). Однією з основних функцій RTU є підтримка протоколів телекерування DNP3 (Distributed Network Protocol) [1] і IEC 60870-5-104 [2] з можливістю локальної буферизації та відновлення втрачених на рівні комунікації даних з часовими маркерами.

Мета роботи – розроблення апаратно-програмного комплексу для тестування компонентів систем керування на базі RTU SCADAPack 474.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

В роботі [3] дослідження спрямоване на оцінку продуктивності протоколів Modbus і DNP3 при взаємодії RTU і SCADA. Робота стосується цифровізації енергетичних систем і переходу до Smart Grid-архітектур. Для вищевказаних протоколів оцінено показники затримки, пропускну здатності, втрат пакетів і надійності зв'язку. При цьому, DNP3 є більш стабільним навіть при збільшенні навантаження на комунікаційну мережу завдяки вбудованим механізмам підтвердження (acknowledgment) і тайм-аутів, а Modbus/TCP забезпечує кращі результати в умовах низького трафіку, що робить його ефективним для простих RTU-топологій. Обмеження роботи – недостатня деталізація специфікацій RTU і SCADA, що ускладнює реплікацію результатів у промислових умовах. В роботі [4] наведено результати інтеграції апаратного моделювання енергосистем у реальному часі зі SCADA через протокол DNP3. Такий підхід має критичне значення для тестування та валідації алгоритмів керування RTU у складних розподілених мережах. Новизна роботи полягає у створенні гібридного середовища Hardware-in-the-Loop (HIL), у

якому програмна модель енергосистеми взаємодіє з фізичними пристроями через DNP3-з'єднання. Такий підхід дозволяє досліджувати динаміку поведінки системи, перевіряти затримки в реальному часі та моделювати аварійні ситуації. До невирішених задач дослідження можна віднести прив'язку до реальних уніфікованих апаратно-програмних засобів, що обмежує практичне застосування отриманих результатів. В [5] виконано моделювання IEC 61850 і DNP3 у підстанційній мережі за допомогою OPNET Modeler – комерційного симулятора комп'ютерних мереж, порівнюючи їхню продуктивність у сценаріях обслуговування та відмови. Порівняння двох релевантних протоколів (DNP3 та IEC 61850) у контексті одного сценарію дає можливість побачити відмінності в поведінці трафіку. Результати роботи мають значення для інженерної практики, проте невирішеним аспектом є відтворюваність результатів дослідження. В роботі [6] досліджено взаємодію між IED (Intelligent Electronic Devices), RTU та SCADA. IEC 61850 забезпечує стандартизований обмін даними між RTU та IED. Виконано моделювання мережі: IEEE14-Bus та симуляцію передачі команд керування та зчитування статусу у реальному часі на прикладі електричної підстанції. Обмеження – не проведено перевірку сумісності комерційного обладнання у межах моделі, що ускладнює відтворюваність результатів для практичних цілей. В роботі [7] наведено результати розробки та впровадження IoT на основі SCADA, яка інтегрує сенсорні дані через PLC/RTU в cloud-середовище для забезпечення функцій моніторингу та керування. Робота включає топологію, блок-схеми та алгоритми передачі даних і виконана на реальних апаратно-програмних засобах. Проєкт реалізовано на конкретному обладнанні (Modicon M241 + ESP32), що обмежує масштабованість на інші RTU (наприклад, класичні RTU SCADAPack 47x/47xi).

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

За результатами проведеного аналізу проблематики можна зробити висновок,

що при створенні розподілених систем керування технологічними об'єктами з важкими умовами експлуатації, необхідно застосовувати PLC з розширеним температурним діапазоном, функціональністю RTU та підтримкою протоколів телекерування (DNP3 чи IEC 60870-5-104). Особлива увага повинна приділятися комплексному вирішенню задач взаємодії між компонентами таких систем. При цьому, вимагають подальших досліджень інформаційні процеси взаємодії при забезпеченні режимів роботи компонентів систем керування технологічними об'єктами.

Задачи дослідження

Для вирішення вищенаведеної проблематики сформульовано наступні задачи дослідження:

- створити проєкт в інструментальному пакеті Remote Connect і виконати конфігурування апаратних засобів на базі RTU SCADAPack 474;
- виконати параметрування сигнальних та комунікаційних каналів RTU SCADAPack 474;
- розробити тестову прикладну програму для RTU SCADAPack 474 на мові FBD;
- апробувати проєкт в режимі симуляції засобами PLC Simulator;
- інтегрувати сигнальні та комунікаційні канали RTU SCADAPack 474 в GeoScada Expert і виконати тестування розробленого апаратно-програмного комплексу.

Методи та засоби дослідження

Для вирішення сформульованих задач застосовано наступні апаратно-програмні засоби та технології:

- 1) RTU SCADAPack 474 [8];
- 2) SmartLine перетворювач температури Honeywell STT830-17H-00-WEE0-X06S-R3UD-A00TR050 3D00 [9];
- 3) нагрівний елемент (реостатний керамічний резистор CER 100R 25W);
- 4) індуктивний первинний перетворювач SIEMENS 3RG4024 3AG01 [10];
- 5) Power Supply SITOP 24 VDC/10 A;
- 6) зовнішні сигнальні індикатори дискретних виходів RTU SCADAPack 474;

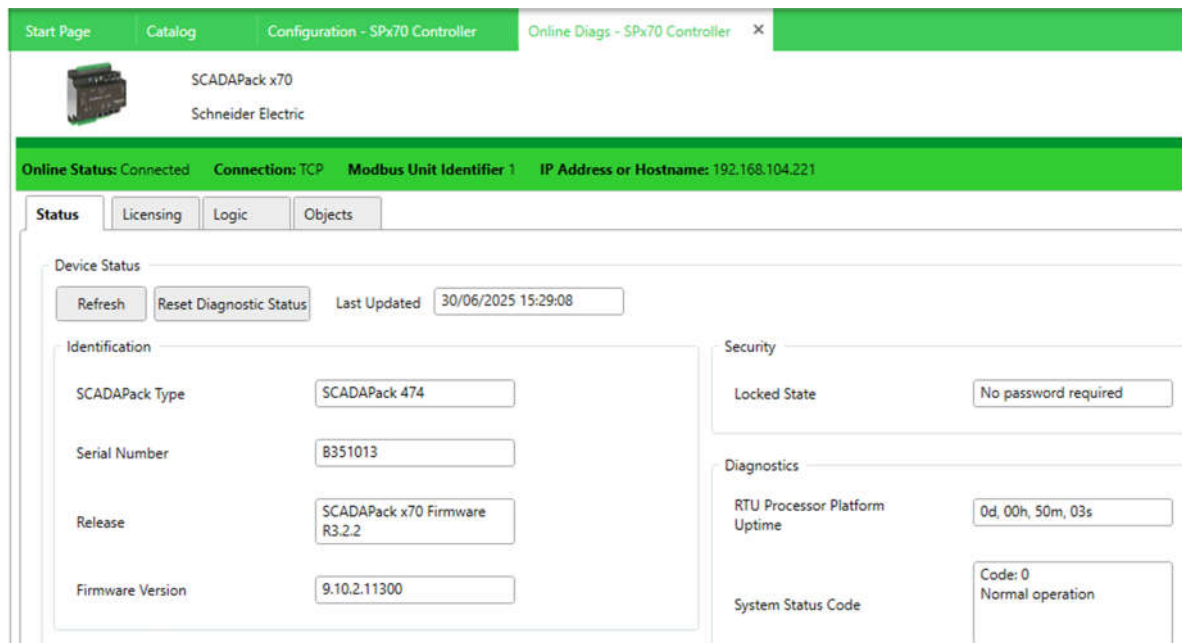


Рисунок 1 – RTU SCADAPack 474 в режимі «Online Diags → Status»

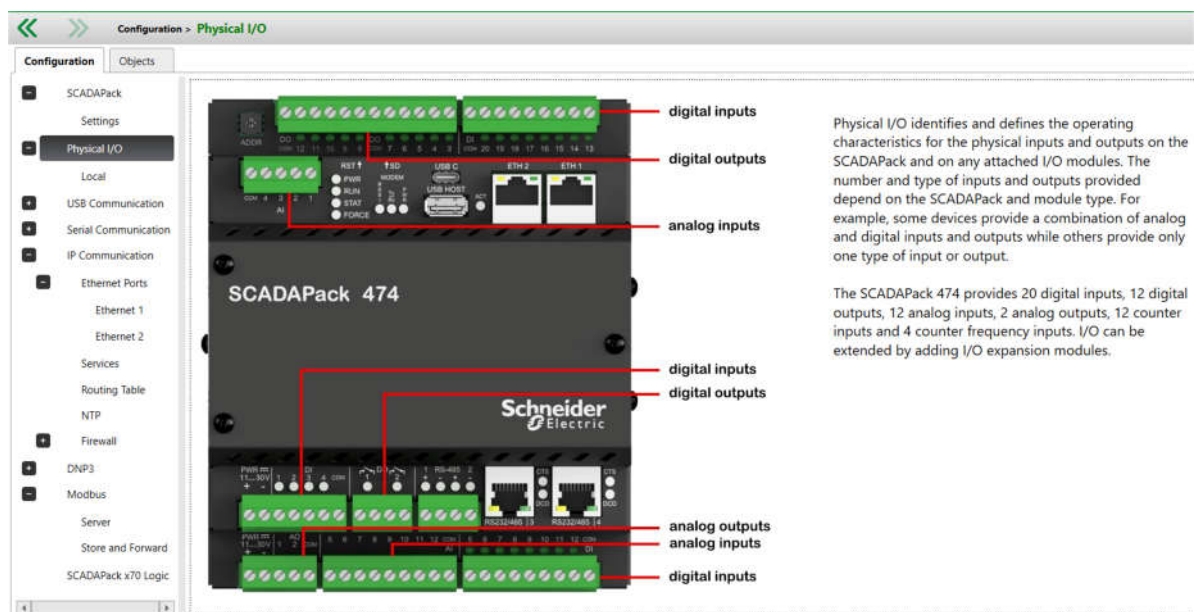


Рисунок 2 – RTU SCADAPack 474 в режимі «Configuration → Physical I/O»

7) промислова комунікаційна мережа ModBus/TCP [11];

8) інструментальне програмне забезпечення RemoteConnect V3.2.2 [12];

9) PLC-симулятор – Control Expert PLC Simulator V16.0.0.0 [13];

10) SCADA – Geo Scada Expert 2023 (update Nov.2024) [14].

Розробка апаратно-програмних засобів на базі RTU SCADAPack 474

Проект створений в інструментальному програмному забезпеченні Remote Connect

V3.2.2 на базі RTU SCADAPack 474 в режимі «Online Diags → Status» (рис. 1).

Розробка проекту на першому етапі передбачає конфігурування апаратних засобів RTU SCADAPack 474 в режимі «Configuration → Physical I/O» (рис. 2).

Інтерфейс Remote Connect V3.2.2 включає розділи: Device Status, Identification, Operation Status, Security, Diagnostics і Clock. Додатково індикуються Online Status → Connected, Connection → TCP, Modbus Unit Identifier → 1, IP Address or Hostname → 192.168.104.221.

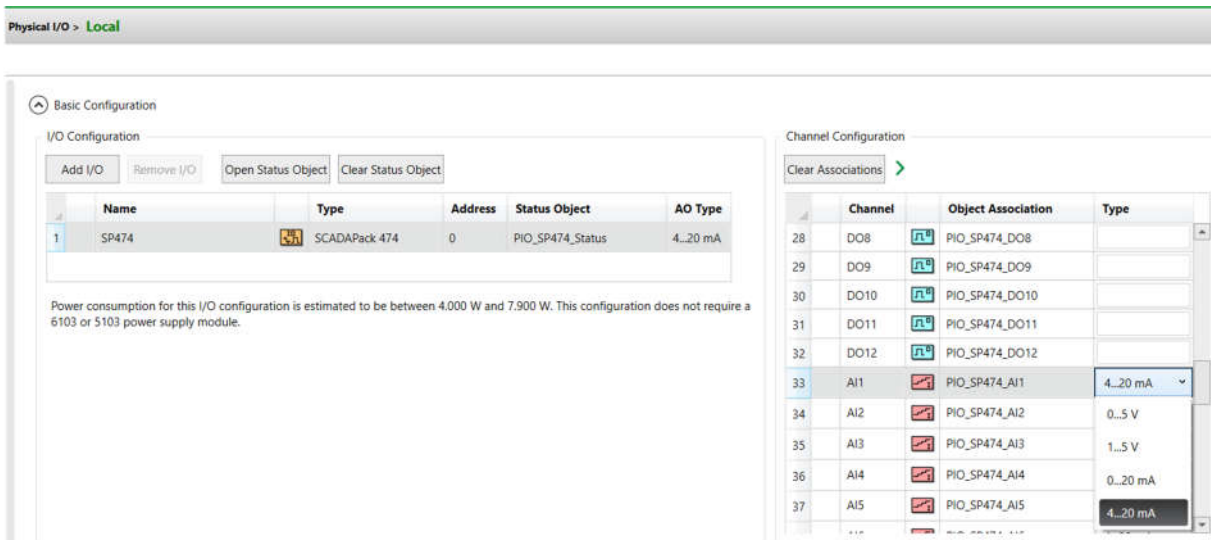


Рисунок 3 – Параметрування сигнальних каналів RTU SCADAPack 474 в режимі «Configuration → Physical I/O → Local»

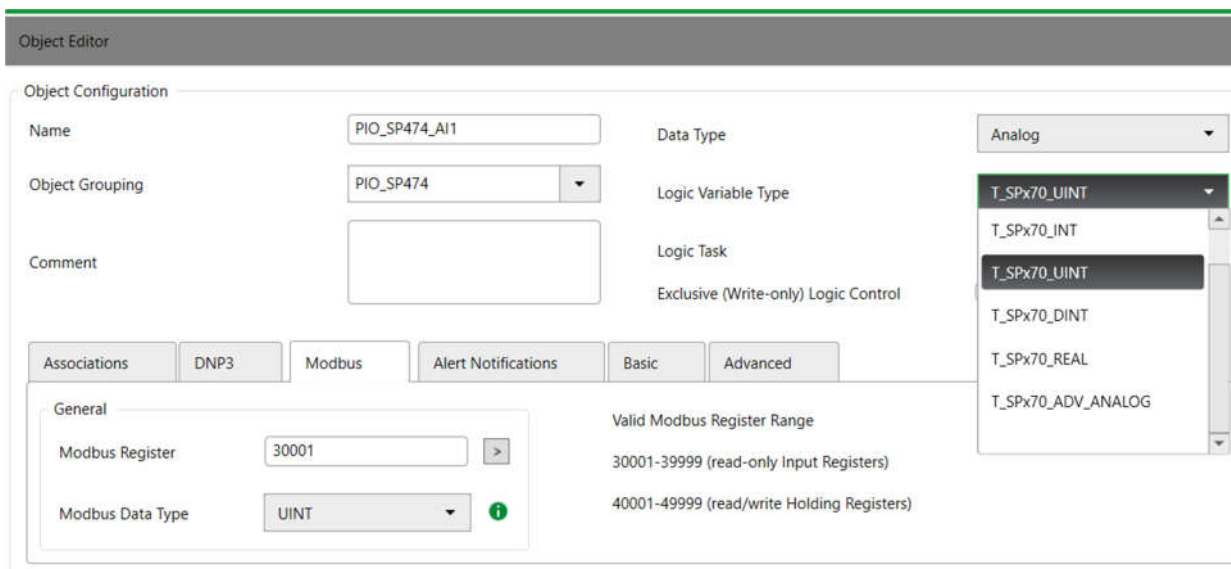


Рисунок 4 – Процес параметрування PIO_SP474_AI1 для Modbus/TCP

RTU SCADAPack 474 забезпечує 20 digital inputs, 12 digital outputs, 12 analog inputs, 2 analog outputs, 4 counter frequency input. I/O можуть бути додатково розширені [15].

Для параметрування аналогового входу AI1 з термоперетворювача, застосовується уніфікований вимірювальний діапазон 4-20 мА (рис. 3).

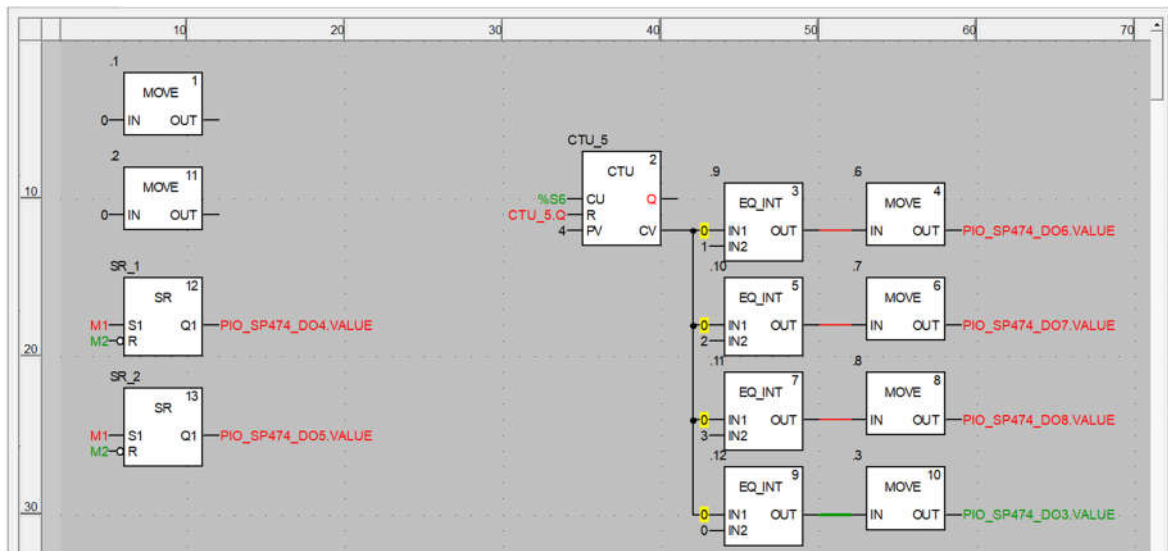
Data Type = Analog. Modbus Register = 30001 (read-only Input Register). Modbus Data Type = UINT.

Параметрування сигнальних каналів RTU SCADAPack 474 полягає у визначенні типу і діапазону вимірювання в розділі Channel Configuration → PIO_SP474_AI1.

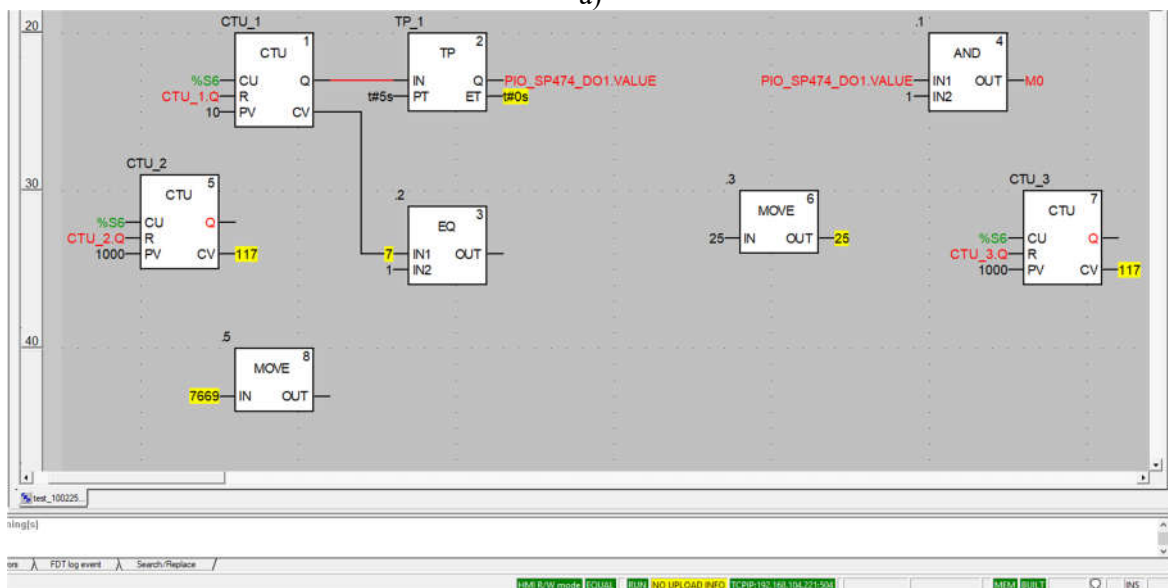
На рис. 4 наведено процес параметрування PIO_SP474_AI1 для комунікаційного з'єднання Modbus/TCP.

Далі необхідно було розробити тестову прикладну програму RTU SCADAPack 474 на мові FBD. Вона включає регістр зсуву для керування дискретними виходами (тактовий сигнал %S6 – 1 Hz; лічильник STU_5; оператори порівняння EQ_INT9, 10, 11, 12; оператори пересилки MOVE6, 7, 8, 3) (рис. 5, а).

На рис. 5.б, крім іншого, наведено індикацію вхідного аналогового сигналу PIO_SP474_AI1.VALUE (оператор MOVE5) у відносних одиницях (7669 у форматі UINT). Таким чином, прикладна програма



а)



б)

а) реєстр зсуву для керування дискретними виходами; б) блок тактування, таймер, лічильники та індикація вхідного аналогового сигналу у відносних одиницях (7669 у форматі UINT)

Рисунок 5 – Прикладна програма тестового проєкту в режимі «RUN»

реалізує обробку дискретного і аналогового сигналів з індуктивного і термоперетворювача відповідно, а також керує дискретними виходами RTU.

Для апробації проєкту в режимі симуляції застосовано Control Expert PLC Simulator V16.0.0.0 [13]. При дослідженні інформаційних процесів в системах керування в режимі симуляції, важливо правильно налаштувати часові параметри (Timing) PLC Simulator. Діалогове вікно часових параметрів надає статистику симулятора щодо використання ресурсів CPU робочої станції, пріоритету процесу та часу виконання

основного циклу PLC. Крім того, можна змінювати пріоритет та час очікування (Sleep Time) для оптимізації роботи симулятора та навантаження на робочу станцію. Використовуються наступні параметри:

- CPU Usage – відсоток завантаження CPU робочої станції симулятором;
- Process Priority – пріоритет процесу симулятора (можна змінювати для оптимізації);
- User Scan Time – час виконання основного циклу PLC;
- Sleep Time – пауза між основними циклами PLC.

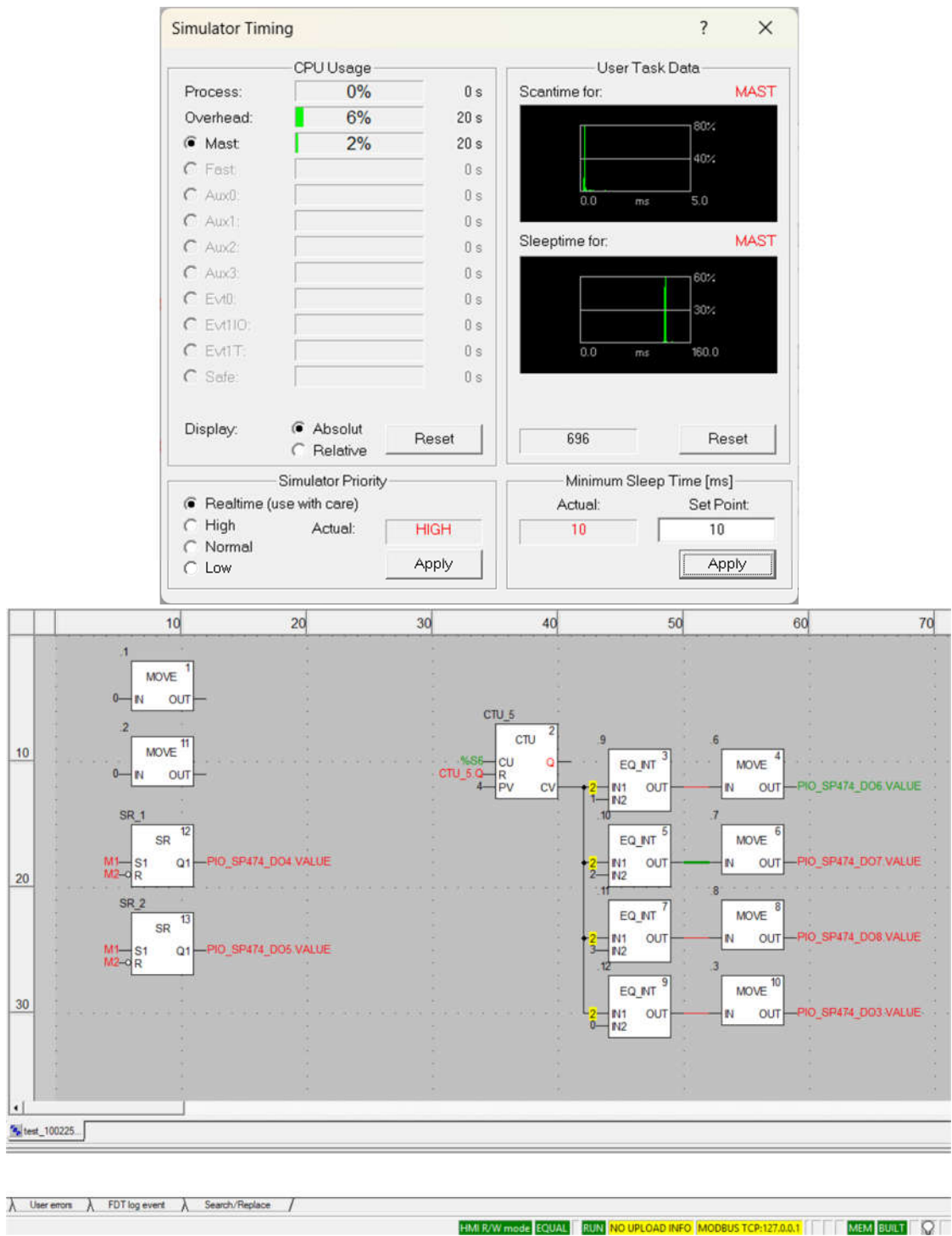


Рисунок 6 – Діалоговий інтерфейс PLC Simulator (Timing) та режим імітації RTU SCADAPack 474 (MODBUS TCP:127.0.0.1)

На рис. 6 наведено панель управління та діалоговий інтерфейс PLC Simulator в режимі імітації RTU SCADAPack 474.

Наступним етапом проектування є інтеграція сигнальних та комунікаційних каналів RTU SCADAPack 474 в SCADA – GeoScada Expert 2023 і тестування взаємодії між компонентами розробленого апаратно-програмного комплексу (рис. 7). При

цьому необхідно виконати наступні основні процедури:

- створити проект в GeoScada Expert 2023;
- виконати параметрування Modbus/TCP комунікаційного з'єднання з RTU SCADAPack 474;
- виконати параметрування дискретних і аналогових тегів RTU;

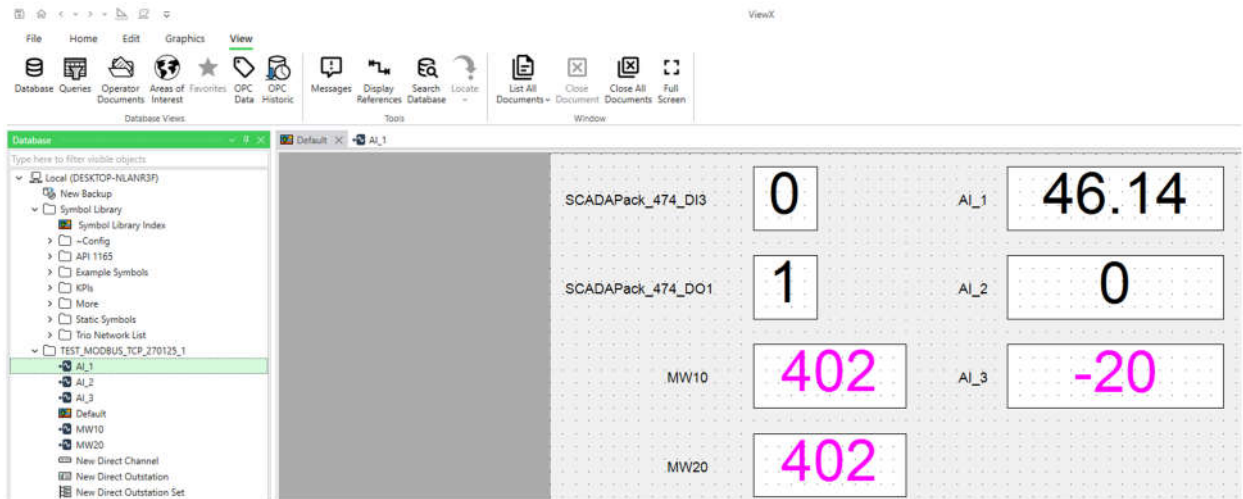


Рисунок 7 – GeoScada Expert 2023 тестового проєкту з мнемонікою для виводу дискретних та аналогових сигналів

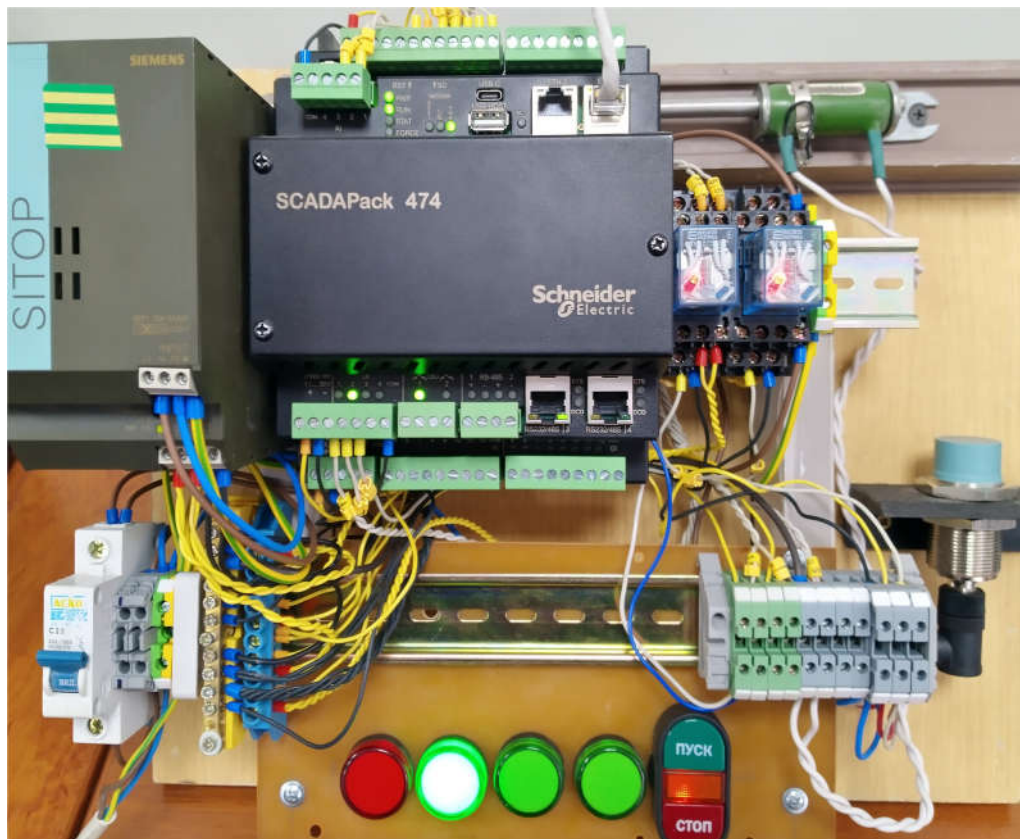


Рисунок 8 – Апаратно-програмний комплекс на базі RTU SCADAPack 474

- розробити структуру взаємопов'язаних технологічних мнемосхем проєкту;
- реалізувати функції збереження даних в архіві.

На рис. 7 наведено також HMI (Human Machine Interface) GeoScada Expert 2023 тестового проєкту з мнемонікою для виводу дискретних та аналогових сигналів, а також станів внутрішніх лічильників RTU SCADAPack 474. Інтерфейс включає: меню

команд, піктограми основних інструментів, дерево проєкту, робочу область, панель виводу сигналізацій.

Загальний вигляд розробленого апаратно-програмного комплексу на базі RTU SCADAPack 474 показано на рис. 8.

Таким чином, розроблено і апробовано апаратно-програмний комплекс для тестування компонентів систем керування на базі RTU SCADAPack 474. Результати тес-

тування підтвердили працездатність і сумісність при взаємодії окремих компонентів розробленого апаратно-програмного комплексу. Результати роботи можуть бути використані при розробленні систем керування розподіленими технологічними об'єктами з важкими умовами експлуатації [16–17].

Висновки

1. Розроблено проект в інструментальному пакеті Remote Connect і виконано конфігурування апаратних засобів на базі RTU SCADApack 47, що є основою для подальшої розробки;

2. Виконано параметрування сигнальних та комунікаційних каналів RTU SCADApack 474 на основі протоколу Modbus/TCP, що дозволило інтегрувати в проект сенсори і виконавчі пристрої;

3. Розроблено тестову прикладну програму для RTU SCADApack 474 на мові FBD, що дозволило перевірити коректність алгоритмів і режимів функціонування RTU;

4. Апробовано тестовий проект RTU в режимі симуляції засобами PLC Simulator, що надає широкі можливості для масштабування в процесі підготовки інженерно-технічного персоналу і операторів;

5. Інтегровано сигнальні та комунікаційні канали RTU SCADApack 474 в GeoScada Expert, що дозволило дослідити інформаційні процеси взаємодії між окремими компонентами систем керування технологічними об'єктами на базі RTU.

Подяки

Автори публікації вдячні «Schneider Electric Ukraine LLC» за надані технічну підтримку та апаратно-програмні засоби для реалізації і тестування проекту.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE Std 1815.1-2015: IEEE Standard for Exchanging Information Between Networks Implementing IEC 61850 and IEEE Std 1815 [Distributed Network Protocol (DNP3)]*. 2015. New York, NY: IEEE. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1815.1/5699/>

2. International Electrotechnical Commission. *IEC 60870-5-104:2006/AMD1:2016 – Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols – Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles* (Ed. 2.1). 2016. Geneva, Switzerland: IEC. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/13185/0954c8823c20441b97ee1cec747c9b15/IEC-60870-5-104-2006.pdf>

3. Bastidas A. C., Agredo G. L., Revelo-Fuelagán J., Candelo-Becerra J. E. (2024). Performance evaluation of Modbus and DNP3 in the communication network of a university campus microgrid. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. 103656. doi: [10.1016/j.rineng.2024.103656](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103656)

4. Huang H., Davis C. M., Davis K. R. Real-time power system simulation with hardware devices through DNP3 (arXiv:2101.05965). 2021. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.05965>

5. Njova D., Ogudo K. A., Umenne P. Modelling the IEC 61850 and DNP3 protocol using OPNET in an electrical substation communication network (Paper presented at the 5th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems, Durban, South Africa). *IEEE*. 2022. doi: [10.1109/icABCD54961.2022.9856151](https://doi.org/10.1109/icABCD54961.2022.9856151)

6. Jácome-Barrionuevo A., Quizhpi-Cuesta M., Quizhpi-Palomeque F. Implementation of SCADA for IEC 61850 communication in the IEEE 14-Bus System. In *2024 IEEE 6th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM) IEEE*. 2024. pp. 577–583. doi: [10.1109/GPECOM61896.2024.10582675](https://doi.org/10.1109/GPECOM61896.2024.10582675)

7. Idris H. S., Saputra A., Mulyadi I. H. Internet of Things Based SCADA System. *Journal of Applied Electrical Engineering*. 2023. Vol. 7(2). doi: [10.30871/jaee.v7i2.6415](https://doi.org/10.30871/jaee.v7i2.6415)

8. Schneider Electric. SCADAPack 470 / 474 RTUs Datasheet A4 (Version 37). Schneider Electric. 2023. URL: https://www.se.com/us/en/download/document/SCADAPack_470_474_RTUs_DS_A4/
9. Honeywell International Inc. STT 3000 Series STT800 – Temperature probe assemblies (Models STT820; STT830; STT840) (34-TT-03-08). *Honeywell Process Solutions*. 2022. URL: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/pmt/hps/products/pmc/field-instruments/temperature-transmitters/temperature-transmitter-accessories/temperature-probe-assemblies/pmt-hps-34-tt-03-08-stt800.pdf>
10. Pepperl + Fuchs Group. *3RG4024-3AG01-5AA2-PF inductive proximity switch (Release 09.09.2010)* [Data sheet]. 2010. URL: <https://www.nexinstrument.com/assets/images/pdf/3RG4024-3AG01-5AA2-PF.pdf>
11. Modbus Organization, Inc. (n.d.). Specifications and implementation guides. Retrieved November 3, 2025. URL: <https://www.modbus.org/modbus-specifications>
12. Schneider Electric. RemoteConnect for SCADAPack x70 RTUs Datasheet A4 (Version 10) [Brochure]. 2024. URL: https://www.se.com/us/en/download/document/RemoteConnect_SCADAPack_x7_A4/
13. Schneider Electric. EcoStruxure Control Expert – PLC Simulator: Original instructions (EIO0000001714.09). 2023. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000001714&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000001714.09.pdf
14. Schneider Electric. *Geo SCADA 2023 Update Nov 2024 (86.9098.1): Release Notes* [Technical guide]. 2025. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=Geo_SCADA_2023_RelNotes_202411&p_enDocType=Other+technical+guide&p_File_Name=Geo+SCADA+2023+Update+Nov+2024+%2886.9098.1%29+Release+Notes.pdf
15. Schneider Electric. *SCADAPack 470 | 474 Smart RTUs: Remote Programmable Smart RTUs – Product at a glance* (Part No. TKULM08030-06-v37-A4). Schneider Electric. 2023. URL: https://media.distributordatasolutions.com/schneider_synd_rework/2023q3/documents/58d8a506d59735e5571c3818762240e10ecd900a.pdf
16. Zamikhovskiy L., Nykolaychuk M., Levytskyi I. Organizing the automated system of dispatch control over pump units at water pumping stations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5(2(131)), 61–75. doi: [10.15587/1729-4061.2024.313531](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313531)
17. Zamikhovskiy L., Zamikhovska O., Ivanyuk N., Mirzoieva O., Nykolaychuk M. Development of an anti-surge protection system for gas pumping units based on hardware and software vibration monitoring tools. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4(2(136)), 117–132. doi: [10.15587/1729-4061.2025.337736](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337736)

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE TOOL FOR TESTING CONTROL SYSTEM COMPONENTS BASED ON RTU SCADAPack 474

Zamikhovskiy L. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6374-8580>
e-mail: leozam@ukr.net

Nykolaychuk M. Ja.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6185-2272>
e-mail: mykola.nykolaichuk@nung.edu.ua

Striletskyi Yu. Y.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0105-8306>
e-mail: yurii.striletskyi@nung.edu.ua

Levytskyi I. T.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6538-7734>
e-mail: ivan.levytskyi@nung.edu.ua

Abstract. The development, testing, and operation of modern control systems for technological facilities require a comprehensive solution of specific engineering, technical, and scientific problems. The object of research is the information processes involved in ensuring the operational modes of technological equipment. This work addresses the scientific and technical problem of developing hardware and software tools for testing control system components based on the SCADAPack 474 RTU (Schneider Electric, France). The SCADAPack RTU family, among other features, provides an extended operating temperature range and an integrated DNP3 telecontrol protocol, making their use in harsh operating conditions both feasible and efficient. A hardware-software complex has been developed for testing control system components based on the SCADAPack 474 RTU, utilizing the RemoteConnect and GEOScada Expert software tools, as well as industrial Modbus/TCP communication. Hardware configuration, parameterization of digital and analog input/output channels, and communication environment setup were performed. Application software was developed using the FBD (Function Block Diagram) language according to the IEC 61131-3 standard. Digital and analog tags were parameterized at the SCADAPack RTU level and integrated into GEOScada Expert. A project for testing control system components was developed in GEOScada Expert. The information processes involved in the interaction between individual components of the hardware-software complex were investigated, which enabled the implementation of a complete, vertically integrated control system. A distinctive feature of this research is the testing of the SCADAPack 474 RTU in simulation mode, which allows the use and scaling of the RemoteConnect software tools within educational programs and courses without requiring physical hardware.

Keywords: System of Control; PLC; RTU; SCADA; DNP3; Modbus/TCP; IEC 61131-3; Simulator PLC.



Прийнято 28.10.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 658.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-101-107

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНАЧЕНЬ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА

Гарасимів Т. Г.

Асистент кафедри комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1731-0286>
e-mail: taras.harasymiv@nung.edu.ua

Анотація. Проаналізовано підходи до прогнозування значень об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача, що базуються на методах кластеризації. Основною перевагою запропонованих підходів над традиційними моделями прогнозування є їхня здатність враховувати стохастичний характер експериментальних даних та використовувати сучасні інформаційні технології, зокрема елементи нечіткої логіки, штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми. Завдяки використанню багаторазових ітеративних процедур забезпечується поступове зниження похибки цільової функції до необхідного рівня, що сприяє підвищенню точності прогнозних результатів. Зокрема, розроблено метод прогнозування на основі алгоритму Fuzzy C-Means, який ґрунтується на концепції нечітких с-середніх. Його реалізацію здійснено в програмному середовищі Matlab. У межах цього підходу було встановлено 20 кластерів, а кількість ітераційних кроків складала до 100. Отримане середньоквадратичне відхилення становить 0.04, що свідчить про прийнятну точність моделі. Окрім цього, у роботі розглянуто альтернативний метод прогнозування на основі алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації. Побудова системи нечітких правил відбувалася автономно на основі експериментальних вимірювань із застосуванням моделі типу Сугено. Для кожного з досліджуваних об'єктів обчислювалося значення потенціалу, що характеризує ймовірність утворення кластера у його околі. Центри кластерів визначались ітераційно на основі точок із найбільшим потенціалом. У результаті середньоквадратичне відхилення, що було отримано для цього підходу, дорівнює 0.019, що підтверджує вищу точність прогнозування порівняно з методом Fuzzy C-Means. Апробація розглянутих методів здійснювалась на основі реальних експериментальних даних, що були зібрані під час експлуатації відцентрового нагнітача моделі 16 ГЦ2-396/53-78С у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральних газопроводів у листопаді 2015 року.

Ключові слова: відцентровий нагнітач, об'ємна продуктивність, кластеризація, прогнозування, Fuzzy C-Means, субтрактивна нечітка кластеризація.

Запропоноване посилання: Гарасимів, Т. Г. (2025). Застосування методу кластеризації для прогнозування значень продуктивності відцентрового нагнітача. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 101-107. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-101-107

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Сучасні підприємства та організації демонструють зростаючу потребу у впровадженні інформаційних систем, здатних не лише акумулювати та зберігати дані, а й забезпечувати ефективне управління, аналітичну обробку та прогнозування відповідно до концепцій і стандартів інтелектуального аналізу даних (Data Mining).

Традиційні методи прогнозування зазвичай ґрунтуються на побудові єдиної математичної моделі з обмеженим числом параметрів, яке визначається кількістю доступних експериментальних спостережень. Однак, на практиці формування такої узагальненої моделі є доволі складним завданням, а в окремих випадках – і зовсім недосяжним.

У зв'язку з цим актуальності набувають підходи до прогнозування, що враховують стохастичну природу даних та використовують сучасні методи кластеризації. Відомі нині підходи можна умовно класифікувати на три ключові групи згідно з теоретичними основами штучного інтелекту, які покладено в їх основу [1].

До першої групи належать нейронні мережі, що функціонують як універсальні адаптивні апроксиматори та здатні виявляти локальні закономірності у поведінці даних і точно їх моделювати. Друга група охоплює нечіткі логічні системи та гібридні нейронно-нечіткі моделі, які дозволяють формувати прогностичні структури з високою надійністю та інтерпретованістю логічних зв'язків.

Третя група представлена методами розподіленого інтелекту, до яких належать генетичні алгоритми, метод мурашиних колоній, а також підхід ройового інтелекту. Ці алгоритми, крім прогнозування, ефективно застосовуються для оптимізації параметрів, зокрема у завданнях визначення вагових коефіцієнтів у нейронних мережах.

Мета роботи – підвищення точності прогнозування значень об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача шляхом розробки та дослідження методів кластеризації, зокрема алгоритмів нечітких с-середніх

(Fuzzy C-Means) та субтрактивної нечіткої кластеризації, із використанням сучасних інформаційних технологій (нечітка логіка, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми). Реалізація таких підходів дозволяє враховувати стохастичний характер експериментальних даних, забезпечувати зниження похибки цільової функції та досягати прийнятної точності прогнозних моделей.

Теоретичне обґрунтування

Станом на сьогодні методи кластеризації активно використовують для вирішення широкого кола задач, пов'язаних із моделюванням та прогнозуванням у різних галузях наукових досліджень. Застосування підходів, що базуються на часових рядах, є особливо актуальним у таких сферах, як економічне планування, торгівля, управлінські процеси, а також у проектуванні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень [2–4].

Основи теорії прогнозування з використанням інтелектуальних методів були закладені такими вченими, як Н. Вінер, Н. А. Колмогоров та Р. Калман [5]. У класичному підході до прогнозування для опису невизначеностей застосовуються засоби математичної статистики та теорії випадкових процесів.

Однак, з огляду на наявність хаотичної складової в більшості реальних процесів, виникає потреба у створенні таких методів прогнозування, які здатні об'єднувати набір моделей, адаптованих до різних закономірностей, що спостерігаються у експериментальних даних [6]. Саме тому значного поширення набули підходи, побудовані на основі кластеризаційних технологій, у яких формування моделей здійснюється відповідно до кластерів, утворених послідовностями експериментальних значень.

Для забезпечення стабільного та ефективного функціонування газоперекачувального агрегату (ГПА) в умовах реальної експлуатації, диспетчерський персонал компресорної станції (КС) здійснює моніторинг ряду теплотехнічних показників, зокрема: потужності та коефіцієнта корис-

ної дії (ККД) газотурбінного двигуна (ГТД), продуктивності агрегату, політропного ККД, вихідної потужності відцентрового нагнітача (ВЦН), приведеної потужності ГТД, коефіцієнтів технічного стану ГТД (за потужністю) та ВЦН (за політропним ККД), а також коефіцієнта режиму роботи ВЦН [7].

Для зниження ймовірності помилкових рішень у процесі керування технічними об'єктами застосовується прогнозування теплотехнічних параметрів ГПА, точність якого значною мірою залежить від обраних методів і доступних ресурсів. У випадках, коли досліджувані об'єкти функціонують за умов стохастичної невизначеності, класичні підходи до прогнозування ґрунтуються на використанні інструментарію математичної статистики та теорії випадкових процесів.

Для моделювання нелінійних залежностей у цій роботі застосовано методи нечіткої логіки, що базуються на формальних правилах, таких як «ЯКЩО – ТО». Якість побудованої нечіткої моделі визначається формою функцій належності та їх просторовим розташуванням. У разі використання нейро-нечітких систем процес налаштування параметрів моделі піддається автоматизації, при цьому адаптивна нейронна мережа виконує функцію оптимізації параметрів нечітких множин. У структурі моделі нечіткі множини слугують параметрами, а набір логічних правил і їх кількість визначають топологію самої моделі.

Для реалізації дослідження було використано експериментальні вимірювання, зафіксовані на компресорній станції «Долина» під час роботи відцентрового нагнітача природного газу марки 16 ГЦ2-396/53-78С у листопаді 2015 року.

Об'ємна продуктивність компресора, приведена до умов всмоктування, у одиницях м³/хв, розраховувалася згідно з такою формулою:

$$Q_{ec} = A_k \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot Z_1 \cdot R \cdot T_1}{P_1}}, \quad (1)$$

де ΔP – перепад тиску на конфузори, МПа; A_k – коефіцієнт конфузора, м²; R – газова стала газу, кДж/(кг·К); T_1 – температура на

вході нагнітача, К; Z_1 – коефіцієнт стисливості газу на вході нагнітача; P_1 – тиск газу на вході нагнітача, МПа.

На початковому етапі з експериментальних даних здійснюється формування нечітких правил шляхом застосування методу субтрактивної кластеризації. Далі, на другому етапі, здійснюється оптимізація параметрів нечіткої моделі за допомогою алгоритму ANFIS. Субтрактивна кластеризація виступає як швидкий і незалежний метод автоматичного генерування нечітких правил на основі наявних даних. Результати цього процесу можуть бути використані для побудови різних типів баз знань, зокрема сингтонних, Мамдані та Сугено моделей.

Основна ідея цього підходу полягає у попередньому визначенні точок у вхідному просторі, які можуть бути потенційними центрами кластерів. Для кожної такої точки обчислюється значення потенціалу, що відображає ймовірність утворення кластера в її околі. На наступному етапі ці точки аналізуються ітераційно, і серед них обираються ті, які мають максимальні значення потенціалу, формуючи центри кластерів.

Суттєвою перевагою використання кластеризаційних методів для синтезу нечітких моделей є їх здатність генерувати об'єктно-орієнтовані правила баз знань, які легко адаптуються до структури вихідних даних.

У програмному середовищі Matlab реалізовано два основних підходи до задачі нечіткої кластеризації:

- алгоритм FCM (Fuzzy C-Means) – вбудована функція, що реалізує метод кластеризації на основі нечітких с-середніх;
- субтрактивна нечітка кластеризація – метод, що дозволяє синтезувати нечіткі моделі на базі попереднього оцінювання щільності даних.

Алгоритм Fuzzy C-Means призначений для автоматизованого групування вхідних об'єктів у відповідні кластери, які трактуються як нечіткі множини. Межі між такими кластерами не є чітко визначеними, а ступінь належності кожного об'єкта визначається відстанню до центрів кластерів. Процес кластеризації відбувається ітера-

ційно: на кожному кроці уточнюється положення центрів кластерів та значення функцій належності відповідних елементів.

Припустимо, що маємо $K = 336$ експериментальних вхідних векторів x_k і N виявлених кластерів. Нехай ступінь належності будь-якого вектору x_k до відповідного кластеру c_j рівна $\mu_{jk} \in [0,1]$, де j – номер кластера, а k – номер вхідного вектора.

Запишемо умови нормування для μ_{jk} :

$$\sum_{j=1}^N \mu_{jk} = 1, \forall k = 1, \dots, K; \quad (2)$$

$$0 < \sum_{k=1}^N \mu_{jk} \leq K, \forall j = 1, \dots, N.$$

Метою роботи алгоритму є зведення до мінімуму суми всіх зважених відстаней між об'єктами та центрами кластерів.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де q – зафіксований параметр, який відомий перед ітераціями.

Надалі, враховуючи умову (3), розв'яжемо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mu_{jk}} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial c_j} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Тоді розв'язання даної системи можна записати у наступному вигляді:

$$c_j = \frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \cdot x_k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q}, \quad (5)$$

$$c_j = \frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \cdot x_k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q}. \quad (6)$$

До застосування алгоритму FCM входить реалізація перелічених кроків:

Крок А. Ініціалізування. Необхідно вибрати наперед зазначену кількість кластерів N , визначити кількість ітерацій та зафіксований параметр q . Оскільки $2 < N < K$, то виходить, що $N=20$. Звідси бачимо, що шукана кількість ітерацій дорівнює 100, а фіксований параметр

дорівнює 1.5. Звідси бачимо, що початкова матриця належності дорівнює $U^{(0)} = (\mu_{jk})^{(0)}$.

Крок Б. Розрахунок величин центрів кластерів $c_j^{(t)}$. Да даному кроці здійснюємо розрахунок $c_j^{(t)}$, використовуючи формулу (5).

Крок В. Визначаємо значення функції належності μ_{jk} . Знаходимо $\mu_{jk}^{(t)}$, якщо $x_k \neq c_j$ та беремо до уваги вже відомі величини $c_j^{(t)}$. В іншому разі:

$$\mu_{jk}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, l = j, \\ 0. \end{cases}$$

Крок Г. Завершення алгоритму або його заупинка. Зупинити даний алгоритм нечіткої кластеризації можна у разі виконання даної умови:

$$|U^{(t+1)} - U^t| \leq \varepsilon,$$

де $\varepsilon = 10^{-5}$ - точність обчислення алгоритму.

Результат застосування описаного алгоритму зображено на рисунку 1.

Для оцінки точності прогнозу значень об'ємної продуктивності нагнітача знайдено величину середньоквадратичного відхилення прогнозованих значень від знайдених значень об'ємної продуктивності за наведеною формулою [4]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1, n} (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (7)$$

де $n=336$ – кількість експериментів; y_i – знайдені значення об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача, m^3/c ; \hat{y}_i – прогнозовані величини продуктивності із використанням алгоритму FCM, m^3/c .

У результаті обчислень отримано значення середньоквадратичного відхилення, яке становить 0.04.

Для реалізації методу субтрактивної нечіткої кластеризації було використано інструментарій Fuzzy Logic Toolbox у середовищі Matlab. Застосування цього пакету дозволяє автоматично формувати нечітку базу знань на основі вхідних експериментальних даних із використанням моделі типу Сугено. У процесі виконання алгоритму генеруються правила, що відповідають ділянкам із максимальною густиною роз-

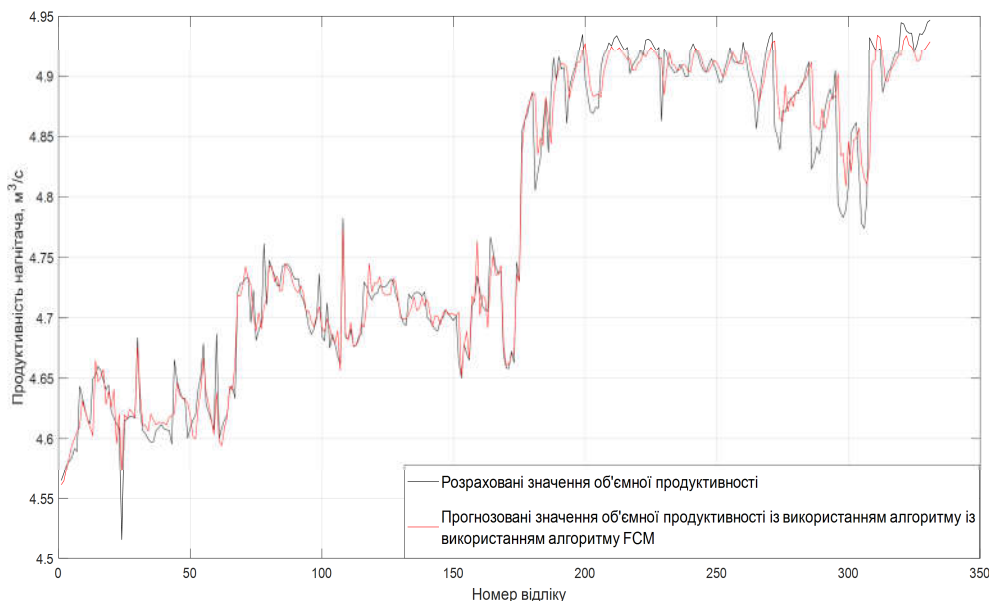


Рисунок 1 – Обчислені та прогнозовані величини об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача із застосуванням алгоритму FCM

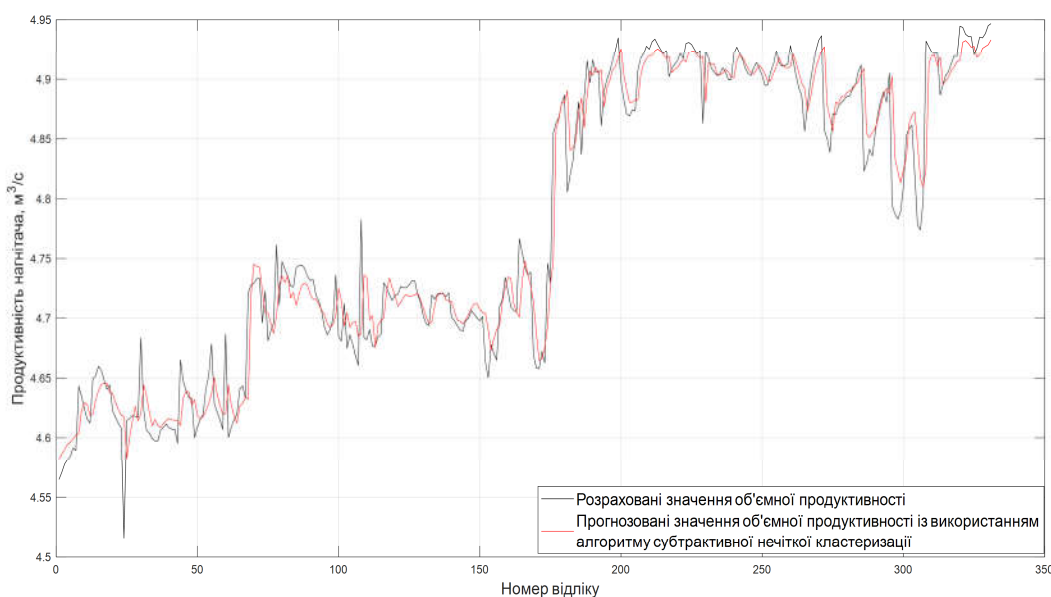


Рисунок 2 – Обчислені та прогнозовані величини об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача із застосуванням алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації

міщення вихідних даних. Реалізація алгоритму здійснена за допомогою вбудованої функції `genfis2`.

Візуалізація результатів роботи алгоритму субтрактивної кластеризації наведено на рисунку 2.

Процедура витягування нечітких правил із експериментальних даних у межах функції `genfis2` умовно поділяється на два основні етапи. На першому з них за допо-

могою функції `subclust` визначається кількість кластерів, що відповідає кількості нечітких правил. На другому етапі, з використанням методу найменших квадратів (МНК), формується наслідкова частина кожного правила, тобто складова «...тоді...».

Одним із ключових параметрів функції є вектор r , який встановлює розмірність області нечіткого правила в напрямку ко-

жної координати. Зважаючи на те, що функція *subclust* виконує нормалізацію вхідних даних до одиничного гіперкуба, значення елементів вектора *r* повинні лежати в інтервалі $[0;1]$.

Варто зазначити, що вибір радіуса *r* істотно впливає на якість побудованої моделі. Якщо значення *r* є малим, то база нечітких правил буде більш деталізованою, проте така модель стає чутливою до шумів і статистичних викидів. Натомість, надто велике значення цього параметра може призвести до втрати частини потенційно корисних правил під час побудови моделі. Відповідно до рекомендацій, наведених у джерелі [8], у даному дослідженні обрано значення $r = 0.55$, а кількість ітерацій встановлено рівною 100.

Для перевірки точності прогнозу моделі використано формулу (7), в результаті чого було отримано значення середньоквадратичного відхилення, що становить 0.019.

Висновки

У межах даного дослідження було запропоновано підхід до прогнозування значень об'ємної продуктивності нагнітача,

заснований на використанні алгоритму Fuzzy C-Means. За результатами моделювання визначено значення середньоквадратичного відхилення, яке становить 0.04.

Окрім того, реалізовано альтернативний метод прогнозування, що ґрунтується на субтрактивному алгоритмі нечіткої кластеризації. Формування нечітких правил здійснено автоматично на основі наявних експериментальних даних. Для побудови відповідної бази знань було використано модель типу Сугено.

Згідно з результатами розрахунків, значення середньоквадратичного відхилення, отримане для цього підходу, становить 0.019. Проведене порівняльне оцінювання підтвердило високу ефективність обох методів, зокрема — хорошу точність прогнозування об'ємної продуктивності нагнітача.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Bezdek J.C., Keller J.M., Krishnapuram R., Pal N.R. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing. Springer. 2005. 432 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/b106267>
2. Phu L., Anh D.T. Mostif-based method for initialization the K-means clustering for time series data. *Springer*. 2011. Vol. 7106. P. 11–20. doi: [10.1007/978-3-642-25832-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25832-9_2)
3. Gonzalez H., Han J., Li X., Mythili V., Wang X. Adaptive mining of data streams using ensemble classifiers. *ACM SIGMOD Record*. 2012. № 41(1). P. 20–27.
4. Chatfield C. The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition. CRC Press. 2009. 352 p.
5. Widiptura H., Kho H., Pears R., Kasabov N. A novel evolving clustering algorithm with polynomial regression for chaotic time-series prediction. *Neural Inf Process*. 2009. Vol. 5864. P. 114–121. doi: [10.1007/978-3-642-10684-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10684-2_13)
6. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23(3). P. 665–685. doi: [10.1109/21.256541](https://doi.org/10.1109/21.256541)
7. Wang J., Chi D., Wu J., Lu H. Chaotic time series method combined with particle swarm optimization and trend adjustment for electricity demand forecasting. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38. P. 8419–8429. doi [10.1016/j.eswa.2011.01.037](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.037)
8. Ahmed M.U., Begg R.K., Hassan M.M. A fuzzy approach for the evaluation of cluster validity indices. *Pattern Recognition*. 2012. Vol. 45(1). P. 336–346.

APPLICATION OF CLUSTERIZATION METHOD TO PREDICT CENTRIFUGAL SUPERFAN PRODUCTIVITY VALUES

Harasymiv T. H.

Assistant, Department of Computer Systems and Networks
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1731-0286>
e-mail: taras.harasymiv@nung.edu.ua

Abstract. This research analyzes approaches to predicting the volumetric efficiency of a centrifugal supercharger based on clustering methods. The main advantage of the proposed approaches over traditional forecasting models is their ability to take into account the stochastic nature of experimental data and use modern information technologies, in particular, elements of fuzzy logic, artificial neural networks and genetic algorithms. The use of multiple iterative procedures ensures a gradual decrease in the error of the objective function to the required level, which contributes to increasing the accuracy of forecast results. In particular, a forecasting method based on the Fuzzy C-Means algorithm was developed, which is based on the concept of fuzzy c-means. It was implemented in the Matlab software environment. Within this approach, 20 clusters were established, and the number of iteration steps was up to 100. The resulting standard deviation is 0.04, which indicates an acceptable accuracy of the model. In addition, the paper considers an alternative forecasting method based on the subtractive fuzzy clustering algorithm. The construction of a system of fuzzy rules was carried out autonomously on the basis of experimental measurements using a Sugeno-type model. For each of the studied objects, the potential value was calculated, which characterizes the probability of cluster formation in its vicinity. The cluster centers were determined iteratively based on the points with the highest potential. As a result, the standard deviation obtained for this approach is 0.019, which confirms the higher forecasting accuracy compared to the Fuzzy C-Means method. The testing of the considered methods was carried out on the basis of real experimental data collected during the operation of the centrifugal supercharger model 16 ГЦ2-396/53-78С in the Dolyna linear production department of main gas pipelines in November 2015.

Keywords: centrifugal supercharger, volumetric efficiency, clustering, forecasting, Fuzzy C-Means, subtractive fuzzy clustering.



Прийнято 18.08.2025. Прорецензовано 19.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

UDK 621.791.05:007.52

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-108-120

AI-DRIVEN INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS FOR ROBOTIC WELDING: STATE OF THE ART AND FUTURE OUTLOOK

Igorov O. P.

Postgraduate Student

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

54025, Heroiv Ukrainy pr., 9, Mykolaiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0009-6206-2956>

e-mail: alex.yegorov@gmail.com

Abstract. To enhance the level of automation, process stability, and the quality of welded joints in modern industry, the concept of intelligent welding control is being actively implemented. The article analyzes the current state of welding automation technologies and outlines the main directions of their evolution over the next five years. Special attention is given to the application of artificial intelligence methods such as expert systems, fuzzy logic, machine learning, deep learning, and computer vision. These approaches are used to optimize process parameters, monitor the state of the weld pool, detect defects in real time, and improve the accuracy of weld formation. However, most existing solutions remain highly specialized and do not provide full integration between the stages of preparation, execution, and quality control of welding. A significant challenge is the limited ability of such systems to operate online and adapt to changing process conditions, such as temperature fluctuations, variations in part position, or arc instability. The article emphasizes the importance of developing online adaptive control based on multisensor data and artificial intelligence. In particular, it explores the prospects of using deep learning for the analysis of video streams and thermographic images of the weld pool, enabling automatic adjustment of parameters in real time. The application of reinforcement learning opens up new opportunities for optimizing the trajectories of welding robots and selecting welding strategies under uncertainty. Furthermore, the implementation of Internet of Things (IoT) technologies allows the creation of integrated networks of sensors and devices that exchange data for building digital twins of welding processes. Welding automation can be significantly improved in terms of efficiency, flexibility, and quality through the adoption of these AI-based technologies. This advancement is associated with the possibility of safe human–robot collaboration, automatic adaptation to environmental changes, as well as the prediction and prevention of welding defects.

Keywords: intelligent welding control, robotic welding, artificial intelligence (AI), machine learning, deep learning, welding automation.

Запропоноване посилання: Igorov, O. P. (2025). Ai-driven intelligent control systems for robotic welding: state of the art and future outlook. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 108-120. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-108-120

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Introduction

Welding is an essential manufacturing process used across a wide range of industries, from automotive and aerospace to construction. Robotic welding systems have been employed to automate this process, improving productivity and repeatability, since the 1980s. Traditional welding robots were relatively limited in their capabilities, with basic feedback control and limited use of sensors [1]. Advances in control, modeling, and vision have led to much higher precision and repeatability in positioning the welding torch, following complex paths, and generating welds with higher quality, at greater speed. This is illustrated by a demonstration of welding on a deep underwater pipeline. The “brains” of a welding robot, its control systems, must precisely control the robot’s motion, regulate welding parameters, and respond appropriately to various disturbances.

The application of artificial intelligence (AI) to the control of welding robots and processes has seen very rapid development in recent two decades [2]. Core problems such as choosing the right welding parameters, following the joint geometry, or monitoring and ensuring defect-free welds are hard to address fully with conventional controllers. AI provides a data-driven or rule-based form of intelligence which can be used alongside traditional controllers. There has been significant research applying a range of AI techniques – fuzzy logic, expert systems, artificial neural networks (ANN), genetic algorithms (GA), and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) – to weld process modeling and control. The underlying methods can be used to learn from data, or encode human knowledge, to provide intelligence to control systems. In welding, these need to be able to handle complex nonlinearities and process uncertainty.

Intelligent control systems for welding robots use AI or other advanced computational algorithms to provide a form of control that can be adaptive, optimized, or “smart” in certain ways. This is in contrast to simpler, logic-based controllers which have fixed rules and responses. Intelligent systems can learn from sensor data or inputs, predict

important outcomes such as weld quality, and adapt their parameters or path as needed. There have been many successful examples, such as using neural networks to predict weld bead geometry and then adjust the travel speed, and fuzzy logic controllers which codify an expert welder’s knowledge into linguistic rules [2].

However, there is also a significant gap between these successes and a fully modernized welding robot for industry, where advanced AI is put to use. Many of the AI welding applications developed so far have been aimed at off-line optimization or monitoring, but not real-time control. Most welding robots to this day use only relatively simple sensor feedback systems, which are unable to cope with more complex situations and cause the robot to go off its desired course. True closed-loop intelligent control systems, which sense the state of the weld and intelligently adapt the process in real time, are only just starting to be developed. In addition, the practical integration of advanced AI into industrial welding systems has many challenges to be solved, such as reliability, data availability, and real-time constraints.

In this paper, we survey the current state of the art in intelligent control systems for welding robots and develop a path forward. We review the major intelligent control approaches that have been applied, and highlight their uses and limitations. Based on recent research and emerging trends, we suggest improvements and new capabilities that are likely to be needed and valuable for 2025–2030. This includes a focus on the increasing roles of deep learning and computer vision, without neglecting other promising AI methods such as reinforcement learning and multi-agent systems.

The goal is to bring some clarity to where research and development can have the most impact and support the design of “smarter” welding robots that can outperform today’s systems in autonomy, quality assurance, and adaptability.

Presentation of the main material

Analysis of modern foreign and domestic research and publications.

To answer our research question “What intelligent control methods have been applied to welding robots and how might they be improved by artificial intelligence in the next five years?”, we first performed a focused literature search and qualitative analysis of the results.

Literature Search – articles and proceedings from 2018–2024 were searched for AI-based welding control contributions, using IEEE Xplore, ScienceDirect, Springer, and Google Scholar. Keywords included “intelligent welding system”, “robotic welding AI”, and “weld defect detection deep learning”. Preference was given to peer-reviewed articles and prominent review publications [1, 2] while winnowing down to ~40 key references. These cover a breadth of welding processes (arc, laser, friction stir) and targets for control from low-level regulation to high-level planning.

Categorization – these publications were then sorted into 4 broad categories:

- Welding Process Control – Papers with a focus on regulating penetration, bead shape, etc.
- Robot Motion Control – Works discussing path planning, torch angle, multi-robot choreography.
- Sensing and Monitoring – Sensor integration to improve seam tracking, weld pool monitoring, defect detection.
- System-Level Integration – Broader level descriptions of manufacturing systems with IoT or multi-agent architecture.

These publications were then further classified for the AI technique employed (fuzzy logic, machine learning, evolutionary optimization, etc.), as well as for the type of control being supported (off-line, real-time, or predictive control).

Data Synthesis – Key attributes from each publication are distilled here and are summarized in the tables and figures below. This includes information on the AI method, welding task, and result(s) (accuracy increase, programming speed, etc.) as well as listed

open challenges. These data cover easily comparable quantities (track weld defect prediction accuracy [3], latency of feedback systems [4], benefits such as reduction in manual input), as well as qualitative, repeating themes (calls for improved real-time control algorithms [1], standardized datasets).

Terminology – “Intelligent control systems” in this work refer to AI-augmented control methods in addition to more classical PID or hard-coded logic. The AI umbrella term is used broadly here to include machine learning, expert systems, and evolutionary optimization. As applicable, more specialized terms like deep learning, reinforcement learning, and digital twin are defined in context in the sections below, with particular focus on their contributions to welding control. Mathematical definitions are given in a high-level summary.

Limitations – this survey is qualitative and does not involve any new experiments. It is drawn from prior literature which may constrain aspects of our findings and does not exhaust the topic. Our search and organization methodology is reusable and will be continued for future updates for work past 2024. Inclusion criteria and classification framework are listed for reproducibility.

The results we have found provide a baseline to which new and future work can be contrasted in order to identify both progress and remaining needs. We present this data below in a series of tables and figures contrasting past and present intelligent welding systems.

Review of Current Intelligent Control Systems in Welding Robotics (up to 2025)

Numerous intelligent control approaches have been implemented in welding robotics, each addressing different aspects of the welding operation. Table 1 provides an overview of key AI techniques used so far, summarizing their typical applications, strengths, and limitations in welding control.

Artificial neural networks (ANN) were widely used to model the welding process in order to establish the relation between welding parameters and welding results, such as bead height or penetration in terms of the travel

Table 1 – Common AI techniques applied in welding robot control (current state up to 2025), with their typical uses

AI Technique	Typical Applications in Welding
Artificial Neural Networks (ANN) [13][14]	Predicting weld outcomes (bead geometry, penetration); mapping sensor inputs (e.g. weld pool image features) to quality metrics; parameter optimization via learned models.
Fuzzy Logic Systems [15][30]	Feedback control based on expert if-then rules (e.g. adjusting voltage or travel speed based on gap measurement); human-readable seam tracking strategies.
Neuro-Fuzzy (ANFIS) [32][33]	Adaptive tuning of welding control rules; combining sensor data of different types (visual, acoustic, etc.) in a unified inference system.
Genetic Algorithms (GA) and Optimization [16][17]	Off-line optimization of weld sequences and robot paths (e.g. minimizing robot travel time or avoiding collisions in multi-robot cells); tuning multiple welding parameters to meet quality objectives.
Adaptive/Model-Based Control (e.g. MPC, expert systems) [35][12]	Real-time control using a process model: maintaining temperature or penetration through MPC; rule-based expert systems for adjusting parameters on the fly.

speed, current, and voltage. ANNs can be employed to train the complex nonlinear relationship of the system, thus achieving better performance than the traditional welding empirical formula. Neural networks have also been applied for processing sensor data and predicting the corrective action to provide to the closed-loop controller as part of a partial closed-loop control [2]. However, as a black-box model, ANNs require large amounts of data to train the model, and the resulting relationship is difficult to interpret.

Fuzzy logic systems were also commonly used to codify the expert knowledge and the rule-based knowledge into the machine-readable format, using fuzzy sets and linguistic variables to represent the rules, such as “IF gap is large, THEN increase wire feed rate”. Fuzzy systems are very interpretable and easy to design, and also robust to noise and uncertainties in the input data, but the lack of learning capability of the knowledge base may be a shortcoming, unless integrated with other data-driven models to update/refine the rules or memberships [2]. Hybrid neuro-fuzzy systems, such as adaptive *neuro-fuzzy inference systems* (ANFIS), were also developed to provide both the learning capability and interpretability. These systems

can automatically learn both the rule structure and the membership functions from data, but the design is still complicated and not easily scaled to multiple-output cases.

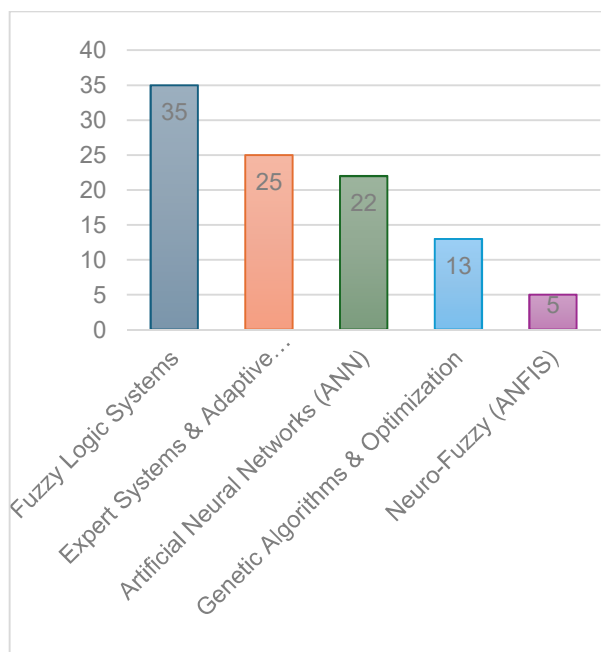
Optimization algorithms were also leveraged to search for the optimal parameter values or robot paths. For instance, *genetic algorithm* (GA) was used to search for the torch trajectory that produces minimum distortion or collision in a multi-robot cell [2]. However, this approach is normally used offline due to the heavy computational load. Model-based *adaptive control schemes* were proposed to achieve both the thermal consistency and the joint variation compensation [1], using model-predictive control (MPC) or self-tuning regulators, but they also require accurate physical models of the process and could be affected by the process disturbances or model mismatches.

Robots, based on techniques we have described above, are actively used by large enterprises in various industries [6-11]. As Figure 1 shows leading technology is based on fuzzy logic systems.

Benefits from using AI backed robotics range from increased automation rate to pretty accurate prediction error rates as shown in Table 2.

Table 2 – Performance benefits elicited from AI backed robots in enterprise installations

AI Technique	Performance Metrics	Implementation Examples
Fuzzy Logic Systems	68% production automation rate	Samsung Heavy Industries automation
Expert Systems & Adaptive Control	1-2 year payback period	Lincoln Electric WELDES system
Artificial Neural Networks (ANN)	99% first-pass yield (Path Robotics)	TRUMPF AI laser welding, T Systems automotive
Genetic Algorithms & Optimization	11% error reduction in 7 periods	Multi-robot coordination, hydroelectric turbine repair
Neuro-Fuzzy (ANFIS)	<3% prediction error rates	Friction stir welding applications

**Figure 1 – Welding robots AI technology distribution on the market**

Most of the reported AI-based systems have been validated only in laboratory conditions and on specific welding setups [2]. ANN trained for bead dimension prediction or control on one material and joint configuration may not transfer to other materials and joint designs. Fuzzy systems tuned for one welding process and a certain range of input parameters may not be applicable for another welding process and require reconfiguration. This is a fundamental limitation, namely the lack of generalization to new conditions. The vast majority of existing systems can do very well when the conditions are known and part of the training data. In all other cases, they must be retrained.

Another problem area which remains understudied is the online adaptive control of welding processes in real time. The vast majority of AI use cases for welding robots are still offline in nature. For example, optimizing welding parameters or analyzing a finished weld for its quality and defects. This is in part due to the inherent nature of welding as a complex and dynamic process which involves many fast-varying and interrelated variables such as current, voltage, travel speed, wire feed rate, arc force, or thermal radiation [1]. Real-time control would require AI models to make fast predictions with low-latency on embedded hardware. Penttilä et al. (2023) recently demonstrated a fully closed-loop ANN-based control system that could adapt welding parameters online during welding based on the data from a laser sensor to successfully maintain a consistent weld bead [4].

Quality monitoring and feedback for real-time control is another area which is just starting to see development. The vast majority of the post-weld quality inspections such as X-ray is done only after the weld is completed, which is a rather late time to detect and fix a defect. Newer approaches are being developed to use in-process data from welding sensors and vision systems to monitor and detect weld quality issues such as porosity, burn-through, or spatter in real-time during welding [3]. CNNs have been used to classify weld images in terms of defects with over 95% accuracy, but they lack interpretability and suffer from performance loss when the conditions during welding change from those of the training data

[3]. This challenge will have to be addressed by explainable AI and better training data.

Intelligent welding systems are also currently used mostly in a standalone way and to scale will need to be integrated into larger manufacturing systems. IoT and digital twin technologies are emerging as a means to connect and integrate welding robots into a networked, adaptive production line [5], where each agent has specialized capabilities.

Emerging Trends and Future Demands (2025–2030)

The subsequent technical trends and possible subfields, according to our estimation of the current technical potential, may apply in the development of intelligent welding control systems in the upcoming five years. See Figure 2 for perceived deployment times [12-16].

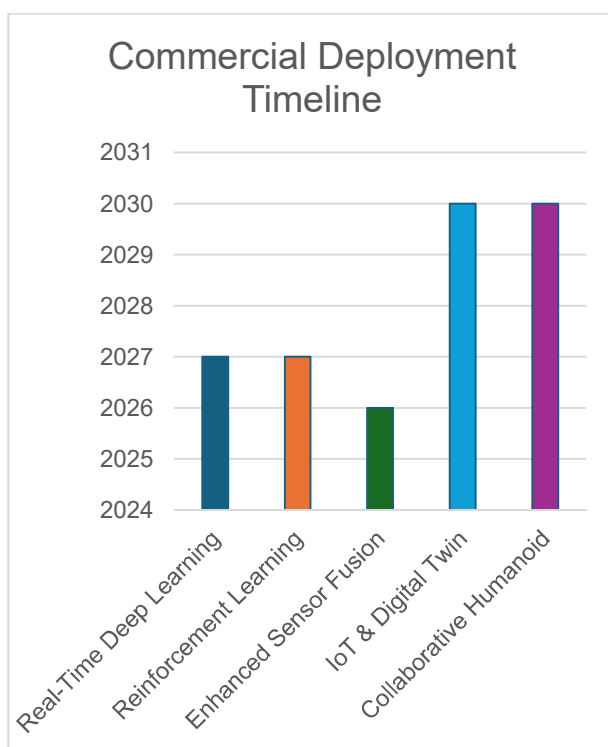


Figure 1 – Commercial deployment timeline for emerging AI technologies in welding

Real-Time Deep Learning - deep learning models for real-time analysis of weld pool conditions, which are already used offline in some research contexts today, will be more widely used in an online fashion by welding robots in the future (by 2030). Vision-based welding control systems based on CNNs are

in fact already used for online monitoring of the weld pool today with high defect detection accuracy under varying conditions [3]. Challenges include transferring models to embedded edge-computing hardware with enough speed and robustness to all relevant variations [1]. Efficient neural network architectures and specialized AI hardware will allow the welding system to see and understand the weld condition in real time and to automatically make alignment, parameter, etc. adjustments as a human expert would in the future.

Reinforcement Learning (RL) – RL techniques allow for the learning of optimal welding strategies in simulated trial-and-error and their immediate application in the production environment. The ability of RL to derive improved welding sequences to reduce residual stress is already demonstrated in preliminary work [1]. With improvements in simulators and computing power expected by 2025, RL-driven adaptive controllers will be more realistic to use to guide complex operations such as multi-pass welding or online parameter adaptation. Recent review papers on RL and welding emphasize the potential of RL for advanced control capabilities that can outperform manual tuning for welding problems that are too complex or uncertain for human experts [1].

Sensor Fusion and Advanced Analytics – advanced sensor fusion techniques will allow the use of multiple types of sensors (visible and infrared cameras, laser scanners, force sensors, acoustic sensors, etc.) to obtain a better real-time understanding of the welding process in the future [1]. For example, AI-driven analytics on data from thermal cameras and optical cameras might be fused to improve defect detection performance. Improved hardware and software will allow for more extensive data collection via sensors with higher resolution, sampling rate, and response time [1]. New big data analytics methods will also make use of large amounts of aggregated weld data collected in IoT-connected factories to identify performance patterns and to continuously optimize controls. This would be in line with the general goals of the Industry 4.0 movement [5].

Table 3 – Emerging AI technologies KPI as leading companies

Emerging Technology	Key Performance Indicators	Leading Companies
Real-Time Deep Learning	99% first-pass yields, 50ms detection time	Path Robotics, PHOENIX framework
Reinforcement Learning	<11% error in 7 periods, autonomous learning	FANUC, Inbolt, General Motors
Enhanced Sensor Fusion	98.9% segmentation accuracy, 0.0255s processing	IBM, YOLOv5 integration
IoT & Digital Twin	97.35% detection accuracy, 0.08mm tracking error, 96.65% tracking precision	Schneider Electric, Yaskawa
Collaborative Humanoid	94.44% behavior classification accuracy, 15% throughput increase, 85% idle time reduction	HD Hyundai, Persona AI

IoT and Digital Twins – the current perception of welding operations as isolated, stand-alone processes is expected to shift to fully networked systems by 2030. Digital twins, i.e. virtual models which replicate the real-world welding setup and its processes, will be used to simulate welding operations to a larger extent and to optimize control strategies before their implementation in the real system. Validation of virtual sensors is a welding task which has already been discussed for the seam tracking task in the literature [2]. Through IoT connectivity, welding robots will share real-time status and quality data enterprise-wide for live monitoring, predictive maintenance scheduling, and optimized process adjustments [1]. This should improve flexibility and operational efficiency.

Collaborative and Human-Centric Approaches – intelligent welding systems will be used in a more collaborative manner with human welders rather than solely as replacements in isolated robot cells in the future. Cobots and AI will be combined to perform more of the highly repetitive or physically strenuous or unpleasant tasks while humans perform the complex decision-making and teaching. Advanced operator interfaces such as augmented reality (AR) are already being used to aid operators in robot programming and path planning [1]. It is possible that by 2025–2030 a skilled welder could supervise the operation of multiple cobots in parallel and teach or correct them as

needed. AI systems will have to be more adaptive, transparent, and safety-aware in their algorithms to account for humans in their operational environment. This will improve productivity and broaden the acceptance of welding systems.

Leading technology and production companies came up with expected key performance indicators (KPIs) to measure effectiveness (see Table 3).

Sustainability and Resource Efficiency – a greater focus on the economic efficiency and sustainability of welding operations will also guide the development of welding controls in the future. AI can be used to optimize the energy efficiency of welding processes by precisely tailoring parameters to the welding requirements to avoid excessive heat inputs that cause greater distortion and energy waste [1]. AI-based defect prediction or prevention capabilities will minimize rework and material wastage. Predictive maintenance via AI analytics will reduce downtime and accidents by predicting when a tool or equipment is likely to fail or underperform. AI may also allow more use of new sustainable welding materials that are more difficult to work with using traditional controls. The need to preserve the environment and use resources as efficiently as possible will drive continued efforts to improve welding processes using AI while maintaining quality standards. These trends will be summarized in the next section.

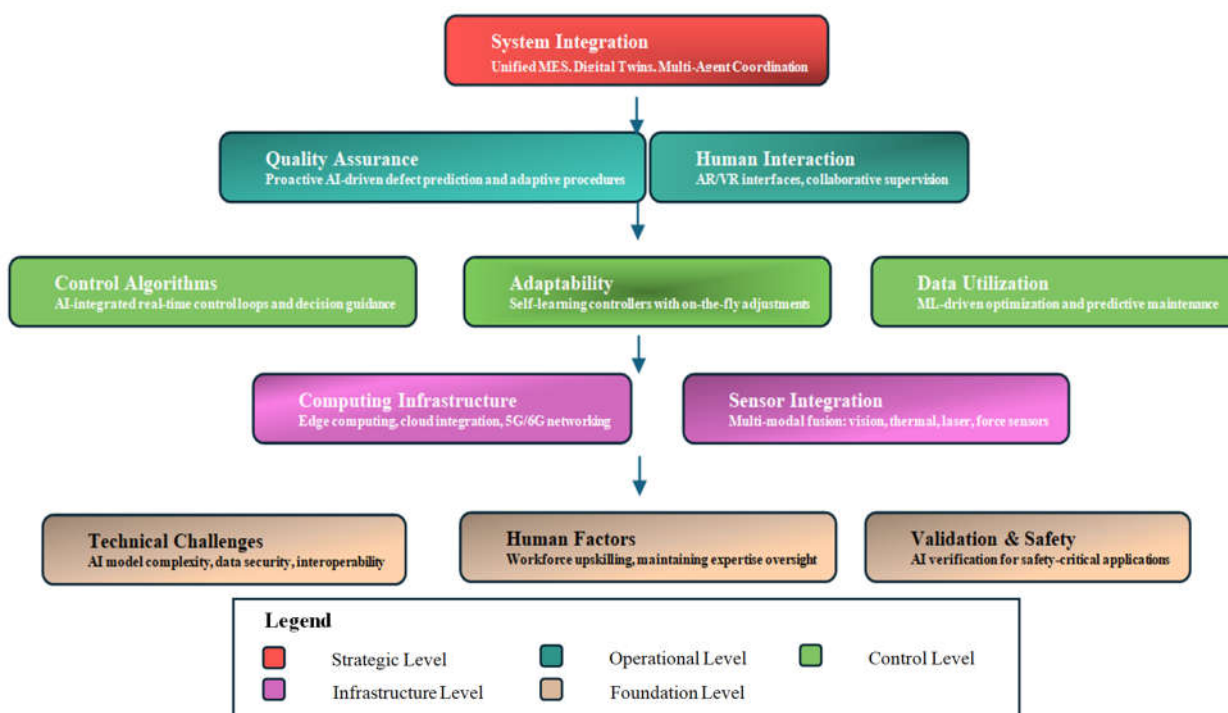


Figure 3 – Intelligent Welding Control Systems: Hierarchical Architecture

Intelligent Welding Control Systems: Hierarchical Architecture

Analysis, we have conducted across available sources, led to identifying pillar aspects intelligent welding control system should adhere to. These pillars are: system integration, quality assurance, human interaction, control algorithms, adaptability, data utilisation, computing infrastructure, sensor integration and challenges. It helps to put them into a hierarchy for a better understanding of relations and dependencies between them. We have designed an high level architecture based on relevant data from recent scientific resources [1,5, 20-25] (see Fig. 3).

To do an intermediate conclusion – the intelligent welding control systems hierarchy above represents a comprehensive five-level architecture that transforms traditional welding automation into truly adaptive, AI-driven manufacturing systems. At the strategic apex, *System Integration* orchestrates unified manufacturing execution systems (MES) and digital twin frameworks, coordinating all subsystem interactions through IoT-enabled multi-agent architectures. The operational level encompasses *Quality Assurance* and *Human*

Interaction, where proactive AI-driven defect prediction replaces reactive inspection methods, while augmented reality interfaces enable collaborative human-robot supervision. The control level integrates *Control Algorithms*, *Adaptability*, and *Data Utilization*, forming the intelligent decision-making core that employs real-time AI control loops, self-learning adaptive controllers, and machine learning-driven process optimization. The infrastructure level provides the technological foundation through *Computing Infrastructure* (edge computing, cloud integration, 5G/6G networking) and *Sensor Integration* (multi-modal fusion of vision, thermal, laser, and force sensors). Finally, the foundation level addresses critical *Challenges* including AI model verification for safety-critical applications, data security standardization, and workforce upskilling requirements. This hierarchical structure reflects the evolution from isolated, pre-programmed welding robots to interconnected, intelligent systems capable of autonomous learning, real-time adaptation, and collaborative operation with human operators, supported by extensive peer-reviewed research in intelligent manufacturing and welding automation.

Comparison between present and anticipated intelligent welding control systems

Welding automation is transitioning towards an intelligent adaptive paradigm which will replace traditional deterministic control methods by offering real-time optimization and self-modification functions for enhanced human-machine collaboration. The current intelligent welding system technologies include artificial intelligence, intelligent sensor technologies, and cyber-physical systems consisting of virtual simulation (digital twins) and Internet of Things (IoT) technologies that are used to form smart interconnected manufacturing systems. The shift in technology represents a qualitative change from stand-alone reactive welding systems to advanced interconnected welding systems that learn and work together with human operators. The distinction between the current (until 2025) and the future (2025–

2030) is based on both the status of current technology development and imminent breakthroughs such that current implementations of artificial neural networks, fuzzy logic systems, and image processing systems are implemented mainly for offline optimization while the complete shift to the future will see a comprehensive integration of artificial intelligence in online control systems, reinforcement learning for self-adaptation, and multi-agent systems for coordinated manufacturing. The transition between the existing and the future is important for manufacturers and welding engineers looking to shift from automation to intelligent manufacturing.

The summary for each of the intelligent system technologies, comprising the existing and the future state, is given in Table 4. The table makes it clear the field is moving from primarily static, isolated systems to adaptive, interconnected intelligent systems.

Table 4 – High-level comparison of intelligent welding control systems: present (up to ~2025) vs. anticipated future developments (2025–2030)

Aspect	Up to 2025 (State of the Art)	2025–2030 (Future Outlook)
System Integration	Welding robots largely stand-alone. No holistic optimization – each cell optimized locally if at all. Digital simulation models exist but are not linked live to operations.	Welding cells are part of a unified manufacturing execution system (MES). Digital twins of welding processes run in parallel with real operations, providing real-time simulation feedback and what-if analysis [1]. Multi-agent control: multiple robots or stations coordinate via an AI supervisor agent to optimize line throughput and energy usage [5].
Quality Assurance	Largely reactive – defects are detected after the fact (using NDT methods or final inspection). Quality control relies on fixed welding procedure specifications (WPS) that must be pre-qualified.	Proactive and adaptive - AI models predict potential defects in real time and adjust parameters to avoid them [3]. WPS evolves into flexible adaptive procedures where the system can prove equivalence to standards via data. If a defect is unavoidable (e.g. due to material), the system flags it immediately and perhaps auto-repairs or marks the spot for automated post-weld repair.
Control Algorithms	Predominantly PID and simple feedback for real-time control. AI (ANN, GA) used mostly for off-line parameter optimization or advisory systems [2].	Widespread integration of AI in control loops: real-time control decisions guidance [1]; policies for robot motion and parameter tuning [1].

Continuation Table 4

Aspect	Up to 2025 (State of the Art)	2025–2030 (Future Outlook)
Adaptability	Limited adaptive behavior. Systems can handle expected disturbances. Most “intelligence” is pre-programmed or requires re-training offline if conditions change [2].	High adaptability and self-learning. Controllers adjust on the fly to variable conditions using AI. Robots are more general-purpose, able to weld new parts with by learning from simulation or operator demonstration rather than manual coding [1][4].
Data Utilization	Data from welds is used mostly for quality documentation or off-line analysis. Little sharing of data between machines.	Data-driven optimization at scale. Machine learning models analyze aggregated data from many welds to find optimal practices and feed improvements back to controllers [5]. Trends prediction triggers preventative maintenance.
Computing Infrastructure	Traditional industrial controllers (PLC/embedded PCs) with limited AI capability; heavy computations done on offline computers if at all. Minimal use of cloud or edge computing in real-time due to latency concerns.	Hybrid computing approach: edge computing becomes common at the cell level [1], non-critical data processing and machine learning training are offloaded to the cloud or central servers. Networking standards (5G/6G) allow data to be usable in closed-loop control and remote supervision.
Sensor Integration	Single primary sensor driving automation; through-the-arc sensing with known reliability issues in complex joints [2]. Additional sensors (laser, thermal, etc.) used mainly in research or high-end systems.	Welding robots combine data from vision (visible & IR), laser profilometers, sound, and more to gain a comprehensive view [1]. Sensor data is fused using AI. Real-time 3D sensing is utilized for adaptive path correction and quality control.
Challenges	Ensuring weld consistency with limited adaptation; dealing with noise in sensor signals; lack of interoperability (proprietary systems); obtaining sufficient training data for AI; conservative industry acceptance due to safety/quality risks.	Handling the complexity of AI models (verification and validation of AI-driven decisions for safety-critical welds); managing data security and standardization across IoT devices; maintaining human oversight and expertise in an AI-dominated process (avoiding over-reliance on automation); workforce upskilling to work alongside intelligent machines [2].

The above comparisons show an overall shift: from fixed automation to adaptive intelligence in welding robotics. To realize this shift, cooperation between welding engineers, AI and control system experts will be required in order to achieve safe, efficient and user-friendly solutions. Industries with high

regulatory barriers, such as aerospace or oil & gas, may be more conservative and require AI applications to show consistently high-quality results at scale. High-volume industries such as automotive may adopt these new technologies earlier on, since potential cost savings may be larger.

Case studies already show the benefit of AI: a case study found fewer weld defects and more consistent welds when using an AI-based feedback control [4], and another reduced programming time by 40% using AI-assisted path planning [2].

Robotic welding systems are expected to be fully integrated in smart manufacturing in 2025-2030. They will be able to learn and autonomously adapt in real-time. Human operators will be responsible for mainly supervision, training and personalization. This development has the potential to mitigate the shortage of skilled workers and can further increase safety. Better understanding the current limitations may help to guide the AI development, so that in the future, welding control systems are truly smart, robust and reliable.

Conclusion

We presented an overview of the development of intelligent controls for welding robots from the early first automatic devices to the state of the art of today with AI-based approaches. Neural networks, fuzzy logic, and genetic algorithms have been successfully used to find optimal process parameters and support human decisions to enhance weld quality and process efficiency [2]. However, most current systems can still only execute predefined procedures with simple feedback from physical sensors. Advanced applications of AI for closed-loop control to operate in real-time are still the exception.

AI represents a major opportunity but also a big challenge for the future of welding robot controls. On the one hand, there are exciting new capabilities with the novel technologies, such as real-time weld defect detection and classification with deep learning vision systems [3], dynamic path planning and parameter adjustment with reinforcement learning, or collaborative operation with other robots and human operators as IoT-enabled multi-agent systems [5]. On the other hand, there are important open questions for a reliable implementation to be able to deploy it industrially. These include the generalization of AI models to different welding conditions

[3], the necessary computational speed for real-time operation [1], or the interpretability of the AI-based decision-making for proper human supervision.

The potential benefits from further development of intelligent controls for welding robots are huge. Near 100% weld quality with very low defect rates could be achieved for significant cost savings and improved product quality. Intelligent robots could be adapted more easily for different production scenarios, thus mitigating skilled worker shortages or reducing safety hazards by reducing human exposure to welding tasks. In addition, AI-based optimization of material and energy consumption can support sustainability goals.

However, risks such as the over-reliance on AI without adequate validation and error handling measures leading to unexpected failures must not be neglected. The associated need for appropriate standards and workforce training must also be taken into account in due time. By 2030 we expect welding robots with AI elements to usually operate autonomously by learning and adjusting while human operators will transition to supervisory and training roles. We view this development as a major advancement towards achieving fully autonomous manufacturing capabilities in welding robots.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

References

1. Kahnamouei J.T., Moallem M. Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.119294](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294)
2. Gyasi E., Handroos H., Kah P. Survey on artificial intelligence (AI) applied in welding: A future scenario of the influence of AI on technological, economic, educational and social changes. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol 38. pp. 702-714, doi: [10.1016/j.promfg.2020.01.095](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.095)
3. Li H., Ma Y., Duan M., Wang X., Che T. Defects detection of GMAW process based on convolutional neural network algorithm. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13(1). doi: [10.1038/s41598-023-48698-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-48698-x)
4. Penttilä S., Lund H., Skriko T. Possibilities of Artificial Intelligence-Enabled Feedback Control System in Robotized Gas Metal Arc Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol.7(3). P. 102. doi: [10.3390/jmmp7030102](https://doi.org/10.3390/jmmp7030102)
5. Liu Q., Chen C., Chen S. Key Technology of Intelligentized Welding Manufacturing and Systems Based on the Internet of Things and Multi-Agent. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022. Vol 6. P.135. doi: [10.3390/jmmp6060135](https://doi.org/10.3390/jmmp6060135)
6. Ship Technology. The digital shipyard: robotics in shipbuilding. Available: <https://www.ship-technology.com/features/feature-the-digital-shipyard-robotics-shipbuilding/>
7. ResearchGate. WELDES: An intelligent defects expert system for aluminum welding process. Available: https://www.researchgate.net/publication/240305021_WELDES_An_intelligent_defects_expert_system_for_aluminum_welding_process
8. Path Robotics. Robotic Welding Systems by Path Robotics. Available: <https://www.path-robotics.com/>
9. Engineering.com. The AI Revolution has Arrived for Laser Welding. Available: <https://www.engineering.com/the-ai-revolution-has-arrived-for-laser-welding/>
10. ScienceDirect. Data-driven process characterization and adaptive control in robotic arc welding. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850622000920>
11. ScienceDirect. Vision-based construction robot for real-time automated welding with human-robot interaction. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580524005181>
12. Nature Communications. A physics-informed and data-driven framework for robotic welding in manufacturing. Available: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-60164-y>
13. Nature Scientific Reports. A guidance system for robotic welding based on an improved YOLOv5 algorithm with a RealSense depth camera. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-48318-8>
14. Grand View Research. Digital Twin Market Size And Share | Industry Report, 2030. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market>
15. GlobeNewswire. Collaborative Robot Market Analysis Report 2025-2030. Available: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/07/09/3112356/28124/en/Collaborative-Robot-Market-Analysis-Report-2025-2030-with-Universal-Robots-FANUC-ABB-Techman-Robot-Aubo-Robotics-Technology-Co-and-Kuka-Leading.html>
16. Interesting Engineering. US firm's humanoid robot to perform welding in Korea's shipbuilding. Available: <https://interestingengineering.com/innovation/us-humanoid-robot-in-korea-shipbuilding>
17. Frontiers in Mechanical Engineering. Welding robot automation technology based on digital twin. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1367690/full>
18. Wang Q., Jiao W., Wang P., Zhang YuMing. Digital Twin for Human-Robot Interactive Welding and Welder Behavior Analysis," *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*. 2021. Vol. 8. No. 2, P. 334-343. doi: [10.1109/JAS.2020.1003518](https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003518)
19. IoT Analytics. The top 15 smart factory KPIs: Operational indicators most important for measuring performance. Available: <https://iot-analytics.com/top-15-smart-factory-kpis-manufacturing-kpi/#> AI-Driven Welding Robot Adoption Analysis: Market Data and Technology Transitions (2024-2030)
20. Zou, D. et al. Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc welding. *Welding in the World*. 2024. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-024-01756-y>

21.Powell B.W. Adaptive weld control for high-integrity welding applications. NASA Technical Reports Server. 1993. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930065637>

22.Dharmawan A.G. et al. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol.56. P. 373-391. doi: [10.1016/j.jmsy.2020.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020)

23.Kumar R. et al. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. 2015. Vol. 10.No. 13. doi: [10.1186/s40712-015-0042-y](https://doi.org/10.1186/s40712-015-0042-y)

24.Stavropoulos, P. et al. Intelligent and Adaptive System for Welding Process Automation in T-Shaped Joints. *Metals*. 2023. Vol.13(9). P.1532. doi: [10.3390/met13091532](https://doi.org/10.3390/met13091532)

25.Papazoglou E.L. et al. Expert Systems - An Application to Welding Adaptive Control. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50(1). P. 13586-13591. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017494717>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИМ РОБОТОМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: ПОТОЧНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЯГНЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МАЙБУТНЬОГО

Егоров О. П.

Аспірант

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

54025, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0009-0009-6206-2956>

e-mail: alex.yegorov@gmail.com

Анотація. З метою підвищення рівня автоматизації, стабільності процесів і якості зварних з'єднань у сучасній промисловості активно впроваджується концепція інтелектуального керування зварюванням. У статті проаналізовано поточний стан розвитку технологій зварювальної автоматизації та окреслено основні напрями їх еволюції на найближчі п'ять років. Особливу увагу приділено застосуванню методів штучного інтелекту, таких як експертні системи, нечітка логіка, алгоритми машинного та глибокого навчання, а також комп'ютерний зір. Ці підходи використовуються для оптимізації параметрів процесу, моніторингу стану зварювальної ванни, виявлення дефектів у режимі реального часу та підвищення точності формування шва. Проте більшість існуючих рішень залишаються вузькоспеціалізованими, не забезпечуючи повної інтеграції між етапами підготовки, виконання та контролю зварювання. Значною проблемою залишається обмежена здатність систем працювати в онлайн-режимі та адаптуватися до змін умов процесу, таких як коливання температури, положення деталі або нестабільність дуги. У статті підкреслюється важливість розвитку онлайн-адаптивного керування на основі багатосенсорних даних і штучного інтелекту. Зокрема, розглядаються перспективи використання глибокого навчання для аналізу відеопотоків і термографічних зображень зварювальної ванни, що дозволяє здійснювати автоматичне регулювання параметрів у реальному часі. Застосування навчання з підкріпленням відкриває нові можливості для оптимізації траєкторій руху зварювальних роботів і вибору стратегії зварювання в умовах невизначеності. Крім того, впровадження технологій Інтернету речей (IoT) дає змогу створювати інтегровані мережі сенсорів і пристроїв, які обмінюються даними для побудови цифрових двійників зварювальних процесів. Зварювальна автоматизація може значно покращитися в ефективності, гнучкості та якості за допомогою використання цих AI-технологій. Це пов'язано з можливістю безпечної співпраці з людиною, автоматичної адаптації до змін середовища та прогнозування та запобігання дефектам.

Ключові слова: інтелектуальне керування зварюванням, роботизоване зварювання, штучний інтелект (ШІ), машинне навчання, глибоке навчання, автоматизація зварювання.



Прийнято 16.12.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 004.75:004.934

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-121-129

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ГОЛОСОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ MESH-МЕРЕЖАХ

Тогоєв О. Р. *

Доктор філософії, старший викладач
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>
e-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua

Пузирьов С. В.

Кандидат фіз.-мат. наук, доцент
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>
e-mail: svpuzyrev@gmail.com

Гаврилко С. М.

Кандидат юридичних наук, старший викладач
Університет Короля Данила
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Коновальця, 35, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-7811-5982>
e-mail: serhii.m.havrylko@ukd.edu.ua

Жуланов М. О.

Студент
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-6302-111X>
e-mail: maxim.zhulanov@gmail.com

Анотація. У статті представлено програмно-апаратний комплекс для організації голосового зв'язку в умовах децентралізованої багатохолопової mesh-мережі, створений з використанням модулів Arduino Nano, ESP8266 та трансивера RFM95 на базі технології LoRa. Досліджено особливості функціонування mesh-топологій, зокрема чинники, що впливають на якість передавання голосу, такі як затримки, стабільність маршруту, кількість проміжних вузлів та рівень сигналу між ними. Проаналізовано сучасні рішення для децентралізованого

Запропоноване посилання: Тогоєв, О. Р., Пузирьов, С. В., Гаврилко, С. М. & Жуланов, М. О. (2025). Програмно-апаратний комплекс для організації голосового зв'язку в децентралізованих mesh-мережах. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 121-129. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-121-129

* Відповідальний автор



зв'язку й визначено їхні обмеження щодо забезпечення голосової комунікації в реальному часі, що підкреслює необхідність розробки спеціалізованої архітектури. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує маршрутизацію, обробку голосових пакетів, керування передачею даних і відображення топології через вебінтерфейс та MQTT. Створено прототипи вузлів і шлюзу, які забезпечують стабільну передачу даних у багатопопівній мережі. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність комплексу, прийнятні затримки, стійкість до змін топології та можливість підтримки голосового зв'язку на дистанціях до 200 метрів. Запропоноване рішення демонструє можливість побудови автономних систем голосової комунікації для умов обмеженої інфраструктури та може слугувати основою для подальшої оптимізації та масштабування mesh-мереж.

Ключові слова: mesh-мережа, протокол маршрутизації, периферійний інтерфейс, мікроконтролер, трансвер.

Вступ

У сучасних умовах нестабільності інфраструктури зростає потреба у децентралізованих системах зв'язку, здатних забезпечувати стійку передачу інформації без доступу до центральних вузлів. Традиційні технології голосового зв'язку (мобільні мережі, VoIP, радіостанції тощо) мають обмеження щодо покриття, енергоспоживання, надійності та залежності від централізованих систем керування.

Mesh-мережі здатні усунути ці недоліки за рахунок самоорганізації та самовідновлення, проте існуючі реалізації переважно оптимізовані до передачі даних, а не голосу в реальному часі [1].

Висока затримка, варіативність маршруту, залежність якості від кількості хопів і відсутність апаратно-програмних комплексів, спеціально адаптованих під голосовий трафік, створюють науково-практичну проблему, що потребує вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних публікаціях значна увага приділяється архітектурам бездротових mesh-мереж, протоколам маршрутизації (OLSR [1], AODV [2], DSR [3]), питанням самоорганізації та адаптації до змін топології. Дослідження зосереджуються на властивостях WMN (Wireless Mesh Network), енергоефективності, мультиканальності, надійності доставки та оптимізації маршрутів. Значний обсяг робіт присвячено використанню LoRa-технологій [4] і WiFi-модулів у малопотужних мережах [7], а також оцінюванню можливостей децентралізованих рішень [8], таких як OpenMesh,

goTenna Mesh, FireChat і Commotion Wireless.

Водночас аналіз джерел показує, що питання передачі голосового трафіку у WMN розкрито недостатньо: більшість моделей орієнтовані на пакетний трафік IoT-систем [9], а не на низьколатентні голосові потоки [10]. Відсутній комплексний підхід, що одночасно охоплює апаратну частину, мережеві протоколи та програмні алгоритми, що забезпечують стабільний голосовий зв'язок у динамічних багатохопових мережах.

Отже, існує достатня наукова база в сфері mesh-мереж [5], маршрутизації, балансування каналів і стабільності передачі даних, але бракує цілісних рішень, які адаптовані під голосовий трафік з урахуванням практичних обмежень (енергоефективність, простота вузлів, стабільність маршруту, latency).

Формулювання цілей статті

З огляду на виявлені проблеми та аналіз наукових публікацій, визначено такі завдання дослідження:

1. Дослідити особливості функціонування mesh-мереж, їх здатність підтримувати голосовий трафік, а також чинники, що впливають на якість голосу в умовах багатохопової маршрутизації.

2. Проаналізувати існуючі рішення для децентралізованого зв'язку та визначити їх обмеження щодо забезпечення голосової комунікації в реальному часі.

3. Обґрунтувати вибір апаратних модулів (ESP8266, RFM95, Arduino Nano) для побудови програмно-апаратного комплексу та сформулювати вимоги до його архітектури.

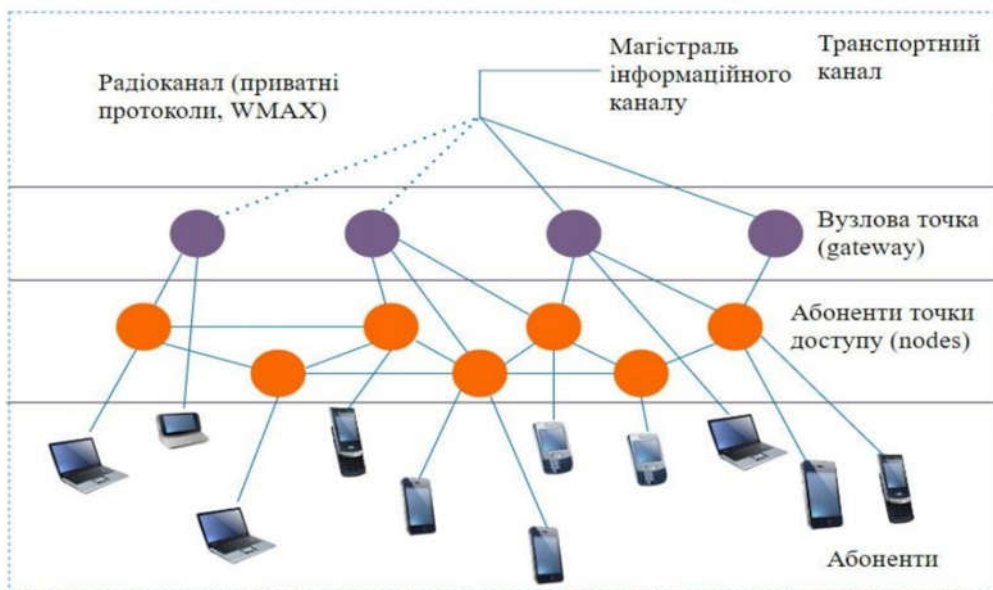


Рисунок 1 – Структурна схема типової Mesh-мережі

4. Розробити програмне забезпечення для керування маршрутизацією, обробкою голосових пакетів, зв'язком між вузлами та візуалізацією топології мережі.

5. Створити прототип вузлів mesh-мережі та мережевого шлюзу, що забезпечує передачу голосу.

6. Провести експериментальні дослідження роботи комплексу: визначити затримки, стабільність маршруту, якість голосу та стійкість мережі до змін топології.

7. Сформулювати рекомендації щодо оптимізації і масштабування розробленої системи.

Основний текст статті

Приклад типової Mesh-мережі наведено на рис. 1.

Функціонування децентралізованих бездротових mesh-мереж ґрунтується на здатності кожного вузла одночасно виконувати роль передавача, приймача та ретранслятора даних, що забезпечує багатохопову маршрутизацію та відмовостійкість топології. Аналіз особливостей такої архітектури свідчить, що підтримка голосового трафіку піднімає вимоги до стабільності маршруту, швидкості перебудови мережі та затримок. На якість голосової комунікації впливають такі чинники, як кількість проміжних хопів, рівень сигналу між вузлами, завантаження каналу, швидкість по-

вторного вибору маршруту та можливість локальної обробки пакетів. У мережах LoRa, які забезпечують значну дальність зв'язку, пропускна здатність є обмеженою, однак стабільність каналу та висока чутливість приймача компенсують ці недоліки в децентралізованих умовах.

У безперервному режимі прийому даних трансивер постійно шукає преамбулу та сигнали синхронізації, не зупиняючись (рис. 2). Цей режим використовується, коли потрібно постійно моніторити канал для отримання пакетів, наприклад, у випадку радіостанцій, які працюють у пожежній охороні або медичному обладнанні. У цьому режимі пакети приймаються без переривання, тому корисне навантаження потрібно витягувати з FIFO буфера засобами програми.

При цьому реєстри конфігурації не можна змінювати, поки трансивер знаходиться в цьому режимі, і переривання викликаються лише у випадку отримання пакету з правильним CRC. Цей режим потребує більшої кількості енергії, оскільки модем постійно перебуває в режимі прийому.

Порівняння з існуючими рішеннями демонструє, що поширені системи децентралізованого зв'язку орієнтовані переважно на передачу текстових або невеликих даних і не забезпечують необхідної якості роботи для голосових потоків у реальному

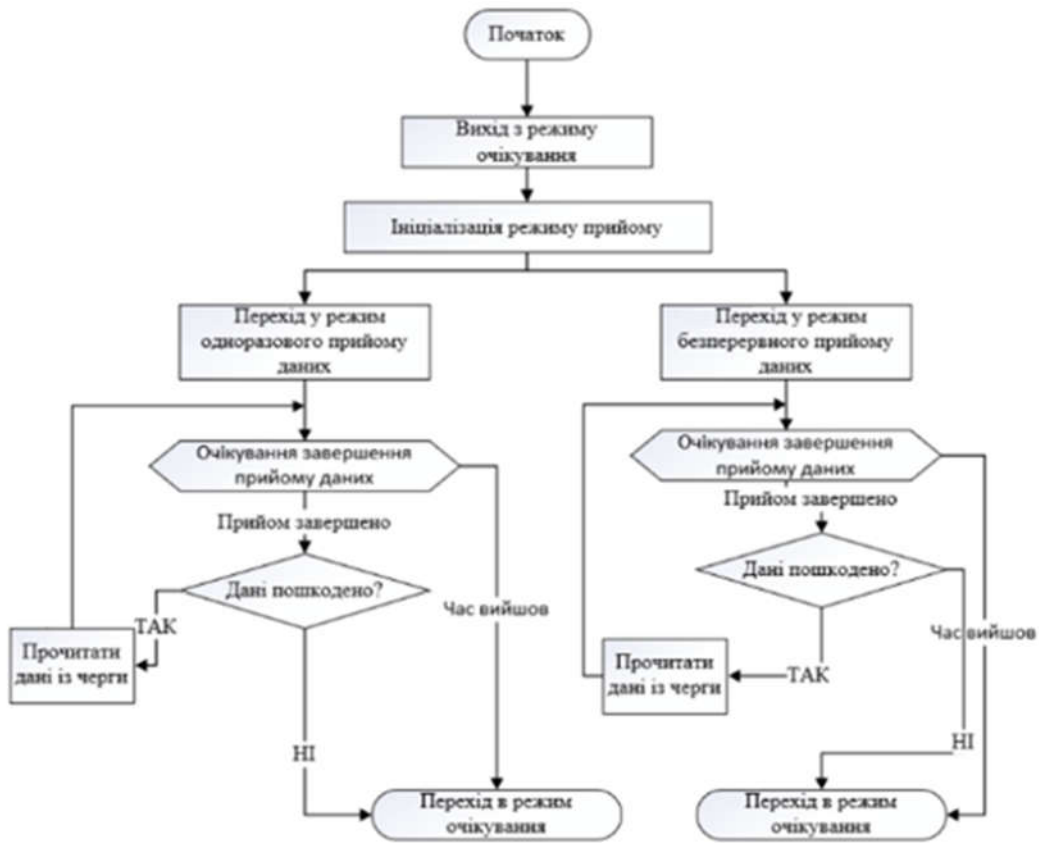


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму прийому пакету в LoRa

часі. Їх обмеження стосуються недостатньої пропускної здатності, нестабільності маршрутизації при збільшенні кількості вузлів, високих затримок, а також відсутності апаратних рішень, які б враховували специфіку голосових пакетів. Таким чином, виникає потреба у створенні комплексного рішення, яке б поєднувало переваги LoRa та Wi-Fi у межах однієї мережевої архітектури.

Обґрунтування вибору апаратних модулів є важливим етапом формування архітектури системи. Arduino Nano забезпечує низьке енергоспоживання й достатню продуктивність для обробки пакетів, роботи з периферією та керування LoRa-трансивером. Трансивер RFM95 вибраний завдяки високій чутливості, великому радіусу дії та можливості роботи в середовищах із перешкодами.

Для реалізації шлюзу використано модуль ESP8266, що підтримує Wi-Fi, має вбудовану файлову систему, може працювати як точка доступу та дозволяє організувати візуалізацію мережі через вебін-

терфейс. Така конфігурація забезпечує поєднання далекодії LoRa та ширших мережевих можливостей Wi-Fi.

Програмне забезпечення комплексу розроблено з урахуванням необхідності обробки голосових пакетів у режимі реального часу, підтримки маршрутизації та керування взаємодією між вузлами.

Реалізовано модулі для роботи з інтерфейсом SPI, драйвери трансивера RFM95, а також структури даних для маршрутизації та локального збереження параметрів у EEPROM. Модуль для ESP8266 включає файлову систему, вебсервер, MQTT-клієнт та механізми прийому і обробки мережевих команд. Завдяки наявності MQTT можлива централізована візуалізація топології та моніторинг роботи вузлів. Схема роботи програмно-апаратного комплексу зображена на рис. 3.

Для передачі даних за допомогою SPI-інтерфейсу до трансивера RFM95 спочатку потрібно налаштувати шину. У бібліотеці RadioHead доступна програмна емуляція SPI, що дозволяє підключати трансивер

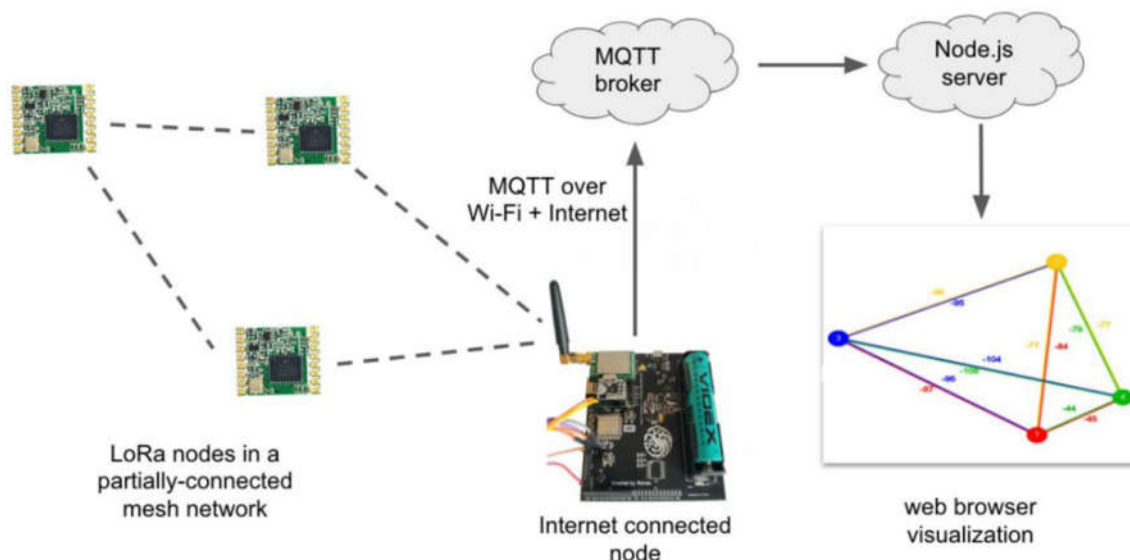


Рисунок 3 – Загальна схема роботи програмно-апаратного комплексу

до будь-якого з 14 цифрових портів вводу-виводу на платформі Arduino Nano крім RX та TX, які зайняті шиною UART (рис. 4).

```
// Ініціалізуємо трансивер та передаємо йому обрану частоту
if(rf95.init()) {
  Serial.println("RFM95W Module Init OK!");
} else {
  Serial.println("RFM95W Module Init Failed!");
}
rf95.setFrequency(915.0);

// Перевизначаємо пини для ліній DIO0 та SS
rf95.setPins(RFM95_CS, RFM95_INT);
```

Рисунок 4 – Ініціалізація трансивера

Також у трансивера є лінія DIO0, яку використовують для надсилання переривань мікроконтролеру. При отриманні переривання, мікроконтролер призупиняє виконання програми та обробляє його. Для переналаштування ліній DIO0 та SS, можна використати конструктор на початку програми.

На основі розробленого апаратного та програмного забезпечення створено прототип вузлів mesh-мережі та мережевого шлюзу. Вузлі забезпечують прийом і передачу LoRa-пакетів [6], визначають доступних сусідів і формують маршрути. Шлюз, у свою чергу, дозволяє інтегрувати мережу в локальне середовище Wi-Fi, вести журнал подій і відображати топологію в режимі реального часу.

У проєкті зі створенням мережі WMN платформа Arduino Nano використовується для передачі інформації про таблицю маршрутизації до шлюзу в форматі JSON-об'єктів. Для передачі цих даних використовується послідовний інтерфейс, який можна реалізувати з використанням бібліотеки SoftwareSerial. Ця бібліотека дозволяє створювати додаткові послідовні порти на цифрових входах-виходах Arduino Nano, що працюють на швидкості до 115'200 бод. Також в бібліотеці передбачено параметр, що дозволяє інвертувати сигнал для пристроїв, що працюють з інвертованим сигналом. Завдяки цій бібліотеці можна передавати дані від підключених пристроїв до шлюзу через послідовний інтерфейс, що є важливим елементом для успішної роботи мережі WMN.

Використання візуалізації в реальному часі дозволяє побачити формування та переконфігурування мережі та стан зв'язку між вузлами (рис. 5).

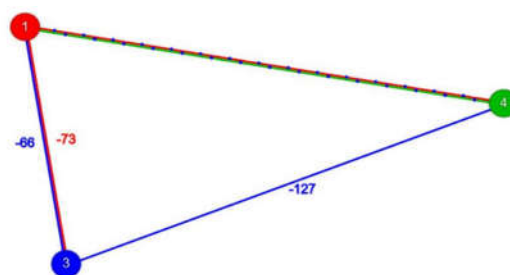


Рисунок 5 – Візуалізація Mesh-мережі з трьох вузлів

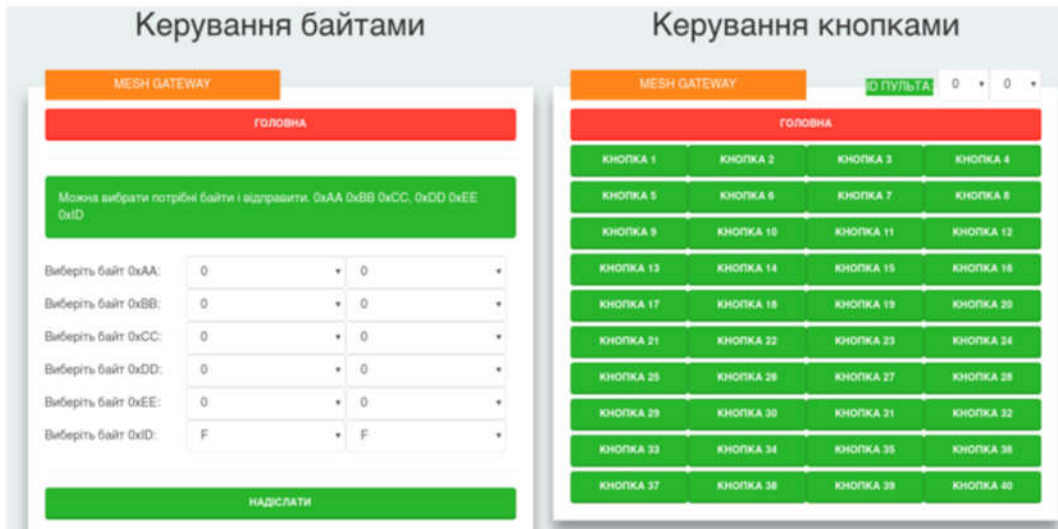


Рисунок 6 – Сторінки для віддаленого керування

Лінії між вузлами представлені як суцільні лінії, що означають прямий зв'язок, та лінії з точками, що означають непрямий зв'язок. Колір лінії відображає вузол, який здійснює маршрутизацію, а число вказує рівень сигналу між вузлами. Крім того, відстань між вузлами пропорційна силі сигналу. Сині точки на лініях вказують на непрямий зв'язок через інші вузли мережі.

Інтерфейс Mesh-модуля підтримує два способи керування: за допомогою восьми кнопок, що дозволяє вмикати лише одне навантаження, та «back end» та «front end» для мережевого шлюзу, який дозволяє передати будь-яку комбінацію. Крім того, можна призначити будь-який ідентифікатор для приймача, за замовчуванням це «back end» та «front end» для мережевого шлюзу з інтуїтивною комбінацією 0xFF. Використовуючи інтерактивний конструктор вебсторінок шлюзу, можна налаштувати свій спосіб взаємодії з мережею (рис. 6). Його можна відкрити комбінацією клавіш Ctrl+M.

JSON-об'єкт є форматом збереження вихідного коду сторінки. Змінюючи цей код, можна додавати або видаляти елементи сторінки.

Експериментальні дослідження підтвердили стабільність роботи мережі: зв'язок утримується на відстанях до 200 метрів, маршрути перебудовуються автономно, а передача даних залишається коректною навіть за зміни конфігурації

мережі. Затримки залишаються прийнятними для передачі голосових пакетів у середовищі LoRa за умови оптимізації розміру пакету та зменшення службового навантаження. Тестування показало стійкість мережі до появи й зникнення вузлів, що є ключовою властивістю для польових умов.

На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо подальшої оптимізації: застосування більш ефективних голосових кодеків із низькою затримкою, використання адаптивної маршрутизації з урахуванням якості каналу, впровадження методів пріоритетизації голосового трафіку, підвищення енергоефективності вузлів та розширення системи моніторингу для оцінки навантаження мережі. Існуюча архітектура дозволяє масштабувати мережу, розширювати функціонал і впроваджувати додаткові модулі без істотних змін у базовій конфігурації.

Висновки

Розроблений програмно-апаратний комплекс демонструє можливість створення децентралізованої системи зв'язку, здатної забезпечувати стабільну взаємодію між вузлами в умовах обмеженої інфраструктури. Використання модуля RFM95 на базі LoRa-технології дозволило сформувати малопотужну та відмовостійку мережу з розширеною зоною покриття, а застосування ESP8266 забезпечило універсальні засоби керування, доступ до зовнішніх ме-

реж і можливості інтерактивної взаємодії через MQTT та вебінтерфейс.

Комбінація апаратних і програмних рішень дала змогу реалізувати гнучку архітектуру, що підтримує динамічну маршрутизацію, моніторинг стану вузлів і адаптацію мережі до змін топології. Система демонструє стійку роботу, забезпечує коректне передавання даних і здатна слугувати основою для організації голосового зв'язку в автономних або мобільних мережах.

Отримані результати підтверджують доцільність використання децентралізованих mesh-мереж для голосових систем зв'язку та вказують на перспективи подальшого розвитку, зокрема вдосконалення алгоритмів маршрутизації, інтеграції спеціалізованих кодеків для стиснення голосових даних, підвищення енергоефективності й розширення засобів моніторингу та керування мережею. Система має потенціал для застосування в аварійних, польових та автономних комунікаційних рішеннях.

льшого розвитку, зокрема вдосконалення алгоритмів маршрутизації, інтеграції спеціалізованих кодеків для стиснення голосових даних, підвищення енергоефективності й розширення засобів моніторингу та керування мережею. Система має потенціал для застосування в аварійних, польових та автономних комунікаційних рішеннях.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Дакова Л. В., Даков С. Ю., Блаженний Н. В., Волошин В. О. Енергоефективний протокол маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. *Зв'язок*. 2024. № 2. С. 9–13. doi: [10.31673/2412-9070.2024.020913](https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.020913)
2. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Request for Comments: 3561. 2013. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (Last accessed: 02.05.2023).
3. Хажанець Ю., Білоус О. Класифікація протоколів маршрутизації mesh-мереж. *Повітряна міць України*. 2024. Т. 1, № 6. С. 56–62. doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62)
4. Mohammad Al mojamed. LTM-LoRaWAN: A multi-hop communication system for LoRaWAN. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 20. Article ID: 4225. 15 p. doi: [10.3390/electronics12204225](https://doi.org/10.3390/electronics12204225)
5. Thangadorai K. K., Sivalingam K. M., Pandey A., Murugesan K., Kanagarathinam M. R. WiLongH: A custom hand-held platform for long-range HaLow mesh networks in human-to-human communication. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2025. Corpus ID: 276770094. 23 p. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3547615](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3547615)
6. Voudouris K. N., Patiniotakis M., Perdikouris S., Agapiou G. S., Dimitriadou E., et. al. Mesh Wi-Fi networks: Architectures and experimental results. *Wireless Technologies for Ambient Living and Health care: Systems and Applications, IGI Global publication* : Proc. of the Conf. Chapter V. 2011. doi: [10.4018/978-1-61520-805-0.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-61520-805-0.ch005)
7. Гаєвський О., Гаєвська Г., Бодняк В., Коновалов М. Причини підвищення напруги у вузлі підключення ФЕС до розподільної мережі та інверторне регулювання напруги. *Відновлювана енергетика*. 2022. Т. 1, № 68. С. 27–36. doi: [10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)828](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)828)
8. Ramanathan R., Dugaev D., Tan L., Ramanathan W. Mesh Augmentation of LoRaWAN-based IoT Networks. *Computer Science > Networking and Internet Architecture*. 2025. doi: [10.48550/arXiv.2512.00161](https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.00161)
9. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. *Tobruk University Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 5. P. 1–7. doi: [10.64516/de33z795](https://doi.org/10.64516/de33z795)
10. Thakur R. Optimizing Real-Time Audio Filters for Low-Latency Voice Systems. *European Modern Studies Journal*. 2025. Vol. 9. P. 419–428. doi: [10.59573/emsj.9\(5\).2025.39](https://doi.org/10.59573/emsj.9(5).2025.39)

References

1. Dakova L., Dakov S., Blazhenyi N., Voloshyn V. Energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Connectivity*. 2024. Vol. 2. P. 9–13. doi: [10.31673/2412-9070.2024.020913](https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.020913) [in Ukrainian].
2. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Request for Comments: 3561. 2013. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (Last accessed: 02.05.2023).
3. Khazhanets Yu., Bilous O. Classification of routing protocols in mesh networks. *Air Power of Ukraine*. 2024. Vol. 1. No. 6. P. 56–62. doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62) [in Ukrainian].

4. Mohammad Al mojamed. LTM-LoRaWAN: A multi-hop communication system for LoRaWAN. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 20. Article ID: 4225. 15 p. doi: [10.3390/electronics12204225](https://doi.org/10.3390/electronics12204225)

5. Thangadorai K. K., Sivalingam K. M., Pandey A., Murugesan K., Kanagarathinam M. R. WiLongH: A custom hand-held platform for long-range HaLow mesh networks in human-to-human communication. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2025. Corpus ID: 276770094. 23 p. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3547615](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3547615)

6. Voudouris K. N., Patiniotakis M., Perdikouris S., Agapiou G. S., Dimitriadou E., et. al. Mesh Wi-Fi networks: Architectures and experimental results. *Wireless Technologies for Ambient Living and Health care: Systems and Applications, IGI Global publication* : Proc. of the Conf. Chapter V. 2011. doi: [10.4018/978-1-61520-805-0.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-61520-805-0.ch005)

7. Gaevskii O., Gaevska A., Bodnyak V., Konovalov M. Causes of voltage increase at the PV plant connection node to the distribution network and inverter voltage regulation. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 1. No. 68. P. 27–36. doi: [10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)828](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)828) [in Ukrainian].

8. Ramanathan R., Dugaev D., Tan L., Ramanathan W. Mesh Augmentation of LoRaWAN-based IoT Networks. *Computer Science > Networking and Internet Architecture*. 2025. doi: [10.48550/arXiv.2512.00161](https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.00161)

9. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. *Tobruk University Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 5. P. 1–7. doi: [10.64516/de33z795](https://doi.org/10.64516/de33z795)

10. Thakur R. Optimizing Real-Time Audio Filters for Low-Latency Voice Systems. *European Modern Studies Journal*. 2025. Vol. 9. P. 419–428. doi: [10.59573/emsj.9\(5\).2025.39](https://doi.org/10.59573/emsj.9(5).2025.39)

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR ORGANIZING VOICE COMMUNICATION IN DECENTRALIZED MESH NETWORKS

Tohoiev O. R.

PhD, Senior Lecturer
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>
e-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua

Puzyrov S. V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>
e-mail: svpuzyrev@gmail.com

Gavrylko S. M.

Candidate of Law, Senior Lecturer
King Danylo University
76018, Ivano-Frankivsk, Konovaltsa St., 35, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-7811-5982>
e-mail: serhii.m.havrylko@ukd.edu.ua

Zhulanov M. O.

Student
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-6302-111X>
e-mail: maxim.zhulanov@gmail.com

Abstract. This article introduces a software and hardware system designed for organizing voice communication within a decentralized, multi-hop mesh network. This system was developed using Arduino Nano and ESP8266 modules, as well as an RFM95 transceiver that operates based on LoRa technology. Mesh topology features are investigated, particularly the factors affecting voice transmission quality, such as delays, route stability, the number of intermediate nodes, and signal levels between them. Modern solutions for decentralized communication are analyzed, and their limitations in providing real-time voice communication are identified. This highlights the need for a specialized architecture. The software implements routing, voice packet processing, data transfer control, and topology display via a web interface and MQTT. Prototypes of nodes and a gateway have been created to ensure stable data transfer in a multi-hop network. Experimental studies have confirmed the operability of the system, acceptable latency, tolerance to topology changes, and the capacity to support voice communication at distances of up to 200 meters. The proposed solution shows that autonomous voice communication systems can be built in areas with limited infrastructure and could serve as a basis for further optimizing and scaling mesh networks.

Keywords: mesh network, routing protocol, peripheral interface, microcontroller, transceiver.



Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані комплекси

Прийнято 25.09.2025. Прорецензовано 21.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

UDC 681.5;358.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-130-139

STOCHASTIC AND INTELLIGENT MODELS IN DIAGNOSTIC AND CONTROL SYSTEMS OF ARTILLERY COMPLEXES

Kozlov O. V. *

Doctor of Technical Sciences, Professor
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68th Desantnykiv st.,10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>
e-mail:kozlov_ov@ukr.net

Maksymov O. M.

PhD, Associate Professor
Institute of Naval Forces of the National University "OMA"
65029, 8 Didrikhsona St., Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2504-0853>
e-mail: m.alex.m11@gmail.com

Riaboshapka R. M.

Postgraduate Student
Odesa Polytechnic National University
65044, Shevchenko av., 1, Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-2068-0290>
e-mail: ryaboshapka@meta.ua

Dobrynin Ye. V.

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Naval Forces of the National University "OMA"
65029, 8 Didrikhsona St., Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2777-3137>
e-mail: 20artuxa62@gmail.com

Запропоноване посилання: Kozlov, O. V., Maksymov, O. M., Riaboshapka, R. M. & Dobrynin, Ye. V. (2025). Stochastic and intelligent models in diagnostic and control systems of artillery complexes. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 130-139. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-130-139

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract. This paper explores the application of stochastic and intelligent modeling approaches for enhancing the diagnostic and adaptive control efficiency of modern artillery systems. Particular attention is devoted to stochastic models based on Markov chains, which enable the probabilistic representation of state transitions, system degradation, and uncertainties affecting artillery performance. In parallel, the study introduces a generalized fuzzy model capable of addressing critical challenges such as barrel wear diagnostics, sight correction under uncertain conditions, optimization of higher-level battery control by integrating environmental factors within the firing zone with per-gun operating parameters, and automatic aiming drive regulation through the integration of fuzzy reasoning with advanced control methodologies. The combined use of these approaches is shown to yield a synergistic effect, where the predictive rigor of Markov models complements the adaptive decision-making power of fuzzy logic. This integration offers a robust framework for increasing accuracy, reliability, survivability, and operational efficiency in dynamically changing combat environments. The results highlight the importance of hybrid modeling architectures in advancing next-generation artillery systems and outline future research directions aimed at real-time implementation, large-scale system integration, and experimental validation.

Keywords: artillery systems; diagnostics; automatic control; stochastic models; intelligent models; Markov chains; fuzzy logic.

Introduction

Modern military conflicts worldwide, and particularly the ongoing Russian–Ukrainian war, have vividly demonstrated the decisive role of artillery in contemporary warfare. Artillery remains one of the most effective means of delivering systematic, long-range fire damage to enemy positions, serving as a cornerstone for achieving tactical, operational, and, in some cases, even strategic objectives [1–3]. Its capacity for sustained firepower and wide-area coverage ensures its indispensability in shaping the battlefield environment.

The recent integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into reconnaissance and fire adjustment processes has significantly amplified the precision and effectiveness of artillery operations [4]. UAVs provide near-real-time intelligence and enable adaptive targeting, thereby increasing the lethality and efficiency of artillery fire. This synergy between traditional artillery systems and modern autonomous technologies marks a fundamental transformation in the way fire support missions are conducted.

Nevertheless, the intensive deployment of artillery under combat conditions has exposed a range of critical technical and operational challenges. Issues such as accelerated barrel wear, overheating of components, and the degradation of aiming accuracy have increasingly been reported [5, 6]. These factors not only undermine the reliability of

artillery systems but also reduce their combat readiness during prolonged engagements. In conditions where operational tempo is high and uninterrupted functionality is crucial, such vulnerabilities can critically affect mission success.

At the same time, the existing diagnostic and control methods employed for assessing the technical state of artillery installations remain inadequate. Many of these approaches are limited by their lack of timeliness, reliance on bulky auxiliary equipment, and susceptibility to measurement errors, all of which hinder accurate assessment of system condition [6]. Such limitations complicate preventive maintenance and timely decision-making, ultimately reducing the operational efficiency, shooting accuracy and resilience of artillery forces.

Against this backdrop, there arises a pressing scientific and practical need to develop advanced diagnostic and control methodologies that combine stochastic modeling and intelligent approaches. These innovations have the potential to ensure higher accuracy in fault detection, improve predictive maintenance, and enhance overall system robustness under combat stressors. By addressing the shortcomings of traditional techniques, such models can significantly contribute to strengthening the effectiveness and survivability of artillery complexes in modern warfare.

Analysis of modern foreign and domestic research and publications

Contemporary advances in artillery fire control and system reliability have been driven by the development of sophisticated computational methods and modern information technologies aimed at enhancing accuracy, responsiveness, and operational robustness. Precision trajectory prediction using advanced ballistic models now relies on specialized rapid-assessment algorithms that facilitate on-site estimation and forecasting of strike accuracy under variable field conditions [7, 8]. Concurrently, purpose-built software tools and geographic information systems have been widely adopted to generate firing tables and produce cartographic materials that support commanders and fire-control personnel in planning and executing missions with increased situational awareness [9–11].

A crucial avenue for improving both accuracy and survivability of artillery units lies in minimizing exposure time on firing positions and enabling in-service diagnostics of barrel wear and system degradation without withdrawing the cannon from operational use. Such improvements hinge on more effective verification of shot outcomes — namely, prompt confirmation of projectile impact or precise assessment of deviation from the aim point — which forms the basis for closed-loop correction of subsequent firings [12]. Implementations of this concept typically instantiate an information feedback contour linking successive shots, whereby initial firing parameters are adjusted iteratively and the condition of the firing system is continuously reassessed [13, 14]. Two canonical feedback paradigms are commonly distinguished: the “shoot-look-shoot” loop for visible targets and the “shoot-adjust-shoot” loop for concealed or indirect engagements; both approaches require accurate determination of burst coordinates, which complicates and lengthens verification procedures.

To address the limitations of traditional post-impact verification, recent work has proposed and experimentally validated methods for pre-impact shot verification that operate prior to projectile impact or detonation [15, 16]. These approaches exploit

the registration of ballistic and acoustic signatures generated by a projectile in flight, captured via networks of spatially distributed acoustic sensors. By analyzing the recorded waveforms, it becomes possible to estimate trajectory parameters in near real time, thereby substantially reducing engagement duration and ammunition expenditure when compensating for stochastic perturbations relative to conventional aiming procedures. Moreover, such techniques enable in-flight diagnosis of artillery system state, facilitating maintenance interventions and tactical adjustments without interrupting mission flow.

Despite these advances, significant challenges persist in adequately accounting for various sources of uncertainty that affect artillery complexes: propellant degradation and batch variability, deviations in projectile mass, and progressive multi-component wear of barrels and associated mechanical systems. These uncertainties propagate through diagnostic chains and control algorithms, undermining the reliability of existing assessment and decision-support methods and limiting their applicability in high-tempo operations. Consequently, purely deterministic models and rule-based procedures often fail to capture the full spectrum of stochastic behavior observed in operational environments.

Against this backdrop, stochastic modeling and intelligent computational paradigms emerge as promising frameworks for robust diagnostics and adaptive control. In particular, Markovian models offer a natural formalism for representing probabilistic transitions of system states under cumulative wear and random perturbations, providing tractable means for prognostics and maintenance scheduling [17]. Complementarily, intelligent models grounded in fuzzy logic enable the formalization and processing of expert knowledge under conditions of incomplete and imprecise information, allowing for linguistic rule-based reasoning and graceful handling of ambiguity in sensor data and human assessments [18].

In summary, the literature indicates a clear trajectory toward hybrid methodologies

that integrate rapid ballistic estimation, distributed sensing (including acoustic and RF modalities), and intelligent stochastic modeling to enhance verification, diagnostics, and closed-loop control of artillery systems. The confluence of these approaches motivates further research into novel methodologies, models, and information technologies that can reconcile probabilistic uncertainty with expert knowledge, thereby improving the effectiveness and resilience of diagnostic and control processes in modern artillery complexes.

The primary objective of this study is to conduct a comprehensive analysis of the specific features and prospective applications of stochastic models based on Markov chains and intelligent models founded on fuzzy logic for addressing the wide spectrum of uncertainties that affect artillery complexes. The research emphasizes the integration of these modeling approaches into diagnostic frameworks and adaptive control systems, with the overarching goal of enhancing the overall effectiveness, accuracy, survivability, and reliability of artillery systems operating under dynamic and uncertain conditions.

Main material

Markov chains in artillery diagnostic and control systems. Most studies of combat modeling have traditionally employed deterministic frameworks. For example, the works cited in [13, 19] propose models that describe the behaviour of artillery units using fixed, time-invariant parameters. While analytically tractable, such deterministic formulations neglect the inherently stochastic nature of many operational variables, producing simplified representations that can markedly reduce the realism and predictive fidelity of simulation results.

In contrast, stochastic approaches, particularly those founded on Markovian processes, offer a natural and powerful formalism for modeling systems whose parameters evolve randomly. Markov chains permit explicit representation of probable system states and the transition probabilities between them, thereby substantially increasing model adequacy when studying

diverse aspects of combat dynamics [15, 19, 20]. For instance, the model presented in [15] accounts for random variability in projectile velocity, reloading intervals, and the probability of enemy detection. These inclusions materially improve the model's capability to reproduce observed operational outcomes. Similarly, the study reported in [17] develops a stochastic framework for analyzing the random processes associated with repositioning towed artillery systems, including transit times to firing positions, loss of combat capability during movement, and the attendant risks of detection and enemy engagement in the route.

The main components of Markov processes are the states of the system, the transition probabilities between the states, and external disturbances that affect the effectiveness of combat work. Fig. 1 shows the Markov graph of states and transition probabilities when changing the firing positions of artillery installations.

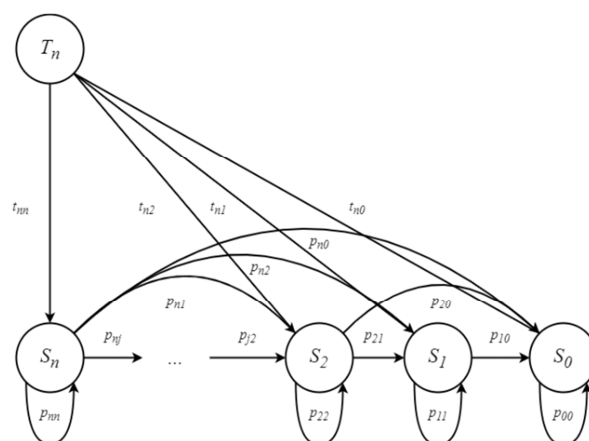


Figure 1 – Markov graph of states and transition probabilities taking into account the transportation of cannons

In Fig. 1, the following notations are introduced: T_n is the initial state of the system, which corresponds to the initial position of the battery, in a hidden position, before the start of the task, with n combat-ready installations; S_n is the state of the system during firing with n combat-ready installations.

The state transition matrix, which describes the probabilities of transitions between different states of the system (Fig. 1), is presented in the form:

$$P = \begin{pmatrix} t_{tt} & t_{tm} & \dots & t_{tn2} & t_{tn1} & t_{tn0} \\ t_{nt} & p_{nn} & \dots & p_{n2} & p_{n1} & p_{n0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{2t} & 0 & \dots & p_{22} & p_{21} & p_{20} \\ t_{1t} & 0 & \dots & 0 & p_{11} & p_{10} \\ t_{0t} & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where t_{nj} is the probability of transition from state T_n to state S_j (logistics operations); p_{ij} is the probability of transition from state S_i to state S_j (combat operations); t_{jt} is the probability of transition from state S_j to state T_n . Since the battery cannot return to its initial position ($t_{jt} = 0$), after completing combat work, it always takes a new position.

In turn, the transition probabilities for $i = 1, \dots, n$ are determined as follows:

$$p_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^n p_{ij}; \quad (2)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} C_i^j p^j q^{i-j}, & \text{if } j \leq i; \\ 0, & \text{if } j > i, \end{cases} \quad (3)$$

where p^j is the probability of an effective shot and successful transportation.

Moreover,

$$p^j = p(1-s), \quad (4)$$

where s is the probability of the battery being hit by the fire of the enemy.

In turn, the probability p consists of:

$$p = p_1 p_2 p_3, \quad (5)$$

where p_1 is the probability of a shot with no disturbance in the form of chamber wear; p_2 is the probability of a shot with no disturbance in the form of barrel wear; p_3 is the probability of a shot with no disturbance in the form of charge uncertainty.

The probability of the influence of the corresponding disturbance can be represented as follows:

$$q_1 = 1 - p_1; \quad (6)$$

$$q_2 = 1 - p_2; \quad (7)$$

$$q_3 = 1 - p_3; \quad (8)$$

$$t_{nn} = 1 - \sum_{j=1}^n t_{nj}; \quad (9)$$

$$t_{nj} = C_i^j t^j f, \quad (10)$$

where t^j is the possibility of preserving the effective usage of artillery after the transportation process.

In turn,

$$t^j = k_1 k_2 k_3; \quad (11)$$

$$f = 1 - t^j, \quad (12)$$

where k_1 is the probability of barrel wear during transportation, k_2 is the probability of chassis wear during transportation, and k_3 is the probability of the installation losing its combat capability under enemy fire during transportation.

Herewith,

$$k_i = 1 - e^{-q_i t}, \quad (13)$$

where t is the time required to cover the route, q_i is the coefficient of influence of the i -th factor per unit of time during transportation along the selected route.

In general, this example illustrates how Markovian and related stochastic models enable more nuanced, probabilistically grounded analyses that better reflect the uncertainties inherent to modern artillery operations.

Intelligent models based on fuzzy logic in artillery diagnostic and control systems. Intelligent models founded on fuzzy logic offer a promising avenue for enhancing the autonomy and resilience of artillery systems by providing a mathematically tractable means to encode and process imprecise expert knowledge and noisy sensor information; their graded membership functions and rule-based inference enable graceful handling of ambiguous states (e.g., partial barrel degradation, variable propellant performance, or degraded visibility) that defy crisp thresholding. In practice, fuzzy controllers and decision-support modules can be applied to adaptive fire-control tuning, progressive shot-to-shot correction, target prioritization under incomplete information, and in-situ fault diagnosis, while preserving interpretability, an essential property for

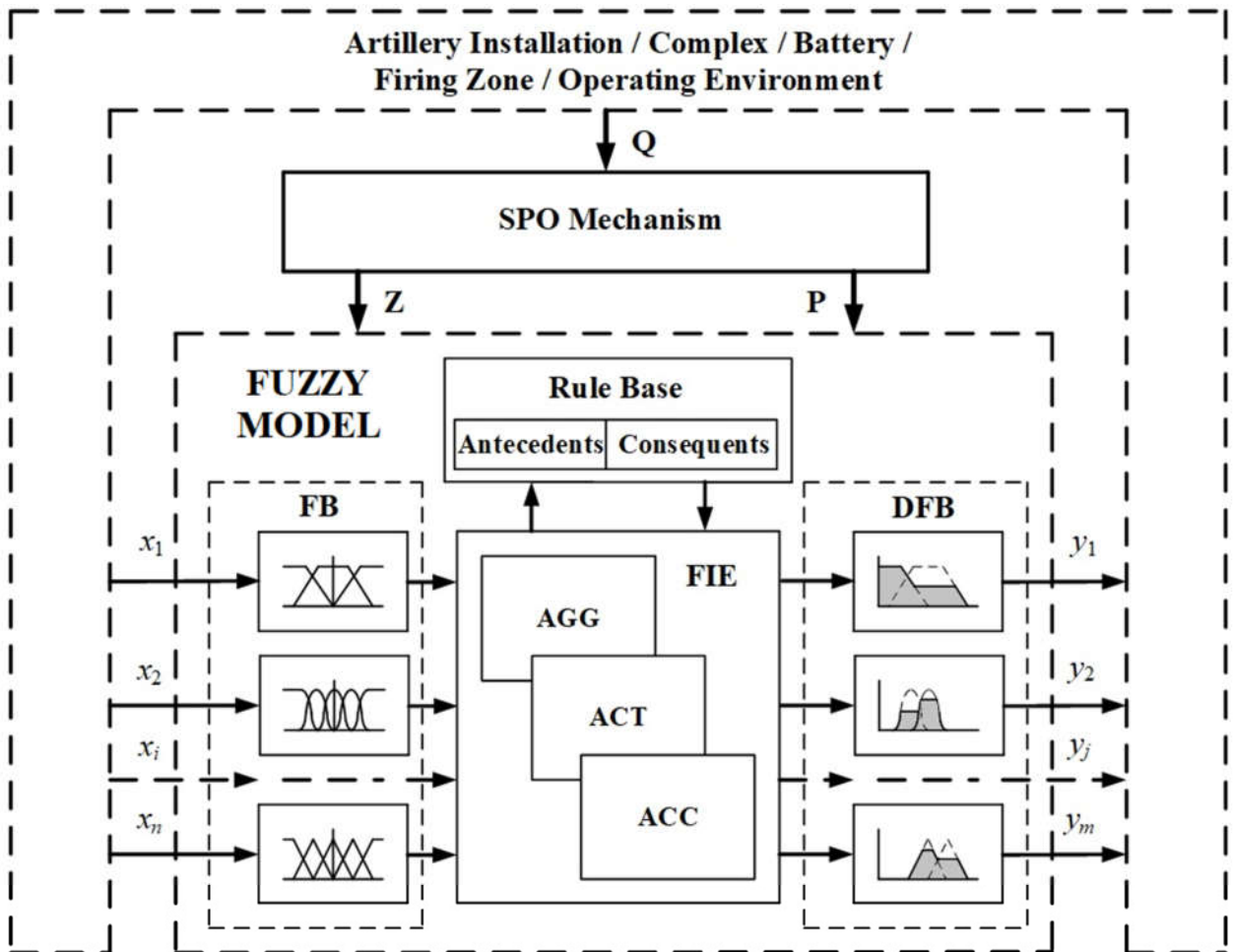


Figure 2 – Generalized fuzzy model for diagnostics and control of artillery systems

operator trust and human-machine teaming. Hybridizing fuzzy architectures with data-driven techniques (such as online learning, evolutionary optimization of membership parameters, or integration with Markovian prognostics) allows these systems to refine rules and adapt to evolving wear patterns and environmental conditions, supporting predictive maintenance and improved mission endurance. Furthermore, when embedded in multi-sensor fusion frameworks, fuzzy models facilitate the assimilation of heterogeneous signals (acoustic, RF, inertial, thermal) into compact, actionable assessments of system state and engagement quality. Realizing these prospects requires rigorous methods for systematic rule elicitation, robust parameter tuning, computationally efficient implementations for real-time operation, and extensive validation with field data; nonetheless, the combination of robustness to uncertainty, adaptability, and explainability positions

fuzzy-based intelligent models as a strategically valuable component of next-generation artillery diagnostic and control systems.

The functional structure of the generalized fuzzy model for implementation of diagnostics and control processes of artillery systems is shown in Fig. 2, where the following abbreviations are used: SPO Mechanism is the mechanism of structural-parametric optimization; FB is the fuzzification block; FIE is the fuzzy inference engine; AGG is the aggregation block; ACT is the activation block; ACC is the accumulation block; DFB is the defuzzification block; $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ are the fuzzy model's input variables; $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ are the fuzzy model's output variables; \mathbf{S} is the vector of structure variants of the fuzzy model; \mathbf{P} is the vector of parameters of the fuzzy model; \mathbf{Q} is the vector of output variables of the artillery installation, complex, battery, firing zone, or operational environment, that are used for

structural-parametric optimization of the fuzzy model.

The presented generalized fuzzy model implements the following dependence [21]

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= f_{FS}(\mathbf{X}), \\ \mathbf{Y} &= (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m), \\ \mathbf{X} &= (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (14)$$

where \mathbf{X} is the vector of n input variables $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$; \mathbf{Y} is the vector of m output variables $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ of the fuzzy model.

The FB defines the degree of membership of the numerical values of all n input variables of the vector \mathbf{X} to the corresponding fuzzy input linguistic terms of the model [21]. The FIE, in turn, based on fuzzified signals and received data from the rule base sequentially performs the operations of aggregation, activation, and accumulation [22].

The rule base includes a set of rules made up of specific antecedents and consequents. So, for example, to implement functional dependence (14) by the fuzzy model, using the corresponding linguistic terms, one of the rules for any variable x_i ($i = 1 \dots n$) or y_j ($j = 1 \dots m$), can be represented by (15) [21]

$$\begin{aligned} &\text{IF } "x_1 = A_1" \text{ AND } "x_2 = A_2" \text{ AND } \dots \\ &\text{AND } "x_i = A_i" \dots \text{AND} \dots \text{AND } "x_n = A_n" \\ &\text{THEN } "y_1 = B_1" \text{ AND } "y_2 = B_2" \text{ AND } \dots \\ &\text{AND } "y_j = B_j" \dots \text{AND} \dots \text{AND } "y_m = B_m", \end{aligned} \quad (15)$$

where $A_1, A_2, A_i, A_n, B_1, B_2, B_j, B_m$ are the corresponding linguistic terms of the input and output variables of the model.

The DFB converts the consolidated fuzzy inference into a clear numerical signal for each j -th ($j = 1, 2, \dots, m$) output variable [22].

Moreover, the presented fuzzy model can be developed in the automated mode using the built-in mechanism of structural-parametric optimization (SPO). Herewith, the given mechanism should determine such vectors of structure options \mathbf{S} and parameters \mathbf{P} , which will ensure sufficiently effective use of the model for solving the stated problem (diagnostics, correction, or automatic control). At the same time, the efficiency of the fuzzy model can be assessed using a specified objective function, which is calculated based

on the obtained values of the vector of measured output variables of the artillery complex, outlined firing zone, or the operating environment \mathbf{Q} [21].

The presented intelligent model based on fuzzy logic is most appropriate for solving the following complicated problems of modern artillery systems:

1) robust diagnostics of barrel wear for individual cannons by fusing heterogeneous modalities (visual inspection data, acoustic emissions recorded during firing, and measured muzzle velocities);

2) sight correction and ballistic compensation by explicitly accounting for stochastic perturbations (deviations in projectile mass, progressive degradation of propellant charges, and component wear);

3) higher-level battery control, integrating environmental factors within the firing zone (e.g., wind, temperature, terrain-induced disturbances) with per-gun operating parameters to optimize task allocation, sequencing of fire, and survivability measures for grouped artillery assets;

4) automatic control of the aiming drives of individual guns by hybridizing fuzzy inference with advanced control paradigms (adaptive, predictive, sliding-mode, combined, etc.) that can provide smooth, interpretable control actions, resilient to measurement noise and model uncertainty.

Joint application of Markov chains and fuzzy models in artillery systems. The integrated application of Markovian stochastic models and fuzzy-logic-based intelligent systems creates a synergistic paradigm that substantially elevates the diagnostic, prognostic, and control capabilities of modern artillery complexes. Markov chains supply a rigorous probabilistic scaffold for representing state transitions, cumulative wear processes and uncertainty propagation over time, thereby enabling quantitative prognostics, risk-aware maintenance scheduling, and formally grounded assessments of system reliability under random perturbations.

Complementarily, fuzzy models excel at encoding imprecise expert knowledge, assimilating noisy multisensor inputs and producing interpretable, rule-based control and decision recommendations in real time.

When combined, these formalisms bridge the gap between probabilistic prognostics, and linguistically driven operational reasoning: stochastic estimators can inform and update fuzzy membership functions and rule weights with posterior likelihoods, while fuzzy inference can translate probabilistic state assessments into actionable, human-comprehensible control directives and maintenance advisories.

The hybrid architecture thus yields robust, adaptive behavior, improving shot-to-shot correction, optimizing resource allocation across batteries, and enabling anticipatory interventions that reduce downtime and enhance survivability. Beyond performance gains, the approach preserves transparency and operator trust through explainable rules, while affording formal metrics of uncertainty from the Markovian layer for decision assurance. Realising this synergistic potential demands careful model integration, efficient real-time algorithms, and comprehensive validation with field data, but promises a decisive step toward resilient, intelligent artillery systems capable of operating effectively in the stochastic and ambiguous conditions of contemporary battlefields.

Conclusions

1. The comprehensive analysis of the distinctive features and prospective applications of stochastic models based on Markov chains and intelligent models founded on fuzzy logic for addressing the broad spectrum of uncertainties inherent in artillery complexes was carried out. The findings underscore the necessity of integrating these modeling paradigms into diagnostic frameworks and adaptive control systems, with the overarching aim of increasing operational effectiveness, improving firing accuracy, extending system survivability, and ensuring higher reliability under dynamically changing and uncertain battlefield conditions.

2. Special attention was devoted to the application potential of Markov processes, which serve as a robust mathematical tool for modeling probabilistic state transitions, system degradation, and stochastic disturbances. Their use enables quantitative assessments of artillery system reliability,

prediction of long-term performance trends, and the development of effective maintenance and control strategies. By capturing the inherent randomness of operational parameters, Markov models significantly enhance the realism and adequacy of artillery simulations.

3. A generalized fuzzy model was introduced as an intelligent framework for artillery systems, with particular emphasis on its ability to address complex diagnostic and control challenges. This model demonstrates promise in diagnosing barrel wear, correcting gun sights under multiple uncertainty factors, optimizing higher-level battery control, integrating environmental factors within the firing zone with per-gun operating parameters to optimize task allocation, sequencing of fire, and survivability measures for grouped artillery assets, and enabling automatic aiming drive control through the integration of fuzzy reasoning with advanced control methodologies. These capabilities highlight the wide-ranging adaptability and practicality of fuzzy models in real-world artillery applications.

4. The paper further presented an integrative approach that leverages the complementary strengths of Markov chains and fuzzy models, yielding a pronounced synergistic effect. While stochastic models provide probabilistic rigor and predictive accuracy, fuzzy logic systems offer interpretability, adaptability, and resilience to imprecise data. Their combined use creates a hybrid diagnostic and control paradigm that unites probabilistic foresight with intelligent decision-making, thereby enabling artillery complexes to function more effectively in the face of uncertainty, operational noise, and environmental complexity.

5. Future research should focus on refining hybrid Markov–fuzzy architectures through advanced algorithmic integration, efficient real-time computation, and comprehensive experimental validation using both simulated and field data. Particular emphasis should be placed on extending these models to networked artillery systems, multi-agent coordination, and cyber-physical defense platforms, where the interplay of stochastic uncertainties and intelligent control

demands novel methodological solutions. Such efforts will not only advance theoretical knowledge but also provide practical tools for the development of next-generation artillery systems capable of maintaining superiority in increasingly complex operational environments.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

Список використаних джерел / References

1. Świętochowski N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023. Part I. Combat potential, tasks and tactics. *SJMULF*. 2023. Vol. 210(4) P. 341-358. doi: [10.5604/01.3001.0054.1631](https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1631)
2. Świętochowski, N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023. Part II. Methods of task implementation. *SJMULF*. 2024. Vol. 211(1). P. 57-76. doi: [10.5604/01.3001.0054.4136](https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4136)
3. Demydenko V. E., Maksymov M. V., Boltenkov V. O. Combat operations model of a single self-propelled artillery system for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 207–218. doi: [10.15276/aaIT.07.2024.14](https://doi.org/10.15276/aaIT.07.2024.14)
4. Bartulović V., Trzun Z., Hoić M. Use of Unmanned Aerial Vehicles in Support of Artillery Operations. *Strategos*. 2023. Vol. 7 (1). P. 71–92. doi: [10.1007/s00371-023-02940-9](https://doi.org/10.1007/s00371-023-02940-9)
5. Oprean L.G. Artillery and Drone Action Issues in the War in Ukraine. *Scientific Bulletin*. 2023. Vol. 28(1). P. 73-78. doi: [10.2478/bsaft-2023-0008](https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008)
6. Dobrynin Y., Maksymov M., Boltenkov V. Development of a method for determining the wear of artillery barrels by acoustic fields of shots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(5 (105)). P. 6–18. doi: [10.15587/1729-4061.2020.206114](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206114)
7. Khalil M. Study on modeling and production inaccuracies for artillery firing. *Archive of mechanical engineering*. 2022. Vol. 69. No. 1. P. 165–183. URL: https://journals.pan.pl/Content/121939/PDF/AME_2022_139802_2.pdf
8. Petlyuk I., Shchavinsky Y. Use of simulation modeling systems for determination of appropriate characteristics of prospective artillery weapons. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2021. No.14, P. 11-22. doi: [10.37129/2313-7509.2020.14.1.11-22](https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.11-22)
9. Mady M., Khalil M., Yehia M. Modelling and production of artillery firing-tables: case-study. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1507 (8). P. 082043. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1507/8/082043/meta>
10. Sun Y., Zhang S., Lu G., Zhao J., Tian J., Xue J. Research on a Simulation Algorithm for Artillery Firepower Assignment According to Region. *3rd International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT)*, Shanghai, China. 2022. P. 353-356. doi: [10.1109/ICCSMT58129.2022.00082](https://doi.org/10.1109/ICCSMT58129.2022.00082)
11. Maneva N.S., Achkoskib J.Z., Petreskic D.T., Gocić M.L., Rančić D.D. Smart field artillery information system: model development with an emphasis on collisions in single sign-on authentication. *Military Technical Courier*. 2017. Vol. 65. Iss. 2. P. 442-463. doi: <https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84691702442M>
12. Krzyzanowski S. How to assess the accuracy of artillery fire. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2018. Vol. 50. No. 1 (187). P. 25-39. doi: [10.5604/01.3001.0011.7355](https://doi.org/10.5604/01.3001.0011.7355)

СТОХАСТИЧНІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОДЕЛІ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ТА КЕРУВАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Козлов О. В.

Доктор технічних наук, професор
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>
e-mail: kozlov_ov@ukr.net

Максимов О. М.

Доктор філософії, доцент
Інститут Військово-морських сил Національного університету «Одеська морська академія»
65029, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2504-0853>
e-mail: m.alex.m11@gmail.com

Рябошарка Р. М.

Аспірант
Національний університет "Одеська політехніка"
65044, проспект Шевченко, 1, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-2068-0290>
e-mail: ryabosharka@meta.ua

Добринін Є. В.

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут Військово-морських сил Національного університету «Одеська морська академія»
65029, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2777-3137>
e-mail: 20artuxa62@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто застосування стохастичних та інтелектуальних моделей для підвищення ефективності систем діагностики та адаптивного керування сучасними артилерійськими комплексами. Особлива увага приділена стохастичним моделям на основі ланцюгів Маркова, які забезпечують імовірнісне відображення переходів між станами, деградації системи та невизначеностей, що впливають на ефективність функціонування артилерії. Паралельно представлено узагальнену нечітку модель, здатну вирішувати такі ключові завдання, як діагностику зношення стволів, корекцію прицілу в умовах невизначеностей, оптимізацію управління батареєю з урахуванням факторів середовища у зоні ведення вогню та параметрів окремих гармат, а також автоматичне керування приводами наведення шляхом інтеграції нечіткого виведення з сучасними принципами керування. Показано, що поєднане використання цих підходів створює синергетичний ефект, коли прогностична строгість марківських моделей доповнюється адаптивними можливостями прийняття рішень на основі нечіткої логіки. Така інтеграція формує надійну основу для підвищення точності, надійності, живучості та ефективності артилерійських систем в динамічних умовах бойових дій. Отримані результати підкреслюють важливість гібридних моделей у розвитку артилерійських комплексів нового покоління та визначають перспективні напрями подальших досліджень, зокрема їхню реалізацію в режимі реального часу, масштабну системну інтеграцію та експериментальну верифікацію.

Ключові слова: артилерійські системи; діагностика; автоматичне керування; стохастичні моделі; інтелектуальні моделі; ланцюги Маркова; нечітка логіка.



Прийнято 13.05.2025. Прорецензовано 19.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-140-147

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА З ІНТЕГРАЦІЄЮ У SCADA

Лагойда А. І. *

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0862-7786>

e-mail: andrii.lahoida@nung.edu.ua

Лагойда Л. І.

Асистент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-2328-8276>

e-mail: liudmyla.lahoida@nung.edu.ua

Чигур І. І.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0023-3328>

e-mail: ihor.chyhur@nung.edu.ua

Чигур Л. Я.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5653-9246>

e-mail: liudmyla.chyhur@nung.edu.ua

Анотація. Основною проблемою для систем керування багатьох сучасних процесів є обмеження у зборі даних безпосередньо на об'єктах експлуатації, а також затримки, що виникають під час ухвалення рішень в умовах надзвичайних ситуацій. Ці обмеження можуть призвести до зниження

Запропоноване посилання: Лагойда, А. І., Лагойда, Л. І., Чигур, І. І. & Чигур, Л. Я. (2025). Інтелектуальна система збору та обробки даних на базі мікроконтролера з інтеграцією у SCADA. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 140-147. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-140-147

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ефективності роботи системи, зменшення терміну її служби або, навіть, виходу з ладу. Раніше подібні проблеми частково вирішувалися шляхом впровадження систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які забезпечують централізований моніторинг і управління розподіленими об'єктами. Проте в контексті розроблюваного об'єкта цього підходу недостатньо через специфіку об'єкта керування, який потребує точної та миттєвої обробки інформації з різних сенсорів, зокрема напруги, струму й температури. У зв'язку з цим дослідження фокусується на розробці та впровадженні методики, що передбачає інтеграцію сенсорів у SCADA-систему для підвищення рівня контролю, безпеки та оптимізації роботи. Такий підхід має особливу актуальність для сфер електромобільного транспорту, автономних енергетичних систем та інших галузей, де використовуються літійові акумулятори з високими вимогами до надійності. Метод реалізації системи передбачає використання мікроконтролера Arduino для зчитування даних з сенсорів напруги, струму та температури. Ці дані передаються до бази даних MySQL, звідки відображаються в середовищі SCADA-системи InTouch for System Platform, яка виконує функції візуалізації та моніторингу. Такий підхід дозволяє створити ефективну архітектуру для реального часу, у якій можливо миттєво реагувати на зміни параметрів батареї. Базу даних спроектовано для накопичення та аналізу інформації про критичні параметри системи, зокрема напругу, струм, температуру та рівень заряду, що забезпечує комплексний підхід до діагностики та прогнозування стану енергосистеми.

Ключові слова: SCADA, InTouch, MySQL, Arduino, сенсори, моніторинг, керування.

Вступ

У сучасних умовах автоматизації виробничих та енергетичних систем важливу роль відіграє оперативний моніторинг і контроль параметрів технологічного процесу. Зростаюча потреба у надійності та швидкості реагування зумовлює застосування інтегрованих рішень на основі мікроконтролерів і SCADA-систем. Одним із перспективних напрямів є розробка мікроконтролерних систем з можливістю віддаленого керування та збору даних у реальному часі, що дозволяє мінімізувати людський фактор і покращити якість прийняття рішень.

Мета роботи – розробити спеціалізовану SCADA-систему, яка використовуватиме сенсори для збору таких даних, як напруга, струм і температура. Ці дані будуть зчитуватися через Arduino і зберігатися в базі даних MySQL [5]. Користувач зможе здійснювати моніторинг і контроль через інтерфейс НМІ за допомогою програмного забезпечення InTouch for System Platform [6].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Проблема в системах моніторингу та управління є поширеною у різних сферах і полягає в обмеженій кількості інформації, яка збирається про стан обладнання, а та-

кож у затримках прийняття рішень, коли виникають проблеми чи збої систем [1].

Операторам часто доводиться вручну збирати дані та надсилати їх до центрального вузла, що не лише потребує багато часу, але й створює ризик затримки у реагуванні на надзвичайні ситуації [2].

Поширеним рішенням є впровадження SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition), яка дозволяє централізовано інтегрувати всі дані з розподіленого обладнання та забезпечити до них доступ у режимі реального часу [3].

Однак, для деяких проєктів виникає необхідність поєднання вимірювань від різних сенсорів, зокрема напруги, струму й температури, для більш ефективного керування батареєю [4].

Теоретична база роботи

Розробка системи (рис. 1) здійснювалася в два етапи, у яких перший етап базується на проєктуванні автоматизованої системи, що включала вибір сенсорів і їх підключення до Arduino для отримання необхідних даних, а другий етап полягав у збереженні даних, отриманих від Arduino, в базу даних MySQL і виведенні їх через інтерфейс НМІ в InTouch.

Перший етап полягає в розробці системи управління батареєю для 3 літійово-іонних осередків з характеристиками 3.7 вольт та 2200 мАг. При дослідженнях використано

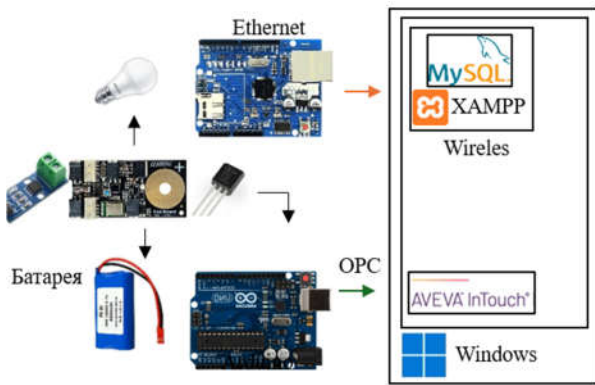


Рисунок 1 – Схема проекту

мікроконтролер Arduino Mega2560, який має досить велику кількість пінів вводу/виводу. Для вимірювання струму використовуватиметься сенсор ACS712-30, який здатний виявляти струм до 30 амперів, а для вимірювання температури – сенсор LM35. На рисунку 2 зображена структурна схема розробленої системи управління.

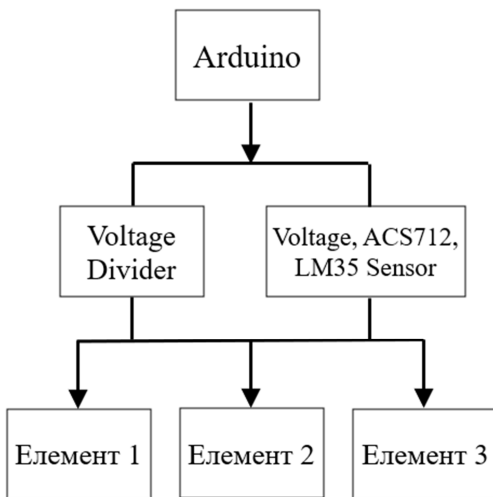


Рисунок 2 – Структурна схема розробленої системи управління

Arduino виступає як контролер для всіх підключених сенсорів, таких як ACS712-30 і LM35, для виявлення струму та температури. Для вимірювання напруги використовуватиметься схема cellboard. Cellboard складається з ланцюга подільника напруги (voltage divider), оскільки напруга, яка подається на Arduino, повинна бути в межах від 0 до 5 В. Використовуються три літєво-іонні батареї з мінімальною напругою 3.7 В і максимальною 4.2 В, які підключаються послідовно, утворюючи загальну напругу 12.6 В. Ця напруга необхідна для

живлення LED-лампи, до якої підключено сенсор струму ACS712-30 для виявлення протікання струму в разі підключення навантаження. Сенсор LM35 необхідний для вимірювання температури навколишнього середовища, щоб забезпечити оптимальний стан батареї.

Cellboard являє собою електронну плату, яка призначена для моніторингу та управління елементами батареї в акумуляторному блоці. Вона включає в себе датчики температури, напруги та мікроконтролер, що дозволяє користувачеві моніторити стан кожного елемента батареї та точно визначати процес заряджання та розряджання. Використовуючи cellboard можна оптимізувати продуктивність і термін служби батареї, а також забезпечити її безпеку під час експлуатації. Cellboard часто використовується в електричних транспортних засобах, системах зберігання енергії та медичних пристроях. У розроблюваному проекті cellboard використовує ланцюг подільника напруги на кожному осередку батареї [11]. Мінімальна напруга батареї становить 3.7 В, а максимальна – 4.2 В.

LM35 – це аналоговий датчик температури, розроблений для вимірювання температури в діапазоні від -55 градусів Цельсія до 150 градусів Цельсія. Важливими його характеристиками є висока точність і температурна стабільність, а також лінійний вихід при зміні температури. Він має 3 контакти: VCC підключається до Arduino з напругою 5 Вольт; вихідна напруга, яка буде зчитана на Arduino та підключена до Arduino на аналоговому вході; земля, яка буде підключена до контакту GND на Arduino.

Датчик LM35 використовується у сферах, які вимагають точного та стабільного вимірювання температури, таких як системи кондиціонування повітря та опалення, контролю температури в харчовій промисловості та промисловості напоїв, а також у вимірюванні температури в транспортних засобах і промислового обладнанні. Завдяки невеликому розміру та легкому використанню він також використовується в багатьох проектах DIY та експериментах з електронікою.

ACS712 є датчиком постійного струму, який призначений для вимірювання електричного струму в діапазоні від 5 А до 30 А. Важливими його характеристиками є висока точність вимірювання, гальванічна розв'язка, яка дозволяє безпечно вимірювати струм без необхідності від'єднання кабелю, вихідна напруга лінійна з вимірним струмом. Його вихід виражається у вигляді аналогової напруги, причому діапазон вихідної напруги пропорційний вимірюваному струму. Датчик ACS712 застосовується у багатьох проєктах, які вимагають точного вимірювання електричного струму, наприклад, у системах заряджання акумуляторів, керування двигуном і вимірювання потужності, а також у системах виробництва сонячної та вітрової енергії. Завдяки невеликому розміру та простоті використання він також часто використовується в проєктах DIY та експериментах з електронікою для моніторингу електричного струму в електронних схемах. Структура майже така ж, як у датчика температури LM35, складається з 3 контактів, а саме: VCC, аналогового входу та землі. Датчик ACS712-30 підключається між мінусовим кабелем навантаження, як показано на рисунку 3.

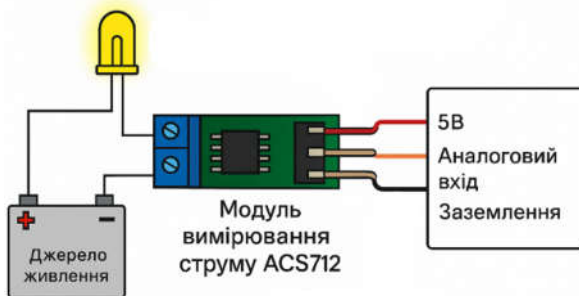


Рисунок 3 – Структура датчика ACS712

Отримані від батареї дані мають бути зчитані контролером, а також будуть зберігатися в базі даних MySQL через додаток XAMPP і відобразитися в InTouch.

У випадку комунікації між Arduino і базою даних виділяють кілька етапів: зв'язок між акумуляторним блоком і Arduino для отримання вимірювань напруги, струму та температури; передача даних від Arduino до HMI (InTouch) через OPC по послідовному кабелю; передача даних від Arduino до бази MySQL через Ethernet.

У проєкті використано дві плати Arduino:

- Arduino Mega 2560 із Ethernet Shield надсилає дані (напруга, струм, температура) до бази MySQL через маршрутизатор, який є терміналом для Mega 2560 і ноутбука. Mega 2560 підключено кабелем Ethernet до роутера, а ноутбук – по бездротовій мережі.

- Arduino Uno відображає дані стану батареї у InTouch через OPC-сервер, але не зберігає їх у базі.

Існує два типи комунікації Arduino (рис. 4):

1. Ethernet-зв'язок, що відповідає за збереження отриманих даних у базі MySQL.

2. OPC-зв'язок Arduino, що відповідає за відображення даних, отриманих від батарейного пакету, у HMI.

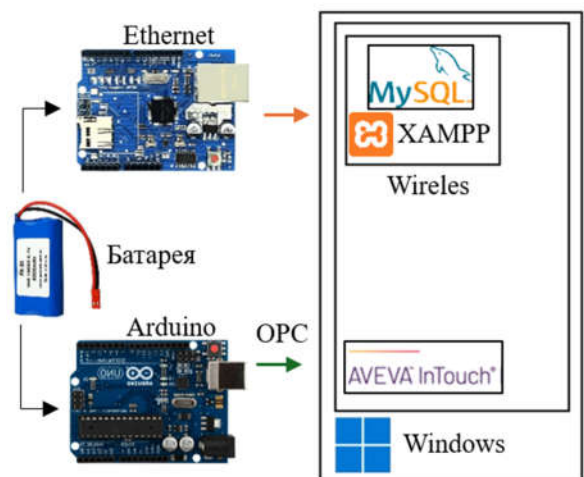


Рисунок 4 – Схема проекту комунікацій

Після створення програми для Arduino наступним етапом є комунікація між програмою Arduino та мовою PHP для того, щоб дані могли бути зчитані MySQL і збережені в базі даних. Метою зміни мови є тільки конвертація даних з Arduino на PHP. Далі Arduino підключається до InTouch через OPC по серійному порту. Для Arduino Uno використовується OPC-комунікація. OPC забезпечує зв'язок між різними програмами, використовуваними в промисловості, особливо для автоматизації, щоб з'єднати програмне забезпечення різних виробників, наприклад, з'єднати програмне забезпечення PLC Schneider Electric з HMI InTouch.

У даному дослідженні використовуються OPC for Arduino, що служить для з'єднання Arduino IDE з InTouch або як OPC сервер проєкту. У SCADA-системі InTouch є спеціальна програма OPC, що називається FS Gateway, яка працює як OPC клієнт і приймає дані від OPC сервера.

Як показано на рисунку 5, експеримент починається з підключення схеми cellboard до Arduino, де розташування пінів уже визначено. Cellboard в цьому випадку використовується для зчитування напруги з батареї, яка є дуже важливою як референсна величина для датчиків LM35 та ACS712-30. Після підключення cellboard, наступним етапом є підключення датчика LM35 до Arduino для вимірювання температури. Потім до Arduino підключається навантаження у вигляді LED-лампи на 12 VDC і потужністю 3 W перед підключенням датчика ACS712-30. Після перевірки роботи лампи, датчик ACS712-30 підключається між навантаженням і батареєю для вимірювання струму, що проходить.

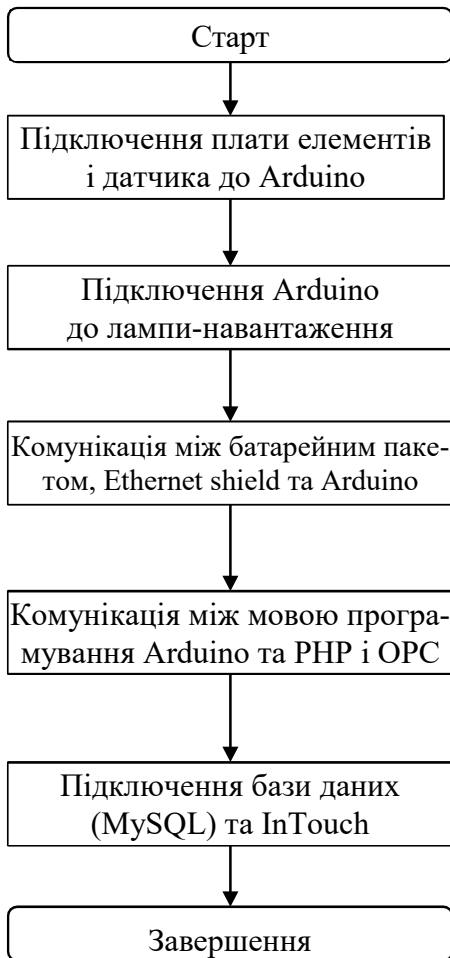


Рисунок 5 – Діаграма дій системи

Далі відбувається паралельна робота – підключення акумуляторного пакету до Arduino Mega 2560 та Arduino Uno. Arduino Mega 2560 використовується для збору даних і їх збереження в базі даних, а Arduino Uno – для відображення даних без збереження. Для обох Arduino визначається мова комунікації: для Arduino Mega 2560 мова Arduino змінюється на PHP, а для Arduino Uno використовується додаткове оголошення для комунікації OPC в мові Arduino.

Після цього Arduino Mega 2560 підключається до бази даних MySQL в програмі XAMPP на ноутбучі, а Arduino Uno підключається до InTouch через OPC Server (OPC для Arduino) і OPC Client (FSGateway).

Після розробки та запуску системи наступним кроком є перегляд даних, які були отримані від Arduino. Спочатку відображаються дані про напругу кожної батареї та загальну напругу батарей.

Ці дані з напруги згодом використовуватимуться для визначення залишкової ємності батареї. Крім того, вимірювання напруги є вихідними даними для обчислення струму та температури, адже всі подальші розрахунки залежать від напруги.

Дані про струм отримуються за формулою:

$$V_{вих} = \frac{V_{cc}}{2} + S_{\theta} \cdot I, \quad (1)$$

де $V_{вих}$ – вихідна напруга датчика (вольти); V_{cc} – напруга живлення (5 В); S_{θ} – чутливість датчика ACS712-30 (0,066 В/А); I - вимірюваний струм (ампери).

Температура обчислюється за зміною напруги, яку видає датчик LM35 (10 мВ/°C). У прошивці Arduino напруга множиться на опорну напругу та масштабний коефіцієнт, щоб перетворити її в градуси Цельсія.

Далі зібрані дані про залишкову ємність батареї використовуються як індикатор рівня заряду батареї, що знаходиться під контролем. У цьому проєкті дане значення розраховується як сумарне значення для трьох батарей, з'єднаних послідовно. Встановлено, що рівень залишкової ємності батареї зменшується разом зі зниженням напруги.

Паралельно з передачею даних у базу також здійснюється комунікація з InTouch через Arduino Uno. Дані з Arduino Uno не зберігаються в базі, а безпосередньо відображаються в НМІ. На рисунках 6 і 7 показано інтерфейс, що був реалізований у цьому дослідженні.

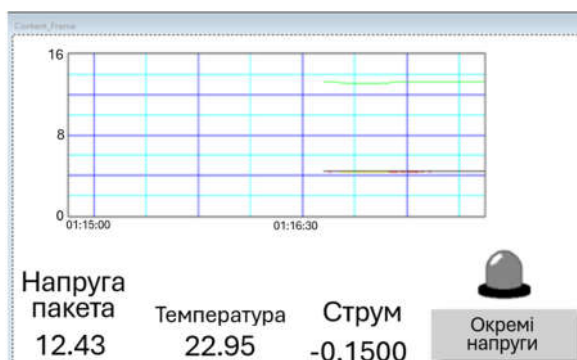


Рисунок 6 – Видгляд головної сторінки InTouch



Рисунок 7 – Видгляд сторінки з виведенням значень напруги

На рисунку 6 показано головну сторінку з даними про загальну напругу, температуру, струм, графіком напруги та індикатором навантаження. На рисунку 7 відображається напруга кожного з трьох контрольованих осередків батареї.

На рисунку 6 індикатор навантаження неактивний, оскільки лампа не підключена. Робота індикатора залежить від виміряного струму: за негативного значення струму навантаження відсутнє, за позитивного - є підключене навантаження. На рисунку 8 показано випадок, коли навантаження ввімкнене і струм стає позитивним.

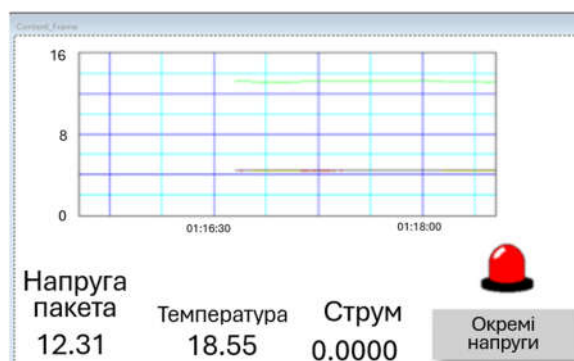


Рисунок 8 – Видгляд головної сторінки InTouch, коли увімкнена лампа

Висновки

У ході виконання даної роботи створено систему для виявлення напруги, струму та температури, а також базу даних на MySQL і НМІ на InTouch. Значення напруги, яке відображається в базі даних, не збігається зі значенням, відкаліброваним за допомогою мультиметра, через неправильний вибір опорної напруги. Величина похибки становить 7% при рівні точності 93%. Крім того, якщо значення струму негативне - це означає, що навантаження не підключено, тоді як якщо струм позитивний - навантаження підключено.

Дані напруги, струму та температури, які зберігаються та відображаються в базі даних, отримуються з Arduino Uno та не зберігаються в базі даних, а безпосередньо відображаються у InTouch, оскільки Arduino Mega 2560 з Ethernet-shield уже зберігає їх у MySQL.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Velasco-Hernandez, G. et al. Autonomous Driving Architectures, Perception and Data Fusion: A Review. In Proceedings of the 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2020), Cluj-Napoca, Romania. 2020. doi:[10.1109/ICCP51029.2020.9266268](https://doi.org/10.1109/ICCP51029.2020.9266268)
2. Raouf, I. et al. Sensor-Based Prognostic Health Management of Advanced Driver Assistance System for Autonomous Vehicles: A Recent Survey. Mathematics 2022. 10, 3233. doi:[10.3390/math10183233](https://doi.org/10.3390/math10183233)
3. Vargas J. et al. An Overview of Autonomous Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions. Sensors. 2021. 21(16):5397. doi :[10.3390/s21165397](https://doi.org/10.3390/s21165397)
4. Yeong, D.J. et al. Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. Sensors 2021. 21. 2140. doi:[10.3390/s21062140](https://doi.org/10.3390/s21062140)
5. Xu W. et al. Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles, in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 6, pp. 50155029, 2018. doi: [10.1109/IJOT.2018.2867917](https://doi.org/10.1109/IJOT.2018.2867917)
6. Rathin Chandra Shit Precise localization for achieving next-generation autonomous navigation: State-of-the-art, taxonomy and future prospects. Computer IA94.150БАК.004 ПЗ Зм. Арк. № докум. Підпис Дат а Арк. 82 Communications Volume 160, 1 July 2020, P. 351-374. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.06.007>.
7. Erick J. Rodríguez-Seda, Dušan M. Stipanović Chapter 4 - Guaranteed Collision Avoidance with Discrete Observations and Limited Actuation // Advances in Intelligent Vehicles. Academic Press, 2014, p. 89-110. doi: [10.1016/B978-0-12-397199-9.00004-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397199-9.00004-5)
8. Pandey A, Pandey S, Parhi DR. Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review. Int Rob Auto J. 2017;2(3):96-105. doi: [10.15406/iratj.2017.02.00023](https://doi.org/10.15406/iratj.2017.02.00023)

INTELLIGENT DATA ACQUISITION AND PROCESSING SYSTEM BASED ON A MICROCONTROLLER WITH INTEGRATION INTO SCADA

Lahoida A. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0862-7786>
e-mail: andrii.lahoida@nung.edu.ua

Lahoida L. I.

Assistant
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2328-8276>
e-mail: liudmyla.lahoida@nung.edu.ua

Chyhur I. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0023-3328>
e-mail: ihor.chyhur@nung.edu.ua

Chyhur L. Ya.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5653-9246>
e-mail: liudmyla.chyhur@nung.edu.ua

Abstract. One of the main challenges for control systems of many modern processes is the limitation in data collection directly at the site of operation, as well as the delays that occur during decision-making in emergency situations. These limitations can lead to reduced system efficiency, shorter service life, or even complete failure. Previously, such problems were partially addressed through the implementation of SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems, which provide centralized monitoring and control of distributed objects. However, in the context of the system under development, this approach is insufficient due to the specific nature of the controlled object, which requires precise and real-time data processing from various sensors, including voltage, current, and temperature. Therefore, this research focuses on the development and implementation of a methodology that involves integrating sensors into a SCADA system to enhance control, safety, and operational optimization. This approach is particularly relevant for fields such as electric transportation, autonomous energy systems, and other industries where lithium batteries are used and high reliability is required. The implementation method involves using an Arduino microcontroller to read data from voltage, current, and temperature sensors. This data is then transmitted to a MySQL database, from which it is displayed in the SCADA environment of InTouch for System Platform, serving visualization and monitoring functions. This architecture allows for an effective real-time system that can respond immediately to changes in battery parameters. The database is designed to accumulate and analyze information about the system's critical parameters—namely voltage, current, temperature, and state of charge—ensuring a comprehensive approach to diagnosing and forecasting the condition of the power system.

Keywords: SCADA, InTouch, MySQL, Arduino, sensors, monitoring, control.



Прийнято 01.11.2025. Прорецензовано 09.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

UDK 621.317.7

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-148-159

EMPLOYING A PID CONTROLLER AND AN INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEX FOR RELIABLE ELECTRIC MOTOR MODELING AND PROGRAMMING

Pindus N. M. *

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9755-4824>
e-mail: nataliia.pindus@nung.edu.ua

Chuiko M. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4998-7585>
e-mail: myroslava.chuiko@nung.edu.ua

Vyvytskyi Z. Y.

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Medical University
76018, Halytska St., 2, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-6094-112X>
e-mail: z.vyvytskyi@icloud.com

Krovopuskov H. Yu.

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2839-8721>
e-mail: hermankrovopuskov@gmail.com

Запропоноване посилання: Pindus, N. M., Chuiko, M. M., Vyvytskyi, Z. Y. & Krovopuskov, H. Yu. (2025). Employing a PID controller and an information and measurement complex for reliable electric motor modeling and programming. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 148-159. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-148-159

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract. The research is focused on developing an algorithm of choice and use of different types of PID controllers, and the tuning of its settings to simulate the word and control the speed and position of a DC motor (direct current motor). After analyzing the characteristics of the DC motor and speed and position sensors of the system (typically an encoder) the researchers were able to ensure safe operating conditions and provide the experimenter with data about the limits of the motor, its capabilities and optimal working conditions. As equipment the QNET DCMCT DC motor control trainer was used. A step response test was conducted during the research to evaluate system stability based on its reaction to a step input signal. The Ziegler-Nichols method is recommended for controlling the position of a DC motor. This two-step tuning method involves performing a test to quantitatively assess the system's behavior in terms of how quickly and to what extent the process variable changes with alterations in the control input. The results of these tests are used in empirical formulas to determine appropriate controller settings for desired performance. The method involves determining the critical period T_u (ultimate period) and the critical gain P_u (K_u) (ultimate gain). The information and measurement complex with PID controller temporarily disables its algorithm, replacing it with an ON/OFF relay, causing the process variable to oscillate. These obtained values describe the process behavior to guide PID tuning for the desired closed-loop performance. The method involves determining the critical period T_u (ultimate period) and the critical gain P_u (K_u) (ultimate gain).

Keywords: information and measurement complex, metrology, measurement of physical quantities, PID algorithm, DC motor, error, stability, quality assessment.

Introduction

Control system commands directs and regulates the behavior of other devices using control loops.

Depending on the control method, automatic control systems can be classified as open-loop systems, closed-loop (feedback) systems, feedforward (also known as direct control) systems, and complex systems.

Statement of the article's objectives – use of a PID controller integrated into the information and measurement system for programming a DC motor.

Analysis of modern foreign and domestic research and publications

Article [1] describes the use of Simulink to implement the Proportional Integral Differential (PID) controller that can be used to control the speed of DC motor and bring it at the desired speed. Pulse width Modulation (PWM) is another technique which involves the use of the same simulation software. Hardware implementation requires the use of Infrared (IR) sensors and Arduino (open source platform for building Electronic project) for measuring the Rotations per minute (RPM) of the DC motor. Motor speed was measured using three techniques and a further comparison between these techniques is carried out according to the desired and

control speed. The applications of our research could be in conveyors, turntables and others for which adjustable speed and constant or low-speed torque are required. It also works well in dynamic braking and reversing applications, which are common in many industrial machines.

Article [2] describes technique for controlling the speed of a DC motor using a PID controller, its construction, and the selection of PID parameters depending on the system response. A PID controller is used to control the speed of the DC motor, and the Matlab program is used for calculations and simulations. The parameter has been shown in several contrast experiments and explains how to adjust the value of the PID

Basic material

Let us consider a feedback control system.

Feedforward (direct) control systems rely on the disturbance signal and adjust the input control signal to counteract these disturbances. Unlike feedback control systems, feedforward structures no longer depend on measuring and adjusting the output. In other words, such systems are used in situations where disturbances can be accurately predicted and responded to in time.

Feedback control systems include a feedback loop that continuously monitors and

regulates the output of a device. This loop makes adjustments to the process flow to achieve the desired result. The method involves input data, which initiates the process; the process itself, which is being controlled; output data, representing the result; a sensor that collects information about the process; a controller that issues commands; and an actuator that carries out those commands.

There are various types of feedback control systems, including positive and negative feedback.

In a positive feedback system, the controller adds the output values to the setpoints (desired values), aligning them with the input signals. This type of feedback can amplify or weaken the effect that caused the signal change, depending on clearly defined limits. In other words, a change (increase or decrease) in one variable eventually leads to a similar change (increase or decrease) in another variable. An example of this is a nuclear bomb explosion: the released plutonium neutrons trigger further fission events, increasing the number of neutrons and resulting in a chain reaction and explosion.

Negative feedback, on the other hand, subtracts the output signal value from the input (which is considered the desired result). The resulting difference is referred to as the error, indicating how much the output deviates from the desired input.

For continuous modulated control, a feedback controller is used to automatically manage a process or operation. The control system compares the value or state of the process variable (PV) being regulated with the desired or setpoint value (SP) and uses the difference as a control signal to bring the output variable of the installation's process to match the setpoint.

In general, there are several fundamental differences between feedforward and feedback control systems. Functionally, a modified feedforward system may include a feedback loop, but feedback control systems typically do not have a built-in feedforward mechanism. Moreover, a feedback system can detect all types of disturbances, unlike a feedforward system. Additionally, the latter

has further limitations: it is not suitable for nonlinear, time-varying, or adaptive systems, whereas feedback control is more versatile. The most important aspect is that a feedforward system requires a highly skilled operator who can account for all process parameters and develop an optimal strategy to compensate for changes and errors in the device's operation, whereas using a feedback system generally only requires basic knowledge of how the control process flows.

A feedback controller that switches sharply between two states is used for on-off control. Such simple control systems can be inexpensive and effective. Below are a few examples of how these systems are used in household appliances.

A bimetallic thermostat consists of two metal strips that deform under the influence of temperature, thereby switching the electrical contacts in the thermostat. This works based on the principle of differing expansion coefficients of the two metals (for example, steel and copper).

A refrigerator also responds to temperature changes, but in a different way. When the temperature drops due to the door being opened or hot food being loaded, a sensor detects the change and sends the data to a control device (usually a controller or thermostat), activating the compressor until the set temperature is restored.

An electric motor is a device that converts electrical energy (in the form of voltage and current) into mechanical energy (either linear or more commonly – rotational motion). Electrical energy is supplied to the input of the motor, and mechanical energy is delivered at the output. From a black-box perspective, the motor produces mechanical motion from supplied electrical energy. This is made possible by the phenomenon of electromagnetism.

If we delve into the operating principle, we find a fairly simple system. When electric current flows through the rotor windings, it creates a magnetic field. This magnetic field interacts with the magnetic field of the stator (which can be generated using either electromagnets or permanent magnets). The interaction between the stator and rotor fields

produces a torque that causes the rotor to rotate. The commutator reverses the direction of the current in the rotor windings with each half-turn to ensure continuous rotation in one direction. The rotation of the rotor is transmitted to the shaft, which in turn performs mechanical work.

Typically, a control system consists of the following components:

Drive (such as a motor) and its control board;

Sensor (for speed, torque, position, etc.);

Microcontroller board.

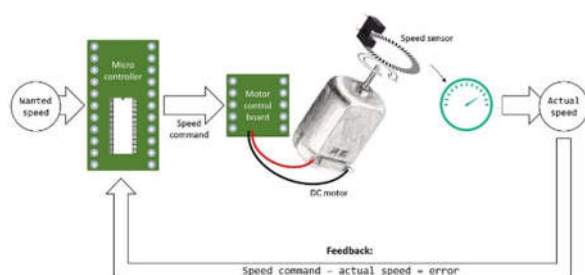


Figure 1 – Work model of control system

There are various ways to control a direct current (DC) motor. Speed and position control are the two most common examples, but torque control is also possible. If desired, it's even possible to monitor and control parameters like temperature or noise level. Naturally, each control method requires a corresponding sensor– for example, a speed controller works effectively with a speed sensor.

The term PID stands for Proportional, Integral, Derivative. These are the three main components of the control algorithm, each associated with a respective constant. These components are calculated based on the error provided by the sensor.

$$\text{Command}_{PID} = f_p(e) + f_i(e) + f_d(e). \quad (1)$$

There is specific terminology involved here:

Setpoint (command variable, desired value) is the target value that the actuator should reach.

Process variable is the actual value measured by the sensor during the operation.

Error is the difference between the setpoint and the process variable.

Steady (stable) state is the condition in which the system stops oscillating and reaches full balance.

Proportional component

When there's a need to reach a specific value, a P-controller can handle this task. The proportional (P) component is always used in PID control. P, PI, PD, and PID represent the four possible combinations of control loops.

In the first control cycle, the controller does not operate – all coefficients are zero, and the error ranges from zero to the value of the setpoint. In the second cycle, the coefficients are equal to the error from the first cycle, and the output power gradually increases, reducing the error. In the third cycle, the coefficients respond to the second cycle's error, but the power increases too rapidly, causing an overshoot. In the fourth cycle, the coefficients respond to the resulting negative error from the previous overshoot, and the output power decreases, bringing the system closer to the desired value.

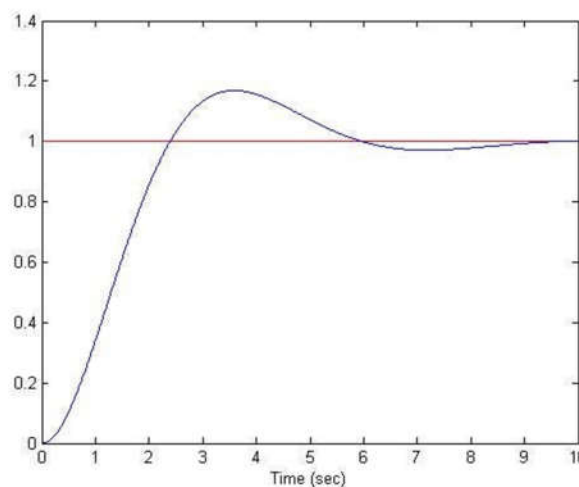


Figure 2 – Change in output power bringing the system closer to the desired value

The coefficient K_P is the value multiplied by the error. This means that the larger the error, the larger the corrective command. Mathematically, it is expressed as:

$$f_p(e) = K_P \times e. \quad (2)$$

In the case of a DC motor, using K_P is only suitable when controlling the rotor's (or screw's) rotational speed. That is, if the

system needs to reach a certain value just once, then using the proportional part is sufficient. The problem arises when this value needs to be maintained.

There is a drawback to using only the proportional part: a certain offset in the steady state. When using only the proportional component of the PID, i.e., when I and D are equal to zero, a constant difference between the setpoint and the process variable appears in the steady state. This is called static error or steady-state error. This static error exists because the more loops there are, the closer the system gets to the setpoint, and the smaller the error becomes. However, when the error approaches zero, the system lacks the power to actually reach the setpoint.

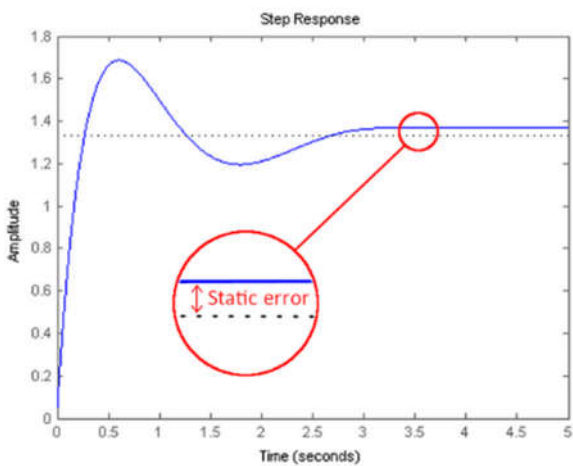


Figure 3 – The appearance of the static error

Integral parameter

Unlike the proportional part of the PID, the integral component cannot be used on its own because it will have no effect. Instead, the integral is either used with the proportional part (PI) or with both proportional and derivative parts (PID). In this case, the error is no longer treated as a variable but as a function of time, denoted as $\epsilon(t)$. [5]

I-only controllers have a much slower response time compared to P-only controllers because they depend on more parameters. If it is important to avoid offset in the system, then an I-only controller should be used, but this will require a slower response time.

To integrate $\epsilon(t)$, all previous values of the error function must be added. This is similar to summing all the small rectangles

under the error curve when calculating the integral. The total sum is then multiplied by a constant, K_I , which controls the power of the integral part.

The key advantage of adding I-control to your controller is that it eliminates offset. The drawbacks are that it can destabilize the controller, and there is integrator windup, which increases the time required for the controller to make adjustments. [6]

A variable, such as sum_e , needs to be declared to accumulate each new error value $\epsilon(t)$ in each system cycle, something like $sum_e += e$, and then it is multiplied by the K_I constant in the control function. This looks like:

$$f_I(e) = K_I \times sum_e \quad (3)$$

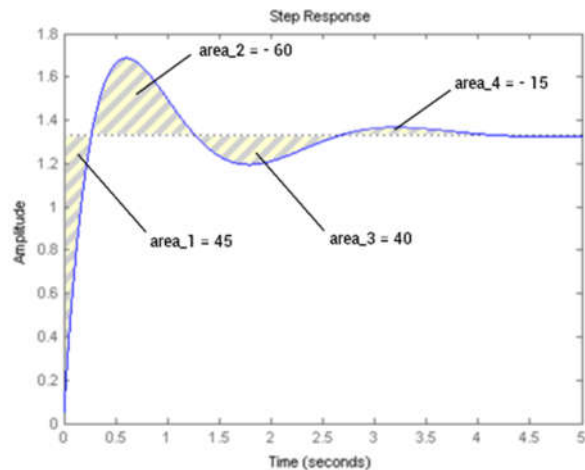


Figure 4 – Change in time required for the controller to make adjustments [6]

Adding the integral command will correct the static error caused by using only the proportional control set. Indeed, as long as there is an error, i.e., $\epsilon(t) \neq 0$, even if $\epsilon(t)$ is small compared to the initial error, it will still affect the system due to its residual value, preventing the proportional part from reaching the desired outcome.

Derivative Parameter

Unlike the proportional part of PID, the derivative part, like the integral part, cannot be used independently as it will have no effect. Instead, the derivative is either used with the proportional part (PD) or with both proportional and integral parts (full PID).

The letter D stands for derivative, as it differentiates the calculated error in the PID command.

The derivative of a function is the result of differentiating that function.

Let's take a continuous function $y=f(x)$. f is a function that transforms x into y .

Now, let's call $f'(x)$ the derivative of $f(x)$. $f(x)$ has been differentiated to give $f'(x)$.

Mathematically, the derivative f' of f is the ratio of the change in the output value to an infinitesimal change in the input value. Limits are used to demonstrate this change in input data.

Differentiation of a function is similar to measuring how much the output y changes when we change the input x . The control output is calculated based on the rate of change of the error over time. The faster the rate of change of the error, the more pronounced the controller's response will be.

This tangent is the slope, and the slope is usually calculated for two points by dividing the difference in the y -axes by the difference in the x -axes of these points. In this case, it is assumed that these two points are very close to each other to make the slope as accurate as possible [7].

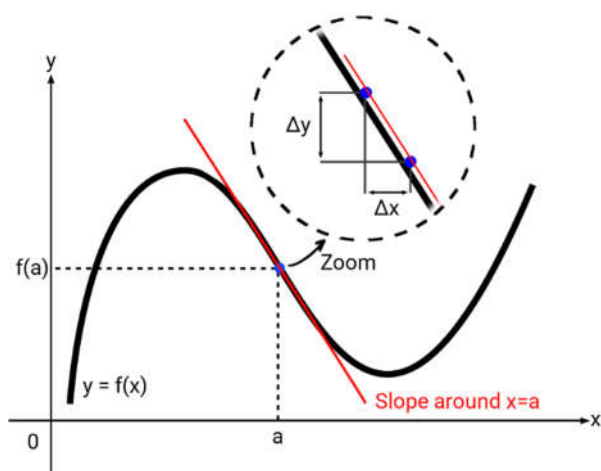


Figure 5 – Simulation of the tilt angle tangent during acceleration [7]

Thus, it can be remembered that the derivative of a function at point aa is the slope of the curve at that point.

If the position function of an object relative to time is differentiated, we get the velocity of the object. Why? Because velocity is the change in position: the more the

position changes, the greater the velocity of the object. If the velocity function of the object is differentiated relative to time, the result is its acceleration.

Therefore, the derivative has a "predictive" effect, showing what the error will be by obtaining the magnitude of its variation in order to reduce it. The derivative smooths (dampens) oscillations, i.e., it reduces the intensity of the system's response, making it more stable. This improves the quality and stability of the motor's operation, which is applied in industrial production, household appliances, etc.

An important point: using the derivative works well for errors that show low dynamic changes. For example, measuring and controlling temperature is not prone to rapid changes. However, if the measured and controlled quantity undergoes very high dynamic changes or if the error is accompanied by strong noise, differentiating it can lead to even greater amplitude than the desired signal, which will cause the system to behave unstably.

Like I-control, D-control is mathematically more complex than P-control. Since a computer algorithm will take more time to compute the derivative or integral than to simply linearly relate input and output variables, adding D-control slows down the controller's response time.

To add the derivative expression $f_D(e)$ to the command, differentiation can be simplified by subtracting the previous cycle's error from the current cycle's error and multiplying this difference by the coefficient K_D (the derivative gain).

$$f_D(e) = K_D \times (e - \text{previous}_e) \quad (4)$$

Thus, the final form of the complete PID command will be:

$$\text{Command}_{PID} = K_p \times e + K_i \times \text{sum}_e + K_D \times (e - \text{previous}_e) \quad (5)$$

From this, we can conclude that the proportional coefficient is based on the current error, the integral is based on errors from previous cycles, and the derivative anticipates future errors.

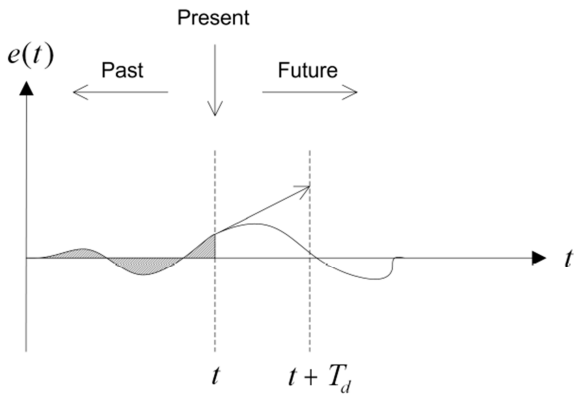


Figure 6 – Errors from previous cycles, and the anticipation of future errors

There are 3 types of control for DC motors: position control, speed control, and modeling. Generally, for new systems, it is common to begin by configuring and studying the basic characteristics of the motor through a bump test.

Bump test (modeling)

At the beginning of the process, it is necessary to familiarize yourself with the characteristics of the DC motor and system sensors. This ensures safe operating conditions and provides the experimenter with certain knowledge about the motor's limitations, capabilities, and the ability to calculate optimal working conditions.

A bump test is a simple check based on the step response of a stable system. A step signal is applied to the input, and the resulting output signal of the system is recorded.

Amplitude is the maximum deviation of a quantity during oscillatory or wave-like motion, which periodically changes from some value considered zero (or average) or from the equilibrium state of the system. As the amplitude increases, the intensity of the signal intensifies. In control systems, a stronger input signal results in a stronger system response. Conversely, decreasing the amplitude weakens the signal, leading to weaker system responses.

Frequency is a physical quantity equal to the number of identical events (or full cycles) per unit of time. Essentially, frequency regulates how quickly the signal oscillates. When frequency increases, the signal oscillates faster, which results in a quicker

change in the input signal and a potential delay in the system's response if the system's reaction time is slower. Conversely, a lower frequency causes slower oscillations, giving the system more time to adapt to changes. This is beneficial for the stable operation of the system, but it also reduces the overall system efficiency.

Offset is a constant value added to the entire signal, shifting it vertically along the ordinate axis. It reflects a certain average value around which the signal oscillates. With a positive offset, the signal shifts upwards, increasing the base level of the signal, and with a negative offset, the opposite effect occurs.

The change of each of these parameters requires a careful and controlled approach. Adjusting one value often requires fine-tuning others to maintain the normal operation of the system. For example, increasing amplitude and frequency results in a stronger and more dynamic signal, which improves the system's working efficiency or reveals nonlinearity in its operation. Simultaneously increasing amplitude and offset raises the average working point and the intensity of the system's quality response, directly affecting the stability and saturation of the system components. Adjusting frequency and offset changes the working range and response time, requiring precise tuning to maintain the desired operating state of the system.

The input signal starts at time t_0 , and from the graph, one can find the minimum (u_{min}) and maximum (u_{max}) values of the input voltage. The output (resulting) initial signal is at the level y_0 . After the step input signal is applied, the output follows it, eventually stabilizing at a steady-state value y_{ss} . From this, the steady-state gain coefficient K is calculated through the difference between the steady-state values of the input Δu and output Δy signals:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_{ss} - y_0}{u_{max} - u_{min}} \tag{6}$$

Speed Control

For controlling the speed of a DC motor, the use of a PI controller, that is, only its

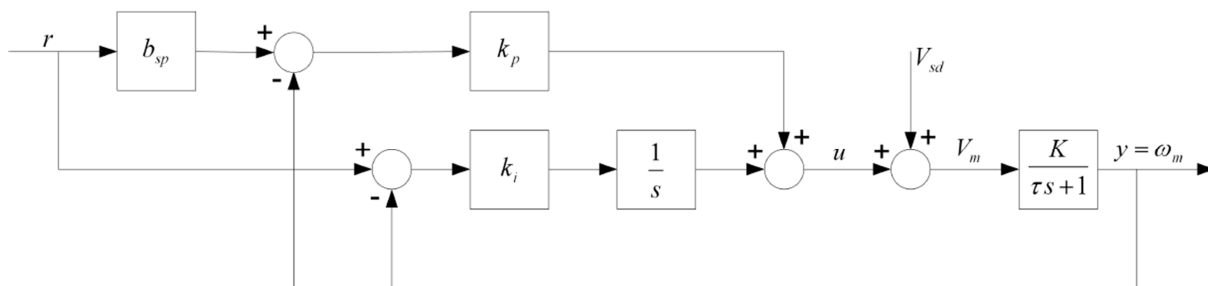


Figure 7 – Structural scheme of motor speed control

proportional and integral components, is sufficient.

From the known parameters, the maximum peak overshoot (PO), damping ratio (ζ), natural frequency of the closed-loop system (ω_0 , also the undamped natural frequency $\omega_n = \omega_0$), and the gain coefficients k_p and k_i can be calculated. These gain coefficients, determined using the above parameters, are used to measure and control the rotational speed of the DC motor rotor, ensuring stability and constant adjustment of errors arising during operation, as well as errors caused by internal or external influences.

If the damping ratio ζ is not provided in the motor's initial parameters, it can be calculated using the formula for the peak overshoot of the system (PO). The overshoot formula is:

$$PO = 100 \cdot e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (7)$$

Solving for ζ from the original formula above gives the following dependency:

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{PO}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{PO}{100}\right)\right)^2}} \quad (8)$$

The undamped natural frequency ω_n can be found using the model time constant τ . The formula for the dependency is:

$$\tau = \frac{1}{\zeta\omega_n} \quad (9)$$

From this, ω_n can easily be calculated as:

$$\omega_n = \frac{1}{\zeta\tau} \quad (10)$$

Knowing this, the next step is to calculate the coefficients:

$$k_p = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \quad (11)$$

and

$$k_i = \frac{\omega_0^2\tau}{K} \quad (12)$$

Large values of ω_0 lead to high controller gain values. The damping ratio ζ and the parameter for weighting the setpoint value b_{sp} are used to adjust the speed and peak overshoot of the response to command variables.

The setpoint value parameter b_{sp} is typically specified within the range of 0 to 1, where 0 provides a smooth increase or decrease in the signal, while 1 increases the system's response speed.

In a controller using SPW, the proportional function acts only on a fraction b_{sp} of the command value, and there is no derivative of that same value. The integral function continues to influence the total error to ensure that the error approaches zero in steady-state. Standard PID controllers and PID controllers with setpoint weighting respond to disturbances in the same way, but their responses to setpoint changes differ.

Disturbing and controlling influences are distinguished. Disturbing influences are random in nature and difficult to predict. For example, changes in ambient temperature or fluctuations in voltage in the power grid. The controlling influence on the controlled object is organized via a control device or an operator, with the goal of compensating for the effects of disturbing actions.

Position control

For position control, the Ziegler-Nichols method is recommended. This is a two-step tuning method, which involves conducting a special test to quantitatively assess the process behavior in terms of how fast and to what extent the process variable changes when the control input (setpoint) is altered. Based on this, they developed a set of empirical formulas to convert the results of these tests into corresponding performance settings and control parameters for the controller.

The essence of the method lies in determining the ultimate period T_u (ultimate period) and the ultimate gain coefficient P_u (K_u) (ultimate gain). During this, the controller temporarily disables its PID algorithm and replaces it with an ON/OFF relay, which forces the process variable to oscillate. These values well describe the process behavior, helping to determine how the PID controller should be tuned to enhance the closed-loop performance and improve the quality of the process itself.

The amount by which the process variable changes over time and the time required for it to reach 63.2% of its final (highest stable) value indicate the process gain in steady-state and the time constant of the process, respectively. If the sensor in the loop is located a certain distance from the actuator, the process response to such a step change may also show the delay time between when the step was applied and when the process variable first started to respond.

The time required to complete one oscillation is called the critical period T_u , and the relative amplitude of two oscillations, multiplied by $4/\pi$, gives the critical gain coefficient P_u (K_u). Ziegler and Nichols theoretically assumed that these two parameters could be used instead of the steady-state gain, time constant, and dead time to calculate the corresponding tuning parameters using their well-known equations or tuning rules.

Empirically, they found that these rules generally produce a controller that responds quickly to intentional setpoint changes, as well as random disturbances of the process variable. However, a controller tuned this way

tends to overcorrect and oscillate the process variable, which is why most self-tuning controllers offer several alternative tuning rules that make the controller behavior more stable (less aggressive). In practical terms, the operator typically only needs to choose the desired response speed (slow, medium, fast), and the controller automatically selects the appropriate tuning rules to meet the request.

A controller can be made more or less aggressive by adjusting three tuning parameters – the proportional gain K_p , the integral time T_i , and the derivative time T_d . The Ziegler-Nichols tuning rules can be used to calculate moderately aggressive tuning values based on the critical period T_u and the critical gain coefficient P_u (K_u).

During the experiment, the integral and derivative (differential) gains are set to zero, while the proportional gain is manually increased until the system starts oscillating with a constant amplitude. The critical gain at which the system begins to oscillate is recorded, and the integral and derivative gains are then adjusted according to a set of rules and formulas to achieve the optimal tuning.

For position control of a DC motor, it is typically sufficient to use only the PD-controller components, without relying on the integral component.

In this case, the proportional and derivative gains can be calculated as:

$$k_p = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} \quad (13)$$

And

$$k_d = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \quad (14)$$

If the integral part is added to handle random disturbances and steady-state errors, the calculations become:

For K_p :

$$k_p = \frac{\omega_0\tau + (\omega_0 + 2\zeta p_0)}{K} \quad (15)$$

For K_d :

$$k_d = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau + p_0\tau}{K} \quad (16)$$

For K_i :

$$k_i = \frac{\omega_0^2 p_0 \tau}{K} \quad (17)$$

Work in this area is relevant and was particularly in demand by the companies PC "Ivano-Frankivskcement." This research was carried out by a student of the educational and professional program "Metrology and Information-Measuring Technology" as part of an industrial internship. The research results were also presented at the All-Ukrainian Scientific and Pedagogical Forum "Innovative Technologies in Education" in 20.10.2024.

A competition project on this topic, prepared by Herman Krovopuskov, won a prize at the «Челендж інтелектуальний вимір 2024 «InnoVative Technologies» (IVT_2024)» held on 08.05.2025.



Figure 8 – Approbation of the research «InnoVative Technologies»

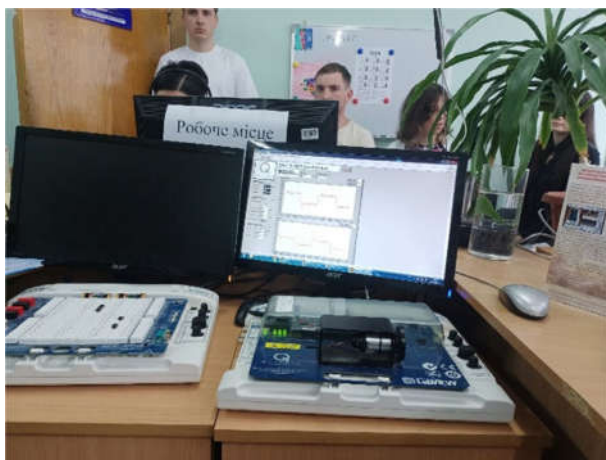


Figure 9 – Practical use of the research study with the use of information and measurement complex

It is worth noting that such cooperation between the University and specialized companies is a key factor in the successful employment of graduates of the G6 specialty «Information and Measurement Technologies».

Thus, the measurement of physical quantities and their metrological research; testing the stability and reliability of systems and information-measuring complexes; studying the quality of engine control systems, which are widely used in household appliances such as washing machines, vacuum cleaners, air conditioners, etc., where a precise and reliable electric motor control system is required. Due to their simplicity and efficiency, PID controllers help improve energy efficiency, reduce wear of mechanical components, and enhance user experience by ensuring stable and quiet operation of devices. Therefore, such research and its practical implementation are optimally integrated into the employment opportunities of our graduates, particularly in terms of expanding their scope to include service processes and industry represented in Ukraine's national economy.

The scientific novelty lies in the combination of the Ziegler-Nichols method with a weighted setpoint parameter, bsp. This combination made it possible not only to significantly reduce the calculation time compared to the classical calculation method, but also to provide the user with the ability to adjust the system's response speed to their own needs – even without possessing all the necessary technical knowledge by allowing control through the modification of a single parameter. This would be convenient for use in everyday household appliances, such as a hair dryer - this functionality would allow devices to operate properly for a longer time and simplify the control of output power at the user's discretion.

Conclusions

In the course of this study, the effectiveness of a PID controller in regulating the speed of a direct current (DC) electric motor was thoroughly evaluated. The results indicate that the implementation of PID control ensures high precision in maintaining the target rotational speed of the motor shaft, even under variable load conditions and external disturbances. Experimental data confirm that the controller successfully mitigates dynamic deviations, contributing to stable and consistent motor operation with minimal oscillation or delay. Furthermore, the findings underscore the importance of

accurate tuning of the proportional, integral, and derivative parameters, as well as the distinct influence each has on system performance. Proper parameter optimization was shown to be essential in achieving the desired control behavior.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

References

1. Hardik S Jain, Akshat Palak, Sandesh Agrawal, Krishnam Tibrewal, Malaya Kumar Hota. DC Motor Speed Control using PID Controller, IR Sensor and PWM Hysteresis. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. Vol. 8. Issue 6. P. 781–786. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i6/F3678048619.pdf>
2. Khalid Wasim, Muhammad Shahid. DC Motor Speed Control using PID Controller. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*. Vol. 6. Issue 5. 2022. P. 839–845. URL: <https://archive.org/details/httpswww.ijtsrd.com/engineering/electrical-engineering/50566dc-motor-speed-control->
3. Control Tutorials for MATLAB and Simulink – DC Motor Speed: PID Controller Design. URL: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=ControlPID>
4. Control Tutorials for MATLAB and Simulink – PI Control of a DC Motor. URL: https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_DCmotorB
5. PID: the P as in Proportional. URL: <https://medium.com/luos/pid-p-as-in-proportional-39cd1e1e8567>
6. PID: The I, as in integral. URL: <https://medium.com/luos/pid-the-i-as-in-integral-4390c71db12e>
7. PID, D as in Derivative. URL: <https://medium.com/luos/pid-d-as-in-derivative-6a022a82a62e>
8. What is PID Control? – ATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/pid-control.html>
9. Boliukh V. F., Bondaruk P. A., Korytchenko K. V. *Elektrotehnika ta elektromekhanika : navch. posib.* Kharkiv: VITV NTU “KhPI”. 2019. 352 p.

ВИКОРИСТАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ НАДІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ Й ПРОГРАМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Піндус Н. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9755-4824>
e-mail: nataliia.pindus@nung.edu.ua

Чуйко М. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4998-7585>
e-mail: myroslava.chuiko@nung.edu.ua

Витвицький З. Я.

Кандидат медичних наук, доцент
Івано-Франківський національний медичний університет
76018, вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-6094-112X>
e-mail: z.vytvytskyy@icloud.com

Кривошук Г. Ю.

Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-2839-8721>
e-mail: hermankrovopuskov@gmail.com

Анотація. Робота присвячена розробленню алгоритму вибору та використання різновидів PID-контролера, а також налаштуванню його параметрів для моделювання роботи, контролю швидкості та положення DC-двигуна (двигуна постійного струму). Здійснивши аналіз характеристик двигуна постійного струму та датчиків швидкості і положення системи (найчастіше енкодера), отримано можливість забезпечити безпечні умови роботи та надати експериментатору інформацію про обмеження роботи двигуна, його можливості та розрахувати оптимальні умови роботи. В якості навчального обладнання використано тренажер контролю двигуна постійного струму QNET DCMST. В процесі досліджень проведено ударний тест – перевірку на базі крокової реакції стабільності системи. Подається кроковий сигнал на вхід, і після цього визначається результат, тобто вихідний сигнал системи. Для контролю положення DC-двигуна рекомендується використовувати метод Циглера-Ніколса. Це двоетапний метод налаштування контуру, який фактично полягає в проведенні спеціального тесту для кількісної оцінки поведінки процесу, з точки зору того, як швидко і наскільки змінна процесу варіюється при зміні керуючого впливу (командного значення). На основі цього за певним набором емпіричних формул для переведення результатів цих тестів здійснюються відповідні налаштування продуктивності та параметри керування контролера. Суть методу полягає у визначенні критичного періоду T_u (ultimate period) та критичного коефіцієнта підсилення P_u (K_u) (ultimate gain). Під час цього контролер тимчасово відключає свій PID-алгоритм і замінює його на реле ON/OFF, яке змушує змінну процесу коливатися. Ці отримані величини добре описують поведінку процесу, щоб визначити, як слід налаштувати PID-регулятор, щоб отримати бажану продуктивність замкненого контура.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальний комплекс, метрологія, вимірювання фізичних величин, PID-алгоритм, DC-двигун, похибка, стійкість, оцінювання якості.



Прийнято 29.10.2025. Прорецензовано 19.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 681.5 + 303.094.7

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-160-168

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПІД- ТА МРС-РЕГУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ В УМОВАХ ЧАСТКОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Складанний Д. М. *

Кандидат технічних наук, доцент

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

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3624-5336>

e-mail: skladannyu.denys@iit.kpi.ua

Цапар В. С.

Кандидат технічних наук, доцент

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

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>

e-mail: v.tsapar@kpi.ua

Плашихін С. В.

Кандидат технічних наук, доцент

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

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-0039-3302>

e-mail: psv-ihf@iit.kpi.ua

Онищенко Д. С.

Аспірант

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

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-4276-4443>

e-mail: ods-ihf@edu.kpi.ua

Запропоноване посилання: Складанний, Д. М., Цапар, В. С., Плашихін, С. В. & Онищенко, Д. С. (2025). Дослідження роботи ПІД- та МРС-регуляторів на основі еталонної моделі в умовах часткової невизначеності. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 160-168. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-160-168

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Об'єктом дослідження в роботі є одноконтурна система автоматизованого керування, побудована на основі еталонної моделі. Метою даної роботи є порівняльний аналіз ефективності ПІД- та МРС-регуляторів, синтезованих на основі еталонної моделі, в умовах часткової параметричної невизначеності об'єкта керування. Наведено огляд ряду існуючих вітчизняних та закордонних досліджень у сфері використання ПІД та МРС-регуляторів для аналізу та порівняння. Поставлено та реалізовано імітаційний експеримент для системи керування з двома джерелами невизначеності – вхідної величини та параметричної невизначеності. Експеримент реалізовано програмними засобами MATLAB Simulink на основі еталонної моделі другого порядку з одиничними коефіцієнтами, яка описує аперіодичний процес із загасанням. Розмах варіювання накладених відхилень складає 10% та 20%, тривалість експерименту – 50 часових відрізків. Першим етапом аналізу є графічна побудова результатів імітаційного експерименту. Результати показують, що системи з ПІД-регулятором загалом демонструють вищу стабільність в умовах часткової невизначеності, ніж МРС-регулятор. Не нашу думку, це пояснюється особливістю алгоритму роботи МРС-регулятора, зокрема лінеаризацією моделі на горизонті прогнозування. На другому етапі аналізу проведено обчислення, які показали, що система з ПІД-регулятором у середньому в умовах часткової невизначеності демонструє нижче значення вихідної величини порівняно з еталонним на 0,3 ... 1,5%. Водночас система з МРС-регулятором, в умовах часткової невизначеності, в середньому показує на 1,3 ... 2,6% нижче значення вихідної величини у порівнянні з еталонним. Таким чином, за однакового оцінюваного рівня невизначеностей, відхилення вхідних і керуючих параметрів більше погіршує якість процесу регулювання, ніж параметрична невизначеність об'єкта керування. У цьому ж імітаційному експерименті МРС-регулятор показав гіршу стійкість до умов невизначеності, ніж ПІД-регулятор. В умовах часткової невизначеності ПІД-регулятор в середньому показав недорегулювання щодо завдання, а МРС-регулятор – перерегулювання.

Ключові слова: параметрична невизначеність, ПІД-регулятор, модельно-прогностичний регулятор, імітаційний експеримент, MATLAB Simulink.

Вступ

Сучасні системи автоматичного керування часто функціонують в умовах невизначеності, що зумовлена неточністю математичних моделей об'єктів керування, варіацією параметрів технологічних процесів, а також впливом зовнішніх збурень та шумів. Однак, переважна більшість систем використовує традиційні регулятори, обмежені у можливості врахування такої невизначеності.

ПІД-регулятори, завдяки простоті реалізації та надійності, залишаються найпоширенішим рішенням у промисловості, забезпечуючи прийнятну якість керування для широкого класу об'єктів. Водночас їхня ефективність суттєво знижується за значних параметричних збурень та інших відхилень в об'єкті керування. Алгоритми модельно-прогнозувального керування (Model Predictive Control, МРС) демонструють здатність враховувати обмеження на керуючі впливи та змінні стану, забезпечуючи оптимальність керування на прогнозованому горизонті. Проте їхнє функціонування у зазначених вище умовах також потребує більш детального аналізу.

Еталонна модель визначає бажану динаміку системи, що дозволяє формалізува-

ти критерії якості та забезпечити систематичний підхід до порівняльного аналізу різних структур регуляторів. Інтерес становить дослідження ПІД- та МРС-регуляторів в умовах варіації параметрів об'єкта керування відносно номінальних значень, оскільки це безпосередньо впливає на практичну придатність алгоритмів керування.

Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності ПІД- та МРС-регуляторів, синтезованих на основі еталонної моделі, в умовах часткової параметричної невизначеності об'єкта керування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Як у вітчизняній, так і у закордонній науковій періодиці останнім часом зростає кількість публікацій, у яких дослідники застосовують для керування об'єктом модельно-прогностичний регулятор (МРС) [1–5]. При цьому ряд робіт, у тому числі виконаних за участю авторів [5, 6], присвячено порівнянню функціонування системи керування. Так, робота [5] присвячена систематичному огляду та порівняльному аналізу структурно-алгоритмічних особливостей контурів регулювання, зокрема,

розглянуто класичні ПІД-регулятори у порівнянні з МРС. Встановлено, що класичні одновимірні системи керування демонструють недостатню робастність та чутливість до нелінійностей, характерних для нафтопереробних процесів. Показано, що впровадження МРС-систем є більш перспективним напрямом, оскільки вони дозволяють здійснювати оптимізацію в реальному часі з урахуванням обмежень та варіативності процесів.

Робота [6] присвячена дослідженню та порівнянню різних алгоритмів керування для підвищення ефективності процесу розпилювального сушіння. Авторами порівнюється ефективність використання в такій системі нечіткого регулятора та регулятора на основі прогнозуючої моделі (МРС) в цій системі та демонструють, що МРС-регулятор не завжди є найкращим вибором.

Робота [7] присвячена порівняльному аналізу ефективності ПІД-регулятора та модельно-прогностичного регулятора (МРС) для застосування у системах керування чотириколісним транспортним засобом, зокрема, для задач відстеження траєкторії. Автори порівнюють два вказані алгоритми керування рухом транспортного засобу, мета яких – забезпечити точне слідування заданій траєкторії, що є ключовою задачею в розробці автономних транспортних засобів. Результати демонструють, що для завдань керування автономним автомобілем МРС є більш надійним та точним рішенням, порівняно з традиційним ПІД-регулятором, особливо завдяки його здатності працювати з обмеженнями системи.

Дослідження [8] присвячене оцінці ефективності різних алгоритмів автоматичного керування дозуванням медичних препаратів під час критичної фази загальної анестезії. У цій складній та відповідальній системі порівнюється ефективність керування за допомогою ПІД- та МРС-регуляторів. Автори доходять висновку про відсутність переваг МРС-регулятора над ПІД-регулятором для розв'язання цієї задачі та пропонують вдосконалений адаптивний МРС-регулятор з оцінкою параметрів, який демонструє кращу ефективність

порівняно зі стандартним ПІД-регулятором. На нашу думку, причиною вказаної відсутності переваг є висока невизначеність організму пацієнта як об'єкта керування у цій задачі.

Аналізуючи зазначені літературні джерела, можна зробити висновок, що порівнянню традиційного ПІД- та МРС-регуляторів у детермінованих умовах присвячено значну кількість робіт. Проте дослідження, присвячені їхньому функціонуванню в умовах часткової невизначеності, зустрічаються значно рідше, і цей аспект потребує більш детального вивчення.

Слід також відзначити наявність ряду робіт, у яких пропонуються рідні підходи для налаштування ПІД-регулятора, який працюватиме в умовах часткової невизначеності. Наприклад, робота [9] присвячена розв'язанню проблеми використання класичних ПІД-регуляторів – неоптимальності їхнього налаштування для систем зі змінними параметрами. Автор пропонує дослідити алгоритм автоматичного адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора на основі нечіткої логіки. Запропонований алгоритм нечітко налаштованого ПІД-регулятора забезпечує вищу якість регулювання порівняно зі статично налаштованим ПІД-регулятором, а також підвищену стійкість та робастність системи до зміни параметрів об'єкта та зовнішніх збурень.

Методика імітаційного експерименту

Імітаційний експеримент проводився на еталонній моделі об'єкта керування. Такий підхід широко застосовується під час дослідження роботи регуляторів і використаний, наприклад, у [10].

В експерименті досліджувалася система, яка складається з об'єкта керування та відповідних регуляторів – ПІД та МРС. Імітаційний експеримент проводився у середовищі MATLAB Simulink. Особливістю розроблених моделей є використання блоку варіабельної передавальної функції, що дає можливість реалізувати модель за умов параметричної невизначеності. До початку імітаційного експерименту кожен регулятор одержував оптимальні налаштування в

детермінованих умовах засобами самого середовища [11].

У якості моделі об'єкта керування авторами розглянуто модель у вигляді передатної функції ланки другого порядку без запізнення вигляду [12]:

$$W(s) = \frac{k}{s^2 + 2\xi \cdot T \cdot s + T^2}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт підсилення, T – постійна часу, ξ – коефіцієнт демпфування.

Під час проведення серії імітаційних експериментів коефіцієнт $\xi = 1,5$. Це означає, що модель описує аперіодичний процес із загасанням. Постійна часу прийнята рівною одиниці.

Коефіцієнт підсилення (k) використано для внесення параметричної невизначеності у модель об'єкта керування. При визначенні налаштувань регулятора він дорівнював одиниці. У процесі ж самого імітаційного експерименту на нього накладалося рівномірно розподілене відхилення $\pm 10\%$ та $\pm 20\%$ від середнього значення.

Додатково до параметричної невизначеності на модель системи керування подавалася рівномірно розподілена похибка (ϵ), яка імітувала відхилення вхідних та керуючих змінних системи. Розмах такої похибки складав $\pm 10\%$ та $\pm 20\%$ від середнього значення. Структурні схеми моделей MATLAB Simulink для проведення імітаційних експериментів наведено на рисунках 1 і 2.

Таким чином, для кожної з систем регулювання передбачається проведення чотирьох імітаційних експериментів, яких будуть залучені усі комбінації накладеної похибки та параметричної невизначеності. Тривалість кожного імітаційного експерименту – 50 часових одиниць з кроком розрахунку 0,1. Тобто проводилося по 500 обчислень поведінки системи керування.

Аналіз результатів імітаційного експерименту та їх обговорення.

Першим етапом аналізу було виконання графічної побудови результатів імітаційного експерименту.

Результати подані на рисунках 3 – 6:

- рисунок 3 відповідає умовам:
 $k = [0,9 \dots 1,1]$; $\epsilon = [0,9 \dots 1,1]$,
- рисунок 4 – умовам
 $k = [0,9 \dots 1,1]$; $\epsilon = [0,8 \dots 1,2]$,
- рисунок 5 – умовам
 $k = [0,8 \dots 1,2]$; $\epsilon = [0,9 \dots 1,1]$,
- рисунок 6 – умовам
 $k = [0,8 \dots 1,2]$; $\epsilon = [0,8 \dots 1,2]$.

Для більш якісного порівняння ту частину, яка відповідає виходу регулятора на режим, на рисунках не відображено.

Результати імітаційного експерименту показують, що системи з ПІД-регулятором загалом демонструють вищу стабільність в умовах часткової невизначеності, ніж МРС-регулятор. На нашу думку, це пояснюється особливостями алгоритму роботи МРС-регулятора, зокрема лінеаризацією моделі на горизонті прогнозування. Якщо така лінеаризація потрапляє на ділянку зростання або спадання, регулятор починає сильніше відхиляти систему від заданого значення. Проте, ця обставина, на нашу думку, потребує окремого дослідження, яке виходить за межі цієї публікації.

Іншим результатом імітаційного моделювання є встановлення факту, що варіативність вхідної змінної системи викликає більше відхилення вихідних величин, ніж варіативність параметра моделі. Ця обставина узгоджується в цілому з теоретичними положеннями про роботу регуляторів одноконтурних систем керування, оскільки в імітаційному моделюванні, фактично, змінюється завдання для регулятора без зміни його налаштувань, що і має призводити до відхилень.

На другому етапі аналізу за результатами імітаційного моделювання проведено наступні обчислення:

- максимальне значення вихідної змінної об'єкту керування – y^+ ;
- максимальне значення вихідної змінної об'єкту керування – y^- ;
- середнє розрахункове значення вихідної змінної об'єкту керування – y_c ;
- максимальне відхилення вихідної змінної об'єкту керування від номінального значення (одиниці), % – Δ ;
- середнє квадратичне відхилення вихідної змінної об'єкту керування відносно номінального значення, % – σ .

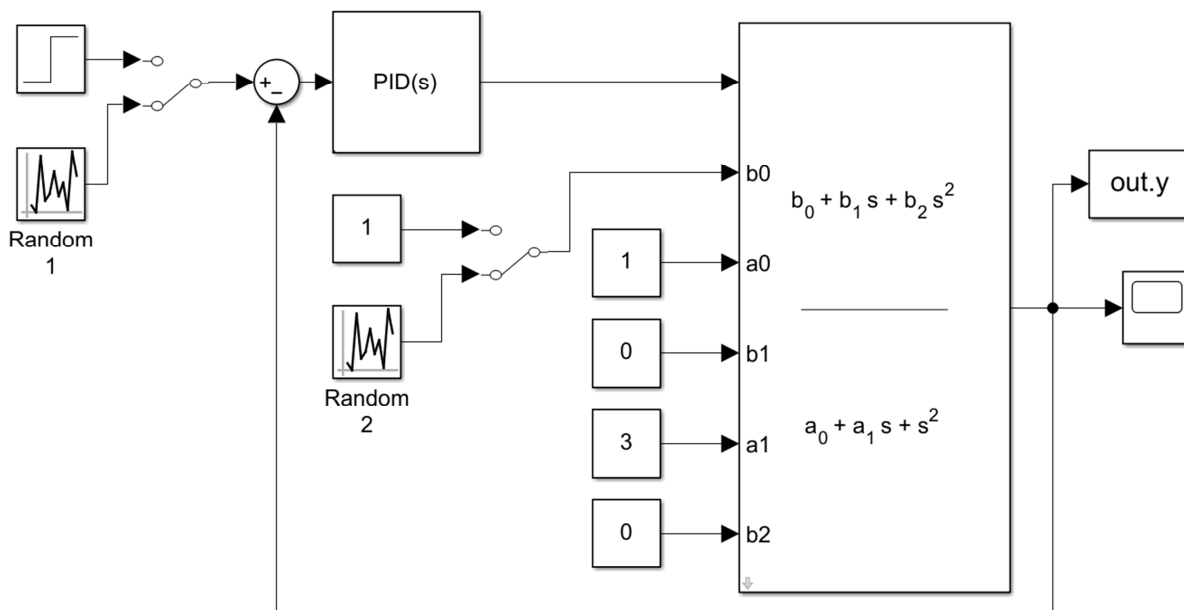


Рисунок 1 – Структурні схеми моделі з ПІД-регулятором у MATLAB Simulink

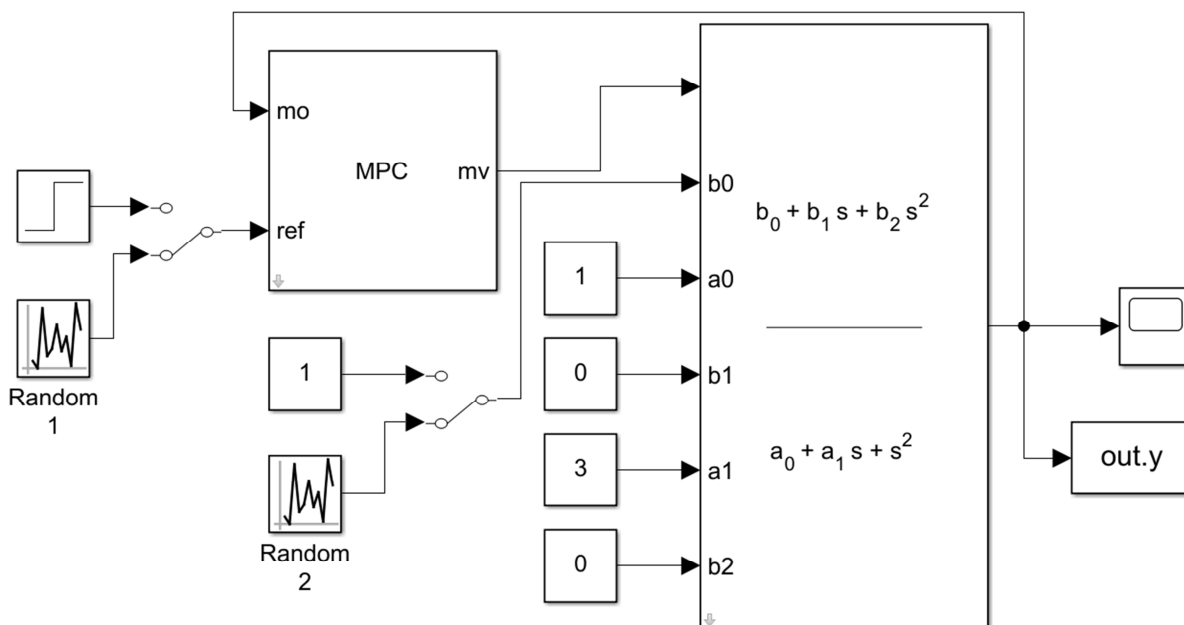


Рисунок 2 – Структурні схеми моделі з MPC-регулятором у MATLAB Simulink

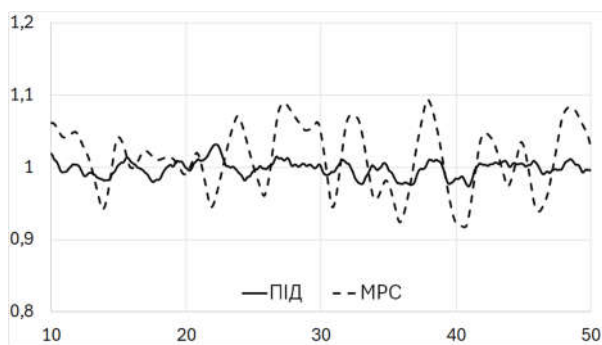


Рисунок 3 – Результати імітаційного моделювання $k = [0,9 \dots 1,1]$; $\varepsilon = [0,9 \dots 1,1]$

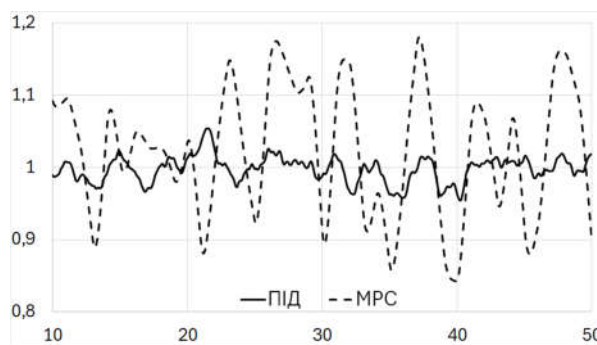


Рисунок 4 – Результати імітаційного моделювання $k = [0,9 \dots 1,1]$; $\varepsilon = [0,8 \dots 1,2]$

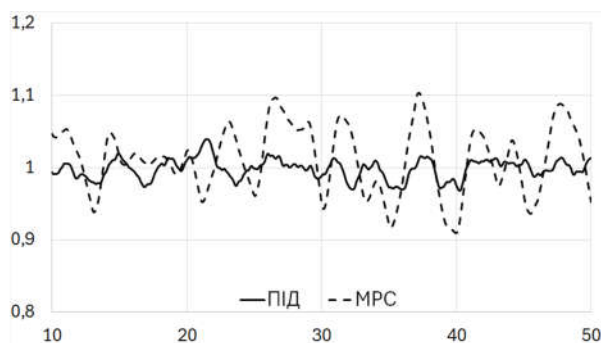


Рисунок 5 – Результати імітаційного моделювання $k = [0,8 \dots 1,2]$; $\varepsilon = [0,9 \dots 1,1]$

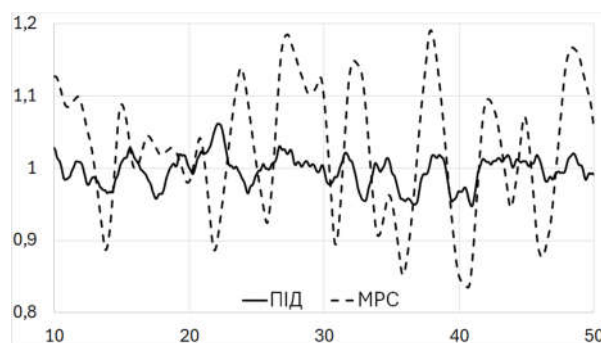


Рисунок 6 – Результати імітаційного моделювання $k = [0,8 \dots 1,2]$; $\varepsilon = [0,8 \dots 1,2]$

Таблиця 1 – Показники системи керування з ПІД-регулятором

k	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$
ε	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$
y^+	1,031	1,054	1,039	1,061
y^-	0,974	0,954	0,969	0,948
y_c	0,9997	0,9985	0,9998	0,9985
$\Delta, \%$	3,13	5,36	3,95	6,11
$\sigma, \%$	1,13	1,82	1,43	2,13

Таблиця 2 – Показники системи керування з МРС-регулятором

k	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$
ε	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,1$	$1 \pm 0,2$
y^+	1,094	1,181	1,104	1,191
y^-	0,918	0,843	0,910	0,835
y_c	1,013	1,026	1,014	1,026
$\Delta, \%$	9,43	18,06	10,38	19,14
$\sigma, \%$	4,38	8,62	4,57	8,81

Результати обчислень показників функціонування системи керування в умовах невизначеності для систем з ПІД-регулятором подано у табл. 1, а для системи з МРС-регулятором – у табл. 2.

Ці обчислення підтверджують сформульовані вище тези щодо вищої стабільності системи з ПІД-регулятором в умовах часткової невизначеності та сильнішого впливу варіативності вхідної змінної у порівнянні з параметричною варіативністю еталонної моделі. Окремою обставиною, яка, на нашу думку, також потребує подальшого дослідження, є те, що система з ПІД-регулятором, в умовах часткової невизначеності показує у середньому нижче значення вихідної величини у порівнянні з еталонним на 0,3 ... 1,5%. Водночас система з МРС-регулятором в умовах часткової невизначеності показує у середньому нижче значення вихідної величини порівняно з еталонним на 1,3 ... 2,6%.

Висновки

1. За однакового рівня оціночної невизначеності відхилення вхідних та керуючих параметрів значно погіршує якість процесу регулювання як у випадку з ПІД-,

так і МРС-регуляторів, ніж параметрична невизначеність об'єкта керування.

2. Оптимально налаштований у детермінованих умовах МРС-регулятор показав в імітаційному моделюванні гіршу стійкість до невизначеності, ніж ПІД-регулятор, як за показником максимального відхилення від завдання, так і за дисперсією вихідної величини.

3. В умовах часткової невизначеності у ході усіх експериментів ПІД-регулятор в середньому демонстрував недорегулювання щодо завдання, хоча й незначне. За таких саме умов МРС-регулятор демонструє більше перерегулювання. На нашу думку, цей факт потребує подальшого дослідження.

4. Також подальшого дослідження потребує вивчення поведінки зазначених регуляторів у експериментах для об'єктів із запізненням.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Жученко О. А., Коротинський А. П., Абрамова А. О., Чепов Д. М. Розробка системи керування випарним апаратом у процесі виробництва оцтової кислоти на базі МРС-регулятора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2023. №1(9). С. 19–26. doi: [10.20998/2079-0023.2023.01.03](https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.03)
2. Kovaliuk, O., Kovaliuk, D. Development of Technological Process Control System Based on Industry 4.0. *2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2021. P. 241–244. doi: [10.1109/ATIT54053.2021.9678884](https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.9678884)
3. Shabde, V. S., Hoo, K. A. Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*, 2008. Vol. 16 №5. P. 541–552. doi: [10.1016/j.conengprac.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.06.004)
4. Zeyu Yang, Liang Hong. Intelligent Vehicle Path Tracking Control Based on Model Predictive Control. *Journal of Research in Science and Engineering (JRSE)*. 2025. Vol.7(3). P. 34–41. doi: [10.53469/jrse.2024.07\(03\).8](https://doi.org/10.53469/jrse.2024.07(03).8)
5. Кубах С. О., Цапар В. С. Аналіз існуючих систем керування технологічним режимом процесу нафтопереробки. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. Вип. 3. С. 57–73. doi: [10.20535/2617-9741.3.2024.312421](https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2024.312421)
6. Ситніков О. В., Складанний Д. М., Плашихін С. В., Соколов К. І. Порівняння ефективності сучасних регуляторів у системі керування розпилювальною сушаркою. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. №1. С. 35–41. doi: [10.20535/2617-9741.1.2024.300982](https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300982)
7. Purohit A. Shet R.M., Iyer N.C., Nissimgoudar P.C. Comparative Study of PID and MPC Controller on Four Wheel Vehicle. In: Abraham A., Bajaj A., Hanne T., Siarry P., Ma K. (eds) *Intelligent Systems Design and Applications. ISDA 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 1051. Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-031-64850-2_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-64850-2_35)
8. Aubouin–Pairault B., Fiacchini M., Dang Thao. PID and Model Predictive Control Approach for Drug Dosage in Anesthesia During Induction: a Comparative Study. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58 (7). P. 210–215. doi: [10.1016/j.ifacol.2024.08.036](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.036)
9. Гарасимів В. М. Алгоритм налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки. *Методи та прилади контролю якості*. 2020. №2(45). С. 102–108. doi: [10.31471/1993-9981-2020-2\(45\)-102-108](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108)
10. Єфіменко Л. І., Тиханський М. П., Тиханська А. М. Адаптивна система керування з еталонною моделлю котлоагрегату. *Вісник Криворізького національного університету*, 2023. вип. №21(1), С. 158–162. doi: [10.31721/2306-5451-2023-1-56-158-162](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-158-162)
11. Коржик М. В. Моделювання об’єктів та систем керування засобами MatLab: Київ: НТУУ “КПІ”. 2016. 174 с.
12. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. 144 с.

References

1. Zhuchenko, O., Korotynskyi, A., Abramova, A., Chepov, D. Development of the evaporator control system in the acetic acid production process based on the mpc-regulator. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. 2023. №1(9). P. 19–26. doi: [10.20998/2079-0023.2023.01.03](https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.03) [in Ukrainian]
2. Kovaliuk, O., Kovaliuk, D. Development of Technological Process Control System Based on Industry 4.0. *2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2021. P. 241–244. doi: [10.1109/ATIT54053.2021.9678884](https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.9678884)
3. Shabde, V. S., Hoo, K. A. Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*, 2008. Vol. 16 №5, P. 541–552. DOI: [10.1016/j.conengprac.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.06.004)
4. Zeyu Yang, Liang Hong. Intelligent Vehicle Path Tracking Control Based on Model Predictive Control. *Journal of Research in Science and Engineering (JRSE)*. 2025. Vol.7(3). P. 34–41. doi: [10.53469/jrse.2024.07\(03\).8](https://doi.org/10.53469/jrse.2024.07(03).8)
5. Kubakh, S., Tsapar, V. Analysis of existing control systems for the technological regime of the oil refining process. *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*. 2024. Vol. 3. P. 57–73. doi: [10.20535/2617-9741.3.2024.312421](https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2024.312421) [in Ukrainian]
6. Sytnikov O., Skladanny D., Plashykhin S., Sokolov K. Comparison the modern controllers' efficiency for the spray dryer's control system. *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*. 2024. №1. P. 35–41 doi: [10.20535/2617-9741.1.2024.300982](https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300982) [in Ukrainian]
7. Purohit, A., Shet, R.M., Iyer, N.C., Nissimgoudar, P.C. Comparative Study of PID and MPC Controller on Four Wheel Vehicle. In: Abraham A., Bajaj A., Hanne T., Siarry P., Ma K. (eds) *Intelligent Systems Design and Applications. ISDA 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol 1051. Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-031-64850-2_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-64850-2_35)
8. Aubouin-Pairault, B., Fiacchini, M., Dang Thao. PID and Model Predictive Control Approach for Drug Dosage in Anesthesia During Induction: a Comparative Study. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58 (7). P. 210–215. doi: [10.1016/j.ifacol.2024.08.036](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.036)
9. Garasumiv V. M. Algorithm of adjustment of sub-regulator coefficients with fuzzy logic methods using. *Methods and devices of quality control*. 2020. №2(45). P. 102–108. doi: [10.31471/1993-9981-2020-2\(45\)-102-108](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108) [in Ukrainian]
10. Yefimenko, L., Tykhanskyi, M., Tykhanska, A. Adaptive control system with reference model of the boiler unit. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. №21(1). P. 158–162. doi: [10.31721/2306-5451-2023-1-56-158-162](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-158-162) [in Ukrainian]
11. Shtifzon, O. Y., Novikov, P. V., Bun, V. P. *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2020. 144 p. [in Ukrainian]
12. Korzhyk, M. V. *Modeliuvannia ob'ektiv ta system keruvannia zasobamy MatLab*: Kyiv: NTUU “KPI”. 2016. 174 p. [in Ukrainian]

STUDY PID AND MPC CONTROLLERS' OPERATION BASED ON A REFERENCE MODEL UNDER PARTIAL UNCERTAINTY CONDITIONS

Skladannyi D. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3624-5336>
e-mail: skladannyi.denys@iit.kpi.ua

Tsapar V. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>
e-mail: v.tsapar@kpi.ua

Plashykhin S. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0039-3302>
e-mail: psv-ihf@iit.kpi.ua

Onyshchenko D. S.

Postgraduate Student
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-4276-4443>
e-mail: ods-ihf@edu.kpi.ua

Abstract. The object of research in this paper is a single-loop automated control system based on a reference model. The aim of this paper is to conduct a comparative analysis of the effectiveness of PID- and MPC-controllers synthesised based on a reference model under partial parametric uncertainty of the control object conditional. An overview of a number existing domestic and foreign studies in the field of using PID- and MPC-controllers for analysis and comparison is provided. A simulation experiment is set up and implemented for a control system with two uncertainty sources: input value and reference model parametric uncertainty. The experiment is implemented using MATLAB Simulink software based on a second-order reference model with epy unit coefficients, which describes an aperiodic process with damping. The variation range of imposed deviations is 10% and 20%, and the experiment duration is 50-time intervals. The first stage of the analysis is the graphical representation of the simulation experiment results. The results show that systems with a PID controller generally demonstrate higher stability in partial uncertainty conditions than an MPC-controller. In our opinion, this is explained by the peculiarity of the MPC-controller's algorithm, particularly the model linearisation on the forecast horizon. At the second stage of the analysis, calculations were performed which show that, on average, a system with a PID-controller exhibits a lower output value compared to the reference value by 0.3 ... 1.5% under conditions of partial uncertainty. At the same time, the system with an MPC-controller, on average, under partial uncertainty conditions, shows a lower output value compared to the reference value by 1.3 ... 2.6%. Thus, at the same estimated level of uncertainty, deviations in input and control parameters have a higher negative impact on the control process quality than the parametric uncertainty of the controlled object. In a simulation experiment, the MPC controller showed worse stability under conditions of uncertainty than the PID-controller. Under conditions of partial uncertainty, the PID-controller showed, on average, under-regulation compared to the task, while the MPC-controller showed over-regulation.

Keywords: parametric uncertainty, PID-controller, model-predictive controller, simulation experiment, MATLAB Simulink.



**Математичне моделювання,
обчислювальні методи, оптимальне
керування та дискретні структури**

Прийнято 07.09.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

UDK 62-97; 519.876.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-169-177

APPLICATION OF DIFFERENTIAL EQUATION SYSTEMS TO SOCIO-ECOLOGICAL PROCESS RESEARCH

Oliinyk A. P.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
76018, 57 Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1031-7207>
e-mail: andrii.oliinyk@pnu.edu.ua

Grygorchuk G. V.

Doctor of Philosophy, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1674-9828>
e-mail: grygorchuk.galyna@gmail.com

Grygorchuk L. I.

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0924-5090>
e-mail: grygorchukl@gmail.com

Abstract. The article examines the application of mathematical modeling methods for analyzing socio-ecological systems based on a system of linear differential equations with constant coefficients. The proposed model describes the interaction among three key factors: regional population size, environmental pollution levels, and the state of the flora. The Lotka–Volterra approach is employed to construct the system, allowing for the investigation of solution stability and the system’s behavior in response to initial conditions and parameters. The methodology involves determining the model coefficients through expert assessments combined with Kendall’s concordance criterion, ensuring the

Запропоноване посилання: Oliinyk, A. P., Grygorchuk, G. V. & Grygorchuk, L. I. (2025). Application of differential equation systems to socio-ecological process research. *Methods and devices of quality control*, 2(55), 169-177. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-169-177

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

reliability of the obtained results. Examples of using statistical data are provided, along with explanations of how modifications to initial conditions influence the stability of socio-ecological systems. Special attention is given to challenges arising from stiff systems, which are caused by significant differences in the eigenvalues of the coefficient matrix. To address this issue, a coefficient normalization approach is proposed. The results are of practical importance for predicting the dynamics of socio-ecological processes and supporting decision-making regarding sustainable natural resource management. The proposed model can be applied to evaluate ecological balance, develop pollution reduction strategies, and ensure the sustainable development of regional systems.

Keywords: socio-ecological systems, mathematical modeling, system of differential equations, Lotka–Volterra model, stability, expert assessment, Kendall criterion.

Introduction

In the simulation of the behavior of ecological and social systems of widespread use, methods of mathematical modeling and, in particular, methods of ordinary differential equations have been applied. The most historically high priority is the work of Lotka and Volterra [2,7], and also, differential models are given in [1, 3].

The main task is to construct the models which give the adequate possibility to describe the processes, one's quality characteristics. It is the first step of such processes investigations, future researching will be connected with the applying statistical data to receive the real characteristics of studying processes. So, such article has the model and theoretical character, which consider the theoretical models.

Another questions is to consider the possibility of applying the system of linear differential equations with the constant coefficients to design the practical processes. It is considered the main theoretical conceptions from the point of view of adoption to solve the practical problems.

The possibilities for describing real objects using systems of ordinary differential equations are considered, among be ass of linear systems with constant coefficients is allocated. This allows us to build relatively simple models that really reflect the picture of phenomena and systems being modeled.

Purpose of the Study

The purpose of this study is to develop a mathematical model of a socio-ecological system based on linear differential equations to analyze the interaction between key environmental factors and determine the

conditions for the sustainable development of the region. The proposed model enables the assessment of ecological balance, prediction of dynamic changes in key indicators, and supports decision-making processes regarding the sustainable use of natural resources.

Analysis of Modern Foreign and Domestic Research and Publications

The historical background of modeling the interaction between population–environment–biota is closely related to the Lotka–Volterra approach and the subsequent development of differential models in applied studies. In the context of this work, systems of ordinary differential equations (ODEs) with constant coefficients are used as the basic tool for describing dynamics and analyzing the stability of socio-ecological systems. This is emphasized in the Introduction with references to the classical works [2] and methodological sources [1, 3], which form the methodological foundation of the modeling approach.

Among modern international approaches, several trends are particularly significant:

- Agent-based (individual-based) modeling to reproduce micro-level behavior and its macro-level consequences [5];
- Integrated frameworks for global sustainability that combine social and natural subsystems [6];
- Studies of critical transitions and tipping points in complex socio-ecological systems [7];
- The Ostrom framework for analyzing the sustainability of SES [8];
- Comparative reviews of modeling approaches for integrated environmental assessment (system dynamics, ABM, ODE-based models, etc.) [9];

- Theoretical foundations of adaptive capacity and resilience [10];
- The panarchy theory as a multiscale approach to ecosystem–society transformations [11];
- New challenges and opportunities for modeling coupled human–natural systems [12].

These studies define the modern context and justify the combination of linear ODE models with scenario-based or expert-driven parameter calibration.

Domestic contributions are represented mainly by methodological works in higher mathematics and experimental planning [1, 3], as well as general principles of scientific research [4], which provide the mathematical tools for model construction, identification, setting initial conditions, and validating data consistency. Combined with the expert-based approach, these works create a foundation for parameterizing socio-ecological models under conditions of limited observations.

A separate area involves methods for determining model coefficients based on expert assessments with consistency control using Kendall's concordance coefficient. The article provides the corresponding formula and practical insights regarding threshold values, which make it possible to validate the calculated weights and avoid issues related to stiff systems by scaling the parameters. This directly supports the approach proposed by the authors for model identification and stability analysis.

Thus, existing international frameworks (SES-framework, panarchy, tipping points, ABM) complement the chosen toolkit of linear ODEs and justify the use of expert-oriented parameter identification for practical regional applications, while domestic methodological sources provide the formal mathematical and experimental foundations required for effective modeling.

Methods

The system described by three differential equations with respect to functions is considered: $x(t)$ - population in the region; $y(t)$ - level of pollution and other harmful effects on the environment caused by

population activity; $z(t)$ - the level of the flora of the region (trees, forests, gardens, etc.). We write down a system of differential equations that describes the change in the time of the functions $x(t)$, $y(t)$, and $z(t)$.

We use systems of linear differential equations with constant coefficients. Change in $x(t)$ per unit of time is written as an equation.

$$\frac{dx}{dt} = Ax - By + Cz. \quad (1)$$

Equation (1) can be interpreted as follows: the population of the region increases (decreases) in proportion to $x(t)$ ($A > 0$ increases, $A < 0$ decreases); decreases in proportion to the level of pollution and other harmful effects of human activity $y(t)$ $B > 0$: increases proportionally to the magnitude of the character of the flora (green plantations, forests, orchards, cities of the region, etc.); $C > 0$. The coefficients A , B and C of the simplest model are considered constant, in more complex models they are considered functions of time, determined experimentally. The speed of the change $y(t)$ can be described as follows (taking into account model [3]):

$$\frac{dy}{dt} = Dx - Ez, \quad (2)$$

which can be commented as follows: the speed of the level of harmful effects changing on the environment is proportional to the population in the region (coefficient D take into account both the vital activity of the population and the results of the functioning of industrial objects of the region), $D > 0$, and have a decreasing depends on flora condition region – as already mentioned (forests, gardens, garden cultures, etc.) $E > 0$.

The speed of change for $z(t)$ can be described using the third differential equation

$$\frac{dz}{dt} = Hx - Gy + Fz, \quad (3)$$

that takes into account the following formulas: (the qualitative quantity of the characteristic of the flora condition $z(t)$ depends on the following factors: population size $x(t)$. In this case, when choosing the values and the magnitude of the coefficients H the level of environmental consciousness of the population should be taken into account,

at a high level, when worrying about the state of the land plots by the population compensates for the regulation of its life and the functioning of industrial enterprises $H > 0$, at a low level (little attention is paid ignorance of ecology.) $H < 0$ for other factors on the change $z(t)$ is the level of pollution $y(t)$, obviously $G > 0$, as well as from the real state of the flora $z(t)$, $F > 0$. Taking to account this third equation it is possible so the system can be written in the form :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax - By + Cz \\ \frac{dy}{dt} = Dx - Ez \\ \frac{dz}{dt} = Hx - Gy + Fz \end{cases} \quad (4)$$

Such system can be solved using the analytical solution without the applying of numerical methods.

For the correct problem statement of modeling, it is necessary to set initial conditions

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ y(0) = y_0, \\ z(0) = z_0 \end{cases} \quad (5)$$

which can be determined from statistical data on the population size, level of pollution, and the state of the flora of the region. It should be noted that in the system (4), it is necessary to clearly define in which units the characteristics $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ are defined to understand the coherence of the coefficients. One way of resolving this point is to choose monetary equivalents for $x(t)$, $y(t)$, and $z(t)$ – for example, losses from environmental pollution by harmful products, and estimating the profit from the amount and condition of green areas in the region. The system (4) with initial conditions (5) can be analyzed from the point of view of the possible behavior of its solutions. In particular, the desired option is to output the value of $x(t)$, $y(t)$, and $z(t)$ to a certain stable level – from a mathematical point of view, it is desirable to fulfill the condition:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_\infty; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_\infty; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_\infty. \end{cases} \quad (6)$$

The right-hand sides of (5) and (6) are different – the state of $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, is determined by the initial conditions, but does not equal this initial value. The analysis of the system (4) with the conditions (5) allows us to establish the mathematical relation on the matrix coefficient of the equations system (4), for which the given solutions will be as shown in Fig.1 To this end, we write the characteristic equation of the system (4) [3]:

$$\det \begin{vmatrix} A-\lambda & -B & C \\ D & -\lambda & -E \\ H & -G & F-\lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

which is equivalent

$$\lambda(\lambda - F)(A - \lambda) - CDG + BEH + CH\lambda - EG(A - \lambda) + DB(F - \lambda) = 0. \quad (7')$$

It is necessary to consider all possible variant of solution (7') – three real roots or one real and two complex. The case shown in Fig. 1 corresponds, for example, to the following condition: one of the three roots of the equation (7) is equal to zero, and the other two - either valid negative or integral with a negative valid part:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0 \\ \lambda_2 < 0; \\ \lambda_3 > 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_1 = 0 \\ \operatorname{Re} \lambda_2 < 0. \\ \operatorname{Re} \lambda_3 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

in the case of (4) $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ at a rate satisfying condition (5), monotonically increasing or decreasing.

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = 0 \\ \lambda_3 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

The values in (24), (25) are also functions of the initial conditions (5) and the coefficients of the system (4).

However, case (9) is not guaranteed to cause the condition of stabilization (6), therefore the main option guaranteeing fulfillment (6) is a set of conditions (8).

$$\lambda^3 + \lambda^2(A + F) - \lambda(FA - CH - GE + DB) + (BDF - EGA + BEH - CDG) = 0; \quad (10)$$

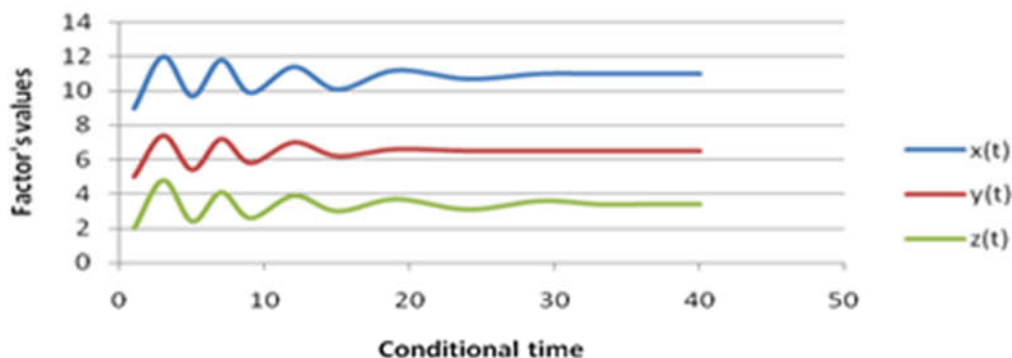


Figure 1 – Distributions of the factor conditional values

$$BDF-EGA+BEH-CDE=0. \quad (11)$$

Then it can be look like:

$$\lambda^3 + \lambda^2(A+F) - \lambda(FA-CH-GE+DB) = 0. \quad (12)$$

$\lambda = 0$, a to find the other two roots we have an equation:

$$-x^2 + (A+F)x - (FA-CH-GE+DB) = 0. \quad (13)$$

Then

$$\lambda_{2,3} = \frac{-(A+F) \pm \sqrt{(A+F)^2 - 4(FA-CH-GE+DB)}}{-2} = \frac{(A+F) \mp \sqrt{(A+F)^2 - 4(FA-CH-GE+DB)}}{2}. \quad (14)$$

If

$$D = (A+F)^2 - 4(FA-CH-GE+DB) < 0, \quad (15)$$

to $\lambda_{2,3}$ – complex roots and for use of the second of the conditions (8) it is necessary to:

$$\text{Re } \lambda_2 = \text{Re } \lambda_3 = \frac{A+F}{2} < 0. \quad (16)$$

Thus, for case (15) for stabilization $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (fig.1) it is necessary to fulfill the conditions (11) and (15), (16). For the case:

$$D = (A+F)^2 - 4(FA-CH-GE+DB) > 0. \quad (17)$$

To fulfill the first conditions (8) it is necessary to:

$$\begin{cases} A+F + \sqrt{D} < 0 \\ A+F - \sqrt{D} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Conditions (18) give the demanding of receiving the solutions with the properties of stability, it is very important for finding the limited solutions.

Therefore, in this case, to fulfill the condition of stabilization $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ the conditions are necessary.

For case (9) it is necessary that in the equation (10) the free term be equal to zero (condition (11)), and also the coefficient at X:

$$FA-CH-GE+DB=0. \quad (19)$$

Then equation (10) takes the form of:

$$-\lambda^3 + \lambda^2(A+F) = 0,$$

So:

$$-\lambda + F + A = 0. \quad (20)$$

So, to fulfill condition (9) it is necessary that:

$$F + A < 0. \quad (21)$$

However, case (9) provides for the stimulation of functions

$$x(t), y(t), z(t) \quad (22)$$

look like:

so:

$$\begin{cases} x(t) = a_1 + b_1t + c_1e^{\lambda t} \\ y(t) = a_2 + b_2t + c_2e^{\lambda t} \\ z(t) = a_3 + b_3t + c_3e^{\lambda t} \end{cases} \quad (23)$$

and there is an additional condition either:

$$b_1 = b_2 = b_3 = 0 \quad (24)$$

or

$$b_1 \ll 1; b_2 \ll 1; b_3 \ll 1. \quad (25)$$

Results and models accuracy theoretical research

The practical implementation of the published models requires data on the values of the coefficients of the matrix of systems (4). To solve this problem, either static data on the relationship between the corresponding values or the method of expert assessments, which in this case may be the next among a wide range of experts, is used.

The schedule can look like in the figure 1.

The following poll is conducted: they are asked to rank numbers in order of importance for the coefficients, as shown in Table 1:

Table 1 – Importance of mutual influence, between values $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$

	E_1	E_2	E_3	...	E_{n-1}	E_n	\sum
A	2	1	2		8	3	X_1
B	5	3	5		7	1	X_2
C	3	8	4		5	4	X_3
D	6	5	7		4	2	X_4
E	1	2	8		1	6	X_5
F	7	7	1		3	5	X_6
G	8	6	3		2	7	X_7
H	4	4	6		6	8	X_8

After conducting this survey for each of the coefficients A, B, C, D, E, F, G, H, is its total score X_i ; and $i = 1, \dots, 8$, and the value of the corresponding coefficient, for example, of the coefficient D, is obtained by the formula:

$$D = \frac{x_4}{\sum_{i=1}^8 x_i} \quad (26)$$

This allows us to obtain the values of the coefficients of the matrix of system (4) in the form of numbers distributed on the segment $[0; 1]$:

$$A = \frac{x_1}{c}; B = \frac{x_2}{c}; C = \frac{x_3}{c}; D = \frac{x_4}{c};$$

$$E = \frac{x_5}{c}; F = \frac{x_6}{c}; G = \frac{x_7}{c}; H = \frac{x_8}{c}, \quad (27)$$

where $c = \sum_{i=1}^8 x_i$.

After determining the coefficients (27), the implementation of the stabilization conditions is checked. If the above conditions are not met, then changes in the coefficients are made, or conducting surveys for a wider range of experts. In the analysis of the results obtained by the given values of the elements of the matrix of system (4), if necessary, the initial conditions (5) are mixed to obtain the desired values (6).

In fact, this means that the necessary values of the initial conditions that guarantee the stable development of the socio-economic system are established.

The Kendall criterion is used to control the consensus of experts: the coefficient of concordance is calculated by such formula:

$$K = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (28)$$

where

$$S = \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2, \quad (29)$$

$$d_i = \sum_{j=1}^m v_{ij},$$

v_{ij} – range of the i -th factor in the j -th expert, d_i – the sum of ranks i -th factor in all m experts;

n – number of indicators; m is the number of experts.

\bar{d} – the average level of all criterion.

If K is greater than 0.75, then the consistency in the indicators of experts is considered satisfactory [5]. Such a method is called the expert assessment method

It should be noted that there is a case in which the elements of the matrix of system (4) are unquestionable in relation to their values for example, the value of the coefficient D can be deduced from Table 1, since it can be directly determined from statistical data. In this case, the following method is proposed to establish the real values of the coefficients: the coefficients that can be determined by the methods are deduced from the table. In this case, in Table 1, the number of rows is reduced, and then the implementation of the methodology for evaluating the importance is implemented. In order to ensure the adequacy of the model and the same order of values of the coefficients, all other coefficients defined on the interval $[0; 1]$ are scaled by the magnitude of the coefficient, which is removed from the table by the formula:

$$K = \tilde{A}^* K_i, \quad (30)$$

where K_i – the value of the coefficient on the segment $[0; 1]$;

A – the value of the coefficient, which is determined without the application of the expert estimation method. This avoids the problems associated with the peculiarities of

rigid systems of differential equations, which are characterized by a significant spread between the values of the eigenvalues of the matrix of the system, and, as a result, a significant spread in the rate of change of functions, which are solutions of the system [4]. For example, considering the simplest simulated system:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 100x \\ \frac{dy}{dt} = 0,001y \end{cases} \quad (31)$$

the solving of which is:

$$\begin{cases} x = x_0 e^{100t} \\ y = y_0 e^{0,01t} \end{cases} \quad (32)$$

Obviously, these functions have different growth rates - for the same controlled time of time [0; 5], the function $y(t)$ does not change at all while $x(t)$ exponentially grows (like e^{100t}). The approach described in the Table 1, with the use of (26) and (27), allows avoiding the problems associated with the rigidity of systems. If some elements of the matrix of the system (4) are determined experimentally, and at the same time they have a significant spread, then to obtain an objective model, it is necessary to use such methods and methods of processing experimental data as the method of reference to the experiment and the method of Himmelblau [6], discarding abnormal values. However, this situation is not specific to real socio-ecological systems. Typically, in such

cases, we are aware of several characteristics, and a scaling coefficient system (4) should be used to maximize the ratio.

Conclusions

It was shown that the method of systems linear differential equations with the constant coefficients applying allows to construct the models of real socio-ecological system. It was shown that the applying of the methods, which based on the systems of ordinary differential equation allows to receive the solutions, which satisfied the condition of stability – very important moment to real processes in socio- economical systems and by the using the presented method of model coefficient definition to receive the results which demonstrate the good agreement in describing the behavior of real processes.

To check the model's adequacy the method of expert marks is used; it allows to defined the model's coefficients value which correspond to real process and systems characteristics;

The Kendall criterion allows to show the good agreement of expert's point of view on the tested processes.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

References

1. Pak V. V., Nosenko Yu. L. Higher Mathematics. D. Stekler, 1997. 560 p. [in Ukrainian]
2. Hairer E., Norsett S., Wanner G. The Solution of Ordinary Differential Equations. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 1997. 572 p.
3. Anistratenko V. O., Fedorov V. G. Mathematical Planning of Experiments in APC. Kyiv: Higher School, 1993. 374 p. [in Ukrainian]
4. Doroshenko V. M. Fundamentals of Scientific Research. Kyiv: ISDO, 1993. 128 p. [in Ukrainian]
5. Grimm V., Railsback S. F. Individual-Based Modeling and Ecology. Princeton University Press, 2013.
6. Liu J., Dietz T., Carpenter S. R., et al. Systems integration for global sustainability. *Science*. 2015. Vol. 347(6225). 1258832. doi: [10.1126/science.1258832](https://doi.org/10.1126/science.1258832)
7. Dakos V., et al. Ecosystem tipping points in complex socio-ecological systems. *Nature Ecology & Evolution*. 2019. Vol. 3(3). P. 355–362. doi: [10.1038/s41559-019-0793-7](https://doi.org/10.1038/s41559-019-0793-7)
8. Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of socio-ecological systems. *Science*. 2009. Vol. 325(5939). P. 419–422. doi: [10.1126/science.1172133](https://doi.org/10.1126/science.1172133)

9. Schlüter M., et al. Challenges and opportunities for modeling human-natural systems. *Ecological Modelling*. 2020. Vol. 43. 109262. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2020.109262](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109262)
10. McGinnis M. D., Ostrom E. Social-Ecological Systems Framework: A multi-step methodological guide. *Ecology & Society*. 2023. Vol. 27(4). URL: <https://ecologyandsociety.org/vol27/iss4/art39>
11. Froese R., Andrino A., et al. Describing complex interactions of social-ecological systems for tipping point assessments: An analytical framework. *Frontiers in Climate*. 2023. Vol. 5. doi: [10.3389/fclim.2023.1145942](https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1145942)
12. Milkoreit M., Hodbod J., Baggio J. A., et al. Defining tipping points for social-ecological systems scholarship – an interdisciplinary literature review. *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17(3). doi: [10.1088/1748-9326/aaaa75](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaa75)
13. Rounsevell M. D. A., Robinson D. T., Murray-Rust D. From actors to agents in socio-ecological systems models. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2012. Vol. 367(1586). P. 259–269. doi: [10.1098/rstb.2011.0187](https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0187)
14. Schulze J., Müller B., et al. Agent decision-making: The elephant in the room — enabling the justification of decision model fit in social-ecological models. *Environmental Modelling & Software*. 2023. Vol. 165. 105759. doi: [10.1016/j.envsoft.2023.105759](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105759)

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ У ДОСЛІДЖЕННІ СОЦІО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Олійник А. П.

Доктор технічних наук, професор
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
76018, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1031-7207>
e-mail: andrii.oliinyk@pnu.edu.ua

Григорчук Г. В.

Доктор філософських наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0003-1674-9828>
e-mail: grygorchuk.galyna@gmail.com

Григорчук Л. І.

Кандидат педагогічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0924-5090>
e-mail: grygorchukl@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто застосування методів математичного моделювання для аналізу соціо-екологічних систем на основі системи лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Запропонована модель дозволяє описати взаємодію між трьома основними факторами: чисельністю населення регіону, рівнем забруднення довкілля та станом флори. Для побудови системи застосовано підхід Лотки-Вольтерри, що забезпечує можливість дослідження стійкості рішень та поведінки системи залежно від початкових умов і параметрів.

Методика передбачає визначення коефіцієнтів моделі за допомогою експертних оцінок із застосуванням критерію узгодженості Кендалла, що гарантує достовірність отриманих результатів. Наведено приклади використання статистичних даних та пояснено, як модифікація початкових умов впливає на стабільність соціо-екологічних систем. Окрему увагу приділено проблемам жорстких систем, що виникають при значному розходженні власних значень матриці коефіцієнтів, та запропоновано способи їх уникнення за допомогою нормалізації коефіцієнтів. Отримані результати мають важливе практичне значення для прогнозування динаміки соціо-екологічних процесів та прийняття управлінських рішень щодо оптимізації використання природних ресурсів. Запропонована модель може застосовуватися для оцінювання екологічної рівноваги, планування заходів зі зменшення рівня забруднення та підтримки стійкого розвитку регіону.

Ключові слова: соціо-екологічні системи, математичне моделювання, система диференціальних рівнянь, модель Лотки-Вольтерри, стабільність, експертні оцінки, критерій Кендалла.



Комп'ютерні технології та системи

Прийнято 02.10.2025. Прорецензовано 21.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 622.242.6, 681.5.015

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-178-189

ОЦІНКА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНО-ПОРІВНЯЛЬНОГО МЕТОДУ ОБРОБКИ КАРОТАЖНИХ ДАНИХ

Петришин Р. І. *

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-2770-6656>
e-mail: romeopetryshyn@gmail.com

Мельник В. Д.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7567-5625>
e-mail: vitalii.melnyk@nung.edu.ua

Шекета В. І.

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1318-4895>
e-mail: vasyi.sheketa@nung.edu.ua

Халєєв Д. М.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0001-4548-231X>
e-mail: dmytro.khalieiev-a174-23@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Петришин, Р. І., Мельник, В. Д., Шекета, В. І., Халєєв, Д. М., Тріщ, В. В. & Богдан, О. Т. (2025). Оцінка особливостей застосування класифікаційно-порівняльного методу обробки каротажних даних. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 178-189. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-178-189

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Трищ В. В.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-8564-1752>

e-mail: vlad.trishch@gmail.com

Богдан О. Т.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 19, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-9539-6359>

e-mail: oleksiibohdan@gmail.com

Анотація. У нафтовидобувній галузі об'єктом дослідження є виявлення параметричної схожості та відмінностей між свердловинами з метою підвищення точності геологічного моделювання, оптимізації бурових робіт і прогнозування продуктивності пластів. У статті представлено модель для класифікації та порівняння каротажних даних свердловин на основі сучасних методів машинного та глибокого навчання. Наведено аналітичний огляд існуючих підходів до оцінювання кореляції між свердловинами, зокрема методів ручного аналізу, що базуються на експертних оцінках фахівців галузі, та використання простих коефіцієнтів подібності. Такі методи мають суттєві обмеження, пов'язані з високою суб'єктивністю, низькою відтворюваністю результатів і складністю масштабування на великі обсяги даних. Для подолання зазначених недоліків запропоновано підхід на основі глибокого навчання, який забезпечує автоматизацію процесів аналізу, підтримки та прийняття рішень у дослідженні свердловин. Розроблено модель, що використовує архітектуру рекурентної нейронної мережі (RNN), орієнтовану на обробку послідовних даних і виявлення довгострокових залежностей між ними, з використанням шарів нейронної мережі для оцінки подібності. Запропоновано візуалізацію на основі схем оцінки подібності для пари інтервалів та схему порівняльного навчання на основі триплетних втрат. Ефективність моделі оцінюється за допомогою метрик класифікації та кластеризації, що дозволяє кількісно визначити якість групування свердловин за параметрами подібності. Реалізований підхід є універсальним та надійним методом для впровадження процесу автоматизованого аналізу свердловин, спрямованого на зменшення залучення ручної праці фахівців і підвищення ефективності.

Ключові слова: аналіз свердловин, каротажні дані, глибоке навчання, нейронні мережі, моделювання, методологія, модель, агрегація даних, екстраполяція моделі, оцінка ефективності, автоматизація, прийняття рішень, кластеризація.

Вступ

У сучасному світі нафтогазова промисловість потребує постійного вдосконалення методів аналізу даних для підвищення ефективності видобутку та зменшення ризиків. Одним із ключових етапів є аналіз каротажних даних, що дозволяє отримати інформацію про геологічну будову родовища та властивості порід. Традиційні методи аналізу часто є трудомісткими та суб'єктивними, що призводить до зниження точності та ефективності прийняття рішень. Тому розробка автоматизованих методів аналізу каротажних даних є актуальною та важливою задачею.

У зв'язку з цим, застосування методів машинного (зокрема глибокого) навчання, стає все більш перспективним напрямком досліджень. Глибоке навчання дозволяє

автоматизувати складні процеси аналізу даних, виявляти приховані закономірності та покращувати точність прогнозування. Застосування класифікаційно-порівняльних методів обробки каротажних даних на основі глибокого навчання дозволяє підвищити ефективність аналізу та прийняття рішень у нафтогазовій промисловості.

Мета роботи – розробка моделі класифікації та порівняння каротажних даних свердловин.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Виявлення подібності між свердловинами є необхідною частиною багатьох процедур. Це сприяє розумінню характеристик свердловини, плануванню стратегії

розробки родовища, виявленню аномалій під час процесу буріння, створенню синтетичних даних, наближених до реальних, і багатьом іншим задачам [1,2]. Сучасні методи оцінки кореляції між свердловинами в основному зосереджені на майже ручному аналізі характеристик експертами або оцінці деяких неприродних коефіцієнтів подібності, наприклад, простої евклідової відстані або більш складної ймовірності синхронізації [1]. Спільними для цих класичних підходів є відносно низька складність моделей і, відповідно, наявність обмежень для їх застосування. Вони вимагають складного вибору характеристик вхідних даних і гіперпараметрів моделі. Можливою альтернативою є рішення на основі даних. Такі моделі автоматизують прийняття рішень, зменшуючи кількість ручної праці, та менш схильні до помилок і суб'єктивності [2,3]. Однак, можна адаптувати потужні парадигми для навчання за подібністю [2,4]. Глибоке навчання і нейронні мережі (НМ) стали поширеним інструментом для розв'язання різних проблем. Це пов'язано зі здатністю нейронних мереж витягувати значущі представлення на основі даних і обчислювати подібності об'єктів на основі цих представлень.

Загальною проблемою для НМ є обмежені позначені дані. Проте, сучасні досягнення неконтрольованих і самоконтрольованих парадигм дозволяють дослідникам подолати цю проблему [5]. Ці методи автоматично виділяють ознаки або уявлення і, таким чином, працюють без конкретних суб'єктивних знань експертів.

Проаналізуємо наявні розробки в навчанні подібності, пов'язані з нафтогазовою промисловістю. Зосереджуємося на основних трьох напрямках досліджень, пов'язаних з простими підходами на основі правил, класичними підходами машинного навчання та підходами глибокого навчання. Підхід, заснований на правилах, пропонує визначити логічні правила для кореляції між свердловинами та визначення зон в інтервалах свердловин на основі попередніх знань експертів. Розглядають вирівнювання за допомогою динамічного викривлення часу на основі типових геометрич-

них відстаней [6]. Після вирівнювання кривих експерт вирішує, чи вони схожі. Розроблено також метод оцінки подібності на основі статистичних методів [1]. Незважаючи на те, що згадані підходи досить прості для реалізації та легкі для інтерпретації, вони, в основному, зосереджені на розгляді однієї конкретної особливості добре реєстрованих даних та втрачають цінну інформацію. Крім того, більшість із них вимагає залучення експерта.

В останні роки підходи класичного машинного навчання і глибокого навчання досягли більше успіхів у розробці геологічних моделей. Використовують машину опорних векторів (SVM) для отримання плавного представлення даних, а потім застосовують загальні відстані кластеризації, як відстані Жаккара, для обчислення подібності між мітками свердловин [7]. Найбільш схожі свердловини використовуються для прогнозування каротажу. Хоча метод показує прийнятні результати, підтверджені оцінкою експертів, така модель відстані ігнорує природу даних, покладаючись на ретельно відібрані характеристики. Таким чином, метод не може ідентифікувати представлення свердловини та має обмежену застосовність, адаптовану до розглянутих діапазонів вибраних характеристик. Дослідження [2] запроваджує навчання подібності на основі даних вимірювання під час буріння (MWD) для виявлення аварій під час буріння. Автори демонструють застосування керованого навчання подібності з функціями, створеними експертами: вони агрегують статистику для часових інтервалів і вивчають класифікатор, який передбачає, чи відповідають інтервали різним або схожим аварійним випадкам. Очевидним обмеженням є ручне отримання мічених наборів даних для навчання такої системи, оскільки потрібні сотні мічених аварій.

Завдяки глибокому навчанню штучні нейронні мережі виконують кореляційну оцінку для свердловин. Ці моделі на основі даних використовують різні характеристики як вхідні дані: видобуток нафти, обводненість, тиск нагнітання, характеристики проникності або зображення, отримані з

цифрового каротажу. Нейронна мережа Convolution використовується для прогнозування регіональної проникності на основі набору геологічних особливостей [8].

Виклад основного матеріалу

Для прогнозування взаємозв'язку між видобувними свердловинами та оточуючими нагнітальними свердловинами на основі видобутку рідини та закачування води використовують мережу довготривалої короткочасної пам'яті. Після навчання мережі застосовують методи аналізу чутливості для отримання коефіцієнтів зв'язку між свердловинами.

Вся свердловина містить багато різних підшарів, тому, обчислюючи подібність між підінтервалами двох свердловин і потім об'єднуючи їх, можна дізнатися точніші моделі. Такий підхід є природним вибором, оскільки зазвичай свердловини мають різну довжину.

Розглядається набір даних, який складається з інтервалів свердловин; i -ий інтервал складається з відповідних складових:

$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{il_i})$, $x_{ji} \in R^d$, де l_i є довжина i -го інтервалу, а d – це кількість ознак, зібраних на кожному кроці інтервалу.

Будуємо модель на основі даних, яка приймає як вхідні дані про два інтервали (X_i, X_j) і виводить подібність між цими двома інтервалами $s_{ij} = s(X_i, X_j)$. Якщо інтервали близькі один до одного, модель подібності повинна виводити значення, близькі до 1, в іншому випадку оцінка схожості повинна бути близькою до 0.

Розглядаються два підходи до позначення пар інтервалів для навчання класифікатора подібності:

Для *проблеми зв'язування* очікується виведення класифікатора 1, якщо два інтервали беруть з однієї свердловини, і 0, якщо із двох різних свердловин.

Для *проблеми закритого зв'язування* очікується виведення класифікатора 1, якщо два інтервали беруть з однієї свердловини і є близькі один до одного за глибиною, і 0, якщо вони не відповідають цим двом вимогам.

Двічі запускається рекурентна нейронна мережа (RNN), щоб обробити дані з двох інтервалів і отримати їх вкладення. Щоб оцінити подібність за парою вкладень, використовуються шари нейронної мережі. Під час навчання змінюються параметри RNN і частина оцінки подібності, щоб відповідати цільовим подібностям між парами інтервалів.

Розглядається трійка інтервальних об'єктів: якір, позитивний об'єкт, схожий на якір, і негативний об'єкт, несхожий на якір. Після вкладення триплетних інтервалів модель штрафується, якщо відстань між якорем та негативом менша за відстань між якорем та позитивом.

Через складність дані про нафту та газ вимагають ретельної попередньої обробки. Кроки в цьому контексті включають: 1) заповнення відсутніх значень; 2) роботу з конкретними особливостями каротажу; 3) вибір інтервалів зі свердловини, необхідних для навчання моделі. Потрібен додатковий крок для базових моделей, які потребують значущих ознак як вхідних даних: 4) генерація вектора ознак.

1) *Заповнення відсутніх значень*. Значна частка вимірювань у проаналізованих даних відсутня. Стратегія заповнення може дозволити використовувати більшість доступних даних. Якщо це можливо, заповнюємо кожне пропущене значення попереднім не пропущеним (пряме заповнення), інакше – найближчим доступним майбутнім значенням (зворотне заповнення). Оскільки використовується багато інтервалів для оцінки подібності між свердловинами, ці стратегії забезпечують достатнє покриття для роботи методів.

2) *Робота з особливостями*. Моделі машинного та глибокого навчання зазвичай вимагають обробки даних через специфіку технологічних умов у свердловинах під час каротажу. Попередня обробка включає такі кроки:

1. Виключення фізично неадекватних даних, тобто інтервалів, де питомий електричний опір менший або дорівнює 0.

2. Перетворення усіх даних питомого електричного опору в логарифмічний нормальний масштаб.

3. Нормалізація даних гамма каротажу в кожній свердловині та пласті шляхом віднімання середнього значення та розділення отриманих значень, щоб отримати одиничну дисперсію.

4. Нормалізація інших ознак шляхом віднімання середнього значення та ділення отриманих значень, щоб отримати одиничну дисперсію.

3) *Інтервали вибірки*. Вибираємо пари інтервалів фіксованої довжини 100 вимірювань зі свердловин для основних експериментів. Різниця в глибині між двома послідовними вимірюваннями становить 0,15 фута. Такі методи дозволяють створювати великі навчальні та перевірочні набори пар інтервалів, які можуть бути вирішальними для методів глибокого навчання. Для навчання формуємо стратифіковані вибірки, які мають майже однакову кількість пар подібних і різних інтервалів. Для інших частин експериментів, пов'язаних із побудовою представлення цілої свердловини, розділяємо свердловину на інтервали, що не перекриваються, однакової довжини $l=100$. У загальній класифікації стратегій вибірки можна назвати це стратифікованим варіантом пакетної вибірки для вивчення подібності.

4) *Генерація вектора ознак (якщо необхідно)*. Оскільки розглядаються інтервальні рівні, то слід адаптувати дані для класичних методів машинного навчання. Типовим рішенням проблеми є агрегування ознак на інтервалах з використанням, наприклад, середнього та стандартного відхилення. Отже, кожен інтервал розміром $(100, k)$ відповідає вектору ознак розміру $2k$, де k – це кількість використаних значень. Перші k компоненти відповідають середнім значенням ознак, останні k компоненти відповідають стандартним відхиленням вздовж інтервалу.

Оскільки використовуються моделі глибокого навчання для обробки даних, інтервал трохи більшої або трохи меншої довжини також можна використовувати як вхідні дані для моделі подібності. Конкретна довжина 100 в цілому забезпечує прийнятну якість для побудованих моделей подібності, забезпечує швидку обробку та

є достатньо великою, щоб фіксувати властивості на основі даних журналу. Для різних свердловин маємо різну довжину, тому вибірка дасть нам різну роздільну здатність для кожної свердловини, і відбирається однакова кількість інтервалів для кожної свердловини.

Для отримання подібності дотримуються загальної парадигми сучасного глибокого навчання на основі двофазної моделі з кодувальником на першому етапі та прийняттям рішень на другому етапі. Застосовується модель *кодера* $E_i = f(X_i)$, щоб отримати вкладення для кожного інтервалу. Потім порівнюється вбудовування за допомогою додаткової процедури $s_{ij} = g(E_i, E_j)$ з відсутністю або невеликою кількістю параметрів для оцінки під час навчання. Вихідні дані цієї частини повідомляють про подібність між інтервалами свердловин. На рисунку 1 представлена загальна схема того, як отримуються подібності між двома інтервалами, оціненими моделлю.

Існує два підходи до навчання таких моделей: один метод полягає в тому, щоб змусити модель вирішувати *проблему класифікації* (схожі об'єкти з пари чи ні); інша полягає в тому, щоб перемістити уявлення безпосередньо в латентному просторі.

Природною альтернативою для безпосередньої роботи з представленнями є використання *порівняльного навчання*, зображеного на рисунку 2. Розглянемо набір трійок. Кожен триплет складається з інтервалу прив'язки X_a , додатного інтервалу X_p і від'ємного інтервалу X_n . Їх вибирають так, щоб інтервал прив'язки та додатний інтервал були подібними за мірою подібності.

Формально триплетні втрати дорівнюють

$$\max(d(X_a, X_p) - d(X_a, X_n) - \alpha, 0), \quad (1)$$

де α – маржа: якщо $d(X_a, X_n)$ значно (більш ніж α) менше, ніж $d(X_a, X_p)$, то штрафується обчислена подібність і надалі модель повинна уникати таких ситуацій. Така втрата усереднюється для набору триплетів.

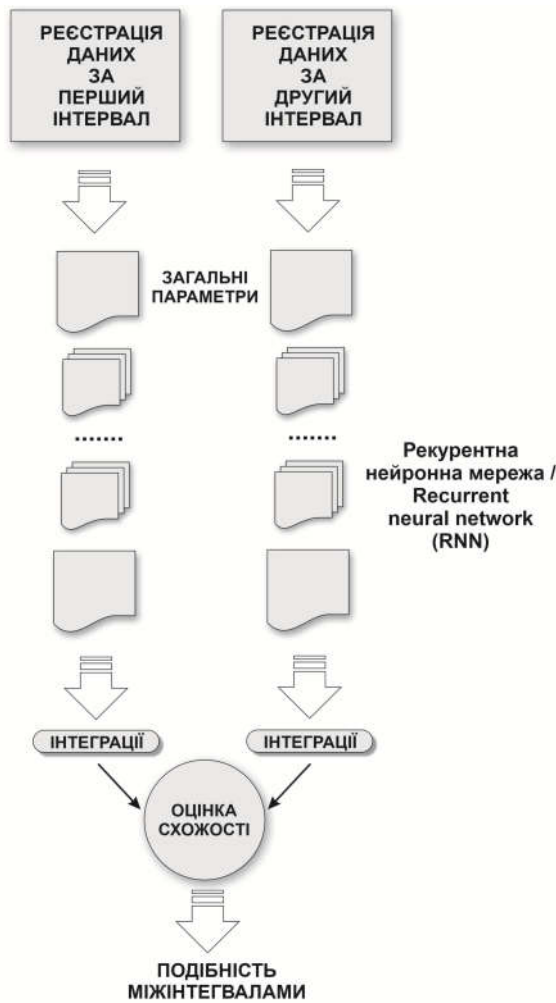


Рисунок 1 – Модель оцінки подібності для пари інтервалів

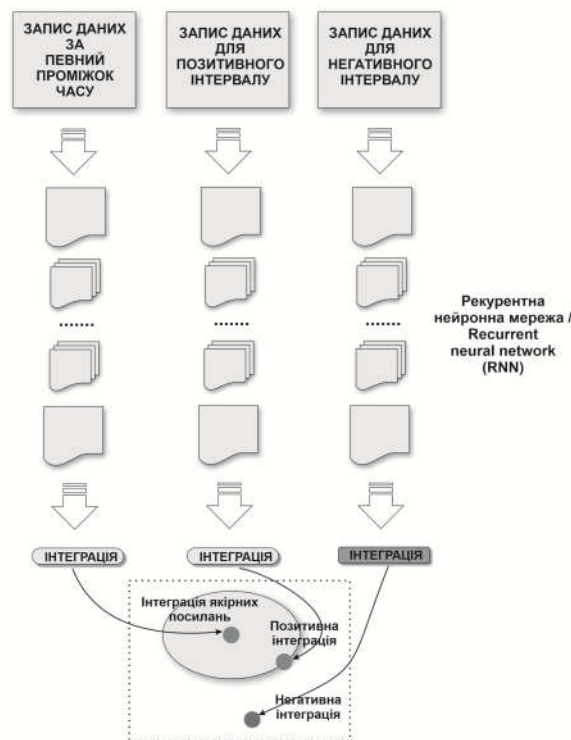


Рисунок 2 – Схема порівняльного навчання

На відміну від наведеного вище підходу на основі класифікації, *триpletна модель*, заснована на втраті триплетів, не вирішує безпосередньо проблеми зв'язування. Тому потрібен класифікатор над триплетною моделлю. Щоб обчислити подібності, оцінюємо евклідову відстань або косинусну відстань між отриманими вкладеннями з триплетної моделі, таким чином приймаючи аналогічну двофазну схему з кодувальником і прийняттям рішень на основі кодувальників.

Найбільш природним вибором для послідовних даних є архітектури моделей, засновані на рекурентних нейронних мережах, таких як рекурентна мережа з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM) [9].

LSTM може фіксувати тимчасові залежності та обробляти довгострокові залежності, які з'являються в даних. Модель обробляє дані каротажу разом із її глибиною послідовно одне за одним спостереженням на певній глибині.

Проаналізуємо два варіанти оцінки схожості. Перший варіант полягає в тому, щоб обчислити евклідову (1) або косинусну (2) відстань, як у базовій лінії, але тепер між вбудовуваннями, щоб отримати подібність. Другий варіант полягає в тому, щоб навчити окрему повністю зв'язану (FC) нейронну мережу оцінювати подібність. Перевагою першого підходу є пряма оцінка відстані, тоді як у багатьох випадках додаткові повністю пов'язані проєкційні шари дозволяють краще представити проміжні шари нейронної мережі.

Розглядаємо два підходи до навчання нейронних мереж: підхід на основі класифікації та підхід на основі порівняння. Основні стратегії агрегації подібностей інтервалів до подібності свердловин. Важливо перенести подібність від рівня інтервалу до рівня свердловини за допомогою належної стратегії агрегування, оскільки, зрештою, потрібні подібності між свердловинами. Щоб використовувати подібність на рівні інтервалу, реалізується наведена нижче процедура. Відокремлюємо для m -ої свердловини послідовні інтервали з даними X_j^m , $j = 1, \dots, k_m$. Те саме можна зробити

для n -ої свердловини. Для кожного такого інтервалу отримуємо вкладення $E_j^m = f_w(X_j^m) \in R^d$. У той же час для пари інтервалів (X_j^m, X_i^m) модель подібності забезпечує оцінку подібності s_{ij} .

Застосовуємо макроагрегацію, якщо агрегуємо вкладення з інтервалу однієї свердловини, а потім отримуємо оцінку подібності для пари свердловин. Наприклад, використовуємо середнє значення для кожного компонента вектора вкладень:

$$E_j^m = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^{k_m} E_{ij}^m. \quad (2)$$

Потім оцінюємо подібність нашою моделлю $s_{mn} = g(E_m, E_n)$. Інший варіант – мікроагрегація, тобто спочатку обчислюємо подібності для пари інтервалів

$$s_{ij} = s(X_i^m, X_j^m), \quad (3)$$

а потім агрегуємо до подібності свердловин

$$s_{mn} = \frac{1}{k_m k_n} \sum_{ij} s_{ij}. \quad (4)$$

Щоб прискорити обчислення, оперуємо лише частиною можливих пар інтервалів, щоб отримати матрицю подібностей без використання надмірної суми. Агрегація через нейронну мережу. Досліджуємо модель, яка отримує дані каротажу для свердловин як вхідні дані (у вигляді послідовних інтервалів) і виводить вкладення всіх свердловин. Цей підхід є *наскрізним* навчанням. Частина, що відповідає вкладенню початкових даних реєстрації, є *модель кодера*, а частина, що відповідає агрегації вкладень інтервалів, є *модель агрегації*. Навчаємо агрегаційну модель для прогнозування маркування свердловин експертом. Запропонуємо етап наскрізної процедури навчання: здійснюється один крок оптимізації для моделі представлення інтервалів (будь-який із перерахованих вище); вибираються тренувальні свердловини з інтервалами відповідної довжини; введення

інтервалів в отриману модель представлення, щоб отримати набір вкладень; введення послідовності вкладень в агрегаційну модель і навчання моделі.

Модель подібності повинна добре екстраполюватися, щоб бути ефективною. Розглядаємо дві властивості, пов'язані з екстраполяційною здатністю моделі: (1) застосовність у широкому діапазоні сценаріїв і (2) швидка адаптація до даних з нових областей за допомогою трансферного навчання або без нього.

Можливості адаптації моделі порівнюємо кількома поширеними способами:

1) Збереження моделі без змін і застосування її безпосередньо до нових даних, оскільки очікуємо, що нові дані будуть схожі на старі. Це найшвидший спосіб, який на практиці може погано працювати через відмінності в зборі та організації даних, а також через різні властивості різних нафтових родовищ.

2) Навчаємо нову модель з нуля, використовуючи лише нові дані. На відміну від попереднього, це найбільш небажаний підхід, який потребує багато часу та обчислювальних ресурсів. Крім того, якщо розмір нових даних обмежений, отримаємо модель із недостатньою продуктивністю.

3) Налаштовуємо стару модель, використовуючи нові дані, щоб зафіксувати особливості нових даних, що є компромісним рішенням.

Якщо незмінена або точно налаштована модель перевершує модель, навчену з нуля за допомогою нових даних, то отримуємо доказ того, що представлення та міри подібності є універсальними та можуть застосовуватися в різних сценаріях і для різних даних.

Робочий процес застосування моделі навчання подібності, що дозволяє вивчати моделі без міток, наданих експертами, складається з чотирьох кроків:

1) Попередня обробка: перетворює початкові необроблені дані та готує їх для використання як вхідних даних для кодувальника. Дуже важливо підтримувати подібний формат введення різноманітних даних, виключати нереалістичні вимірювання та продовжувати з відсутніми даними.

2) Вибірка: вибірка інтервалів дозволяє використовувати більше прикладів для навчання. Це також змушує модель вивчати шаблони меншого масштабу.

3) Обчислення подібності: отримуємо оцінки подібності між парами інтервалів за допомогою моделі на основі даних.

4) Сукупні оцінки подібності: повертаємося від рівня інтервалів до рівня свердловин шляхом агрегування оцінок, отриманих під час попереднього кроку обчислення.

Для проблеми класифікації модель на основі даних передбачає мітку класу для об'єкта. Модель намагається зробити якомога менше помилок, класифікуючи, наприклад, чи є пара інтервалів (об'єкт) подібною чи ні (дві можливі мітки класу). Зведені показники якості машинного навчання наведено в таблиці 1:

Таблиця 1 – Показники якості машинного навчання

Метрика	Задача	Діапазон
Точність	Класифікація	(0, 1)
ROC AUC	Класифікація	(0, 1)
PR AUC	Класифікація	(0, 1)
ARI	Кластеризація	(-1, 1)
AMI	Кластеризація	(-1, 1)
V-міра	Кластеризація	(0, 1)

Щоб оцінити якість моделей, придатних для проблем класифікації (наприклад, проблеми зв'язування), використовуються класичні показники машинного навчання: точність, площа під кривою робочих характеристик приймача (ROC AUC) і площа під кривою точності-відклику (PR AUC).

Розглядаємо набір даних $D = (X_i, y_i)$, $i = 1, \dots, n$. У цьому позначенні $X_i \in R^{l \times 2d}$ є даними для пари інтервалів довжини l , що складається з d -значних мір на кожному кроці. Мітка y_i – це цільове значення. Для проблеми зв'язування y_i дорівнює 0 (різні інтервали) або 1 (подібні інтервали). Позначимо $\hat{y}_i = f(X_i)$ прогнозовану мітку моделі класифікатора $f(X)$.

Показники ROC AUC і PR AUC часто використовуються в машинному навчанні

[2], оскільки краще підходять для загальної оцінки ефективності класифікатора.

Щоб визначити ROC AUC і PR AUC, спочатку вводимо більш базові показники, відображені в матриці збурення, що представляє ефективність моделі класифікації. Матриця збурення складається з чотирьох метрик: кількість об'єктів True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN):

$$TP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i = 1][\hat{y}_i = 1], \quad (5)$$

$$FN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i = 1][\hat{y}_i = 0], \quad (6)$$

$$FP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i = 0][\hat{y}_i = 1], \quad (7)$$

$$TN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i = 0][\hat{y}_i = 0]. \quad (8)$$

Ці показники відрізняють правильні мітки та помилки для першого та другого класу в проблемі класифікації.

Можна розглядати деякі пов'язані показники істинної позитивної частоти (TPR) або відкликання, помилкової позитивної частоти (FPR) і точності (PR):

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (9)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (10)$$

$$PR = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (11)$$

Важливо зазначити, що, насправді, кожна модель класифікації передбачає не конкретну мітку, а ймовірності p приналежності до класу $p(X) = f_p(X) \in [0, 1]$. Щоб отримати мітку, модель порівнює отримані ймовірності з деяким порогом p_0 . Об'єкт належить до класу, якщо відповідна прогнозована ймовірність вище порогу $p > p_0$.

Порівнюючи отримані ймовірності з набором порогів від 0 до 1 і обчислюючи матриці збурення для кожного порогу,

отримуємо траєкторію в просторі (TPR, FPR) і подібну в просторі (TPR, PR) з кожною парою значень, що відповідають заданому порозу. Отримані криві називаються відповідно кривою ROC і кривою TPR-PR, а використовувані метрики – це площі під цими кривими.

Розглядаються три типи істинних цільових значень: вкладення інтервалів з однієї свердловини буде близьким один до одного. Для цього маркування не використовуються експертні оцінки; вкладення інтервалів з одного класу будуть близькі одне до одного, але вкладення можуть збігатися з різними свердловинами та лежати в різних шарах; вкладення інтервалів з одного класу та одного шару (позначення експерта) буде близьким одне до одного, але вбудовування можуть збігатися з різними свердловинами. Використовується скоригований індекс Ренда (ARI) як показник якості кластеризації, оскільки він забезпечує добре уявлення про якість кластеризації та має інтуїтивно зрозуміле пояснення. ARI вимірює подібність двох значень, ігноруючи перестановки порядку можливих міток. Формальне визначення ARI таке. Позначимо через n загальну кількість об'єктів з перевіркою вибірки, a – кількість пар в одному кластері з однаковою міткою, b – кількість пар, які знаходяться в різних кластерах і мають різні мітки. Отже, $a + b$ – кількість пар із подібним маркуванням за моделлю та відповідно до істинних міток. Тоді індекс Ренда (RI):

$$RI = \frac{a + b}{C_2^n}, \quad (12)$$

де $C_2^n = \frac{n(n-1)}{2}$ – біноміальний коефіцієнт, який дорівнює загальній кількості різних пар для вибірки розміру n .

Скоригований індекс Ренда – це індекс Ренда, скоригований на ймовірність випадкового призначення міток:

$$ARI = \frac{RI - E(RI)}{\max(RI) - E(RI)}, \quad (13)$$

де $E(RI)$ є очікуванням індексу Ренда для випадкового вибору міток кластера.

Визначаємо дві альтернативні метрики: скориговану взаємну інформацію (AMI) і V -міру, які разом із ARI надають ширшу картину якості розглянутих моделей.

Визначимо дві мітки U і V та позначимо $P_i = \frac{|U_i|}{n}$, $P'_j = \frac{|V_j|}{n}$. Тоді ентропія U задається як:

$$H(U) = - \sum_{i=1}^{|U_i|} P_i \ln P_i. \quad (14)$$

Подібним чином для V . Позначимо $P_{ij} = \frac{|U_i \cap V_j|}{n}$. Тоді взаємна інформація (MI) між U і V це:

$$MI(U, V) = P_{ij} \ln \left(\frac{P_{ij}}{P_i P'_j} \right). \quad (15)$$

Скоригована взаємна інформація – це взаємна інформація, скоригована на можливість випадкового призначення міток:

$$AMI = \frac{MI - E[MI]}{\text{mean}(H(U), H(V)) - E[MI]}, \quad (16)$$

де $E[MI]$ – очікувана взаємна інформація для випадкового вибору.

Розглянемо V -міру, яка є гармонійним середнім однорідності h і повноти c . Однорідність – це властивість розподілу кластерів, що кожен кластер містить лише члени одного класу:

$$h = 1 - \frac{H(C|K)}{H(C)}. \quad (17)$$

Повнота – це властивість розподілу кластера, згідно з якою всі члени даного класу призначаються одному кластеру:

$$h = 1 - \frac{H(K|C)}{H(K)}. \quad (18)$$

$H(C|K)$ є умовною ентропією класів із заданими кластерними призначеннями і $H(C)$ є ентропією класів:

$$H(C|K) = -\sum_{c=1}^{|C|} \sum_{k=1}^{|K|} \frac{n_{ck}}{n} \ln\left(\frac{n_{ck}}{n}\right), \quad (19)$$

де n_{ck} є кількість об'єктів c -го кластера, які потрапляють в k -ий клас.

$$H(C) = -\sum_{c=1}^{|C|} \frac{n_c}{n} \ln\left(\frac{n_c}{n}\right). \quad (20)$$

Тоді V -міра:

$$v = \frac{2hc}{h+c}. \quad (21)$$

Висновки

Запропоновано комплексну оцінку ефективності моделі для класифікації та порівняння каротажних даних, що включає використання двох груп метрик. Використано метрики класифікації, такі як ROC AUC та PR AUC, для визначення належності інтервалів до однієї свердловини, що

дає змогу оцінити здатність моделі правильно ідентифікувати інтервали, що відносяться до однієї свердловини. Для оцінки якості створених моделлю представлень застосовано метрики кластеризації Adjusted Rand Index (ARI), Adjusted Mutual Information (AMI) та V -міра, що дозволяє об'єктивно оцінити якість кластеризації результатів та порівняти їх з експертними оцінками. Особливу увагу приділено дослідженню властивостей запропонованої моделі до екстраполяції, що робить можливою роботу з новими базами даних без необхідності додаткового навчання та переналаштування моделі під нові умови. Реалізований підхід є універсальним та надійним методом для реалізації процесу автоматизованого аналізу свердловин в контексті зменшення залучення ручної праці фахівців.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Verma A.K., Routray A., Mohanty W.K. Assessment of similarity between well logs using synchronization measures. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. Vol.11. No.12. P. 2032-2036. doi: [10.1109/LGRS.2014.2317498](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2317498)
2. Akkurt R., Conroy T.T., Psaila D., Paxton A., Low J., Spaans P. Accelerating and enhancing petrophysical analysis with machine learning: a case study of an automated system for well log outlier detection and reconstruction. SPWLA 59th Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. 2018.
3. Koroteev D., Tekic Z. Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future. *Energy AI*. 2021. Vol. 3. Article 100041. doi: [10.1016/j.egyai.2020.100041](https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100041)
4. Brazell S., Bayeh A., Ashby M., Burton D. A machine-learning-based approach to assistive well-log correlation. *Petrophysics-the SPWLA J. Form. Eval. Reserv. Descr.* 2019. Vol. 60(04). P. 469-479. doi: [10.30632/PJV60N4-2019A1](https://doi.org/10.30632/PJV60N4-2019A1)
5. Jing L., Tian Y. Self-supervised visual feature learning with deep neural networks: A survey. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2020. Vol. 43. No 11. P. 4037-4058. doi: [10.1109/TPAMI.2020.2992393](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.2992393)
6. Zoraster S., Paruchuri R., Darby S. Curve alignment for well-to-well log correlation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro. 2004. doi: [10.2118/90471-MS](https://doi.org/10.2118/90471-MS)
7. Ali M., Jiang R., Ma H., Pan H., Abbas K., Ashraf U., Ullah J. Machine learning-a novel approach of well logs similarity based on synchronization measures to predict shear sonic logs *J. Pet. Sci. Eng.* 2021. Vol. 203. Article 108602. doi: [10.1016/j.petrol.2021.108602](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108602)
8. Du S., Wang R., Wei C., Wang Y., Zhou Y., Wang J., Song H. The connectivity evaluation among wells in reservoir utilizing machine learning methods. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 47209-47219. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2976910](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976910)

9. Greff K., Srivastava R.K., Koutník J., Steunebrink B.R., Schmidhuber J. LSTM: A search space odyssey. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*. 2016. Vol. 28. No 10. P. 2222-2232. doi: [10.48550/arXiv.1503.04069](https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.04069)

ASSESSMENT OF PECULIARITIES OF APPLYING THE CLASSIFICATION-COMPARATIVE METHOD OF PROCESSING WELL LOGGING DATA

Petryshyn R. I.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-2770-6656>
e-mail: romeopetryshyn@gmail.com

Melnyk V. D.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7567-5625>
e-mail: vitalii.melnyk@nung.edu.ua

Sheketa V. I.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1318-4895>
e-mail: vasyi.sheketa@nung.edu.ua

Khaleiev D. M.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-4548-231X>
e-mail: dmytro.khalieiev-a174-23@nung.edu.ua

Trishch V. V.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-8564-1752>
e-mail: vlad.trishch@gmail.com

Bohdan O. T.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Street, 19, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-9539-6359>
e-mail: oleksiibohdan@gmail.com

Abstract. In the oil production industry, the research objective is to identify parametric similarities and differences between wells to improve the accuracy of geological modeling, optimize drilling operations, and predict reservoir productivity. The article presents a model for the classification and comparison of well logging data based on modern machine learning and deep learning methods. An analytical review of existing approaches for evaluating correlation between wells is provided, including manual analysis based on expert assessments and the use of simple similarity coefficients. These methods have significant limitations associated with high subjectivity, low reproducibility of results, and difficulties in scaling to large datasets. To overcome these drawbacks, a deep learning-based approach is proposed that enables automation of data analysis, decision support, and pattern recognition in well studies. The developed model employs a recurrent neural network (RNN) architecture designed to process sequential data and capture long-term dependencies, utilizing neural network layers to assess similarity between well intervals. A visualization method based on similarity evaluation schemes for interval pairs and a comparative learning approach using a triplet loss function are proposed. The model's performance is evaluated using classification and clustering metrics, which allow for quantitative assessment of well grouping quality according to similarity parameters. The implemented approach represents a universal and reliable method for automating well data analysis, aimed at reducing manual expert involvement and improving overall operational efficiency in geological and production processes.

Keywords: well analysis, well logging data, deep learning, neural networks, modeling, methodology, model, data aggregation, model extrapolation, effectiveness evaluation, automation, decision-making, clustering.



Прийнято 10.12.2025. Прорецензовано 24.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 004.415

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-190-201

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ MAVLINK-ТЕЛЕМЕТРІЇ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ КОНТРОЛЕРІВ РІХНАWK

Назаренко О. Г.

Аспірант

40000, . . . , 160, . . . ,
АТЗТ «Українські мотори»
61038, Салтівське шосе, 43, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-2373-1159>
e-mail: nazarenko.oleksii@gmail.com

Ушкаренко О. О.

Доктор технічних наук, професор
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3159-330X>
e-mail: oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua

Дьяконов О. С.

Кандидат технічних наук, доцент
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7438-7066>
e-mail: alex.s.dyakonov@gmail.com

Сірівчук А. С.

Кандидат технічних наук, доцент
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2927-2600>
e-mail: sirivchuka@gmail.com

Запропоноване посилання: Назаренко, О. Г., Ушкаренко, О. О., Дьяконов, О. С., Сірівчук, А. С. & Обрубов, А. В. (2025). Програмна реалізація MAVlink-телеметрії для безпілотних авіаційних систем на базі контролерів Ріхhawk. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 190-201. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-190-201

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Обрубов А. В.

Доктор технічних наук, доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

54007, проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9667-1703>

e-mail: andrii.obrubov@nuos.edu.ua

Анотація. У статті представлено комплексне дослідження процесів отримання, парсингу, обробки та аналітичного використання телеметричних даних, що надходять із польотних контролерів стандарту Pixhawk, які широко застосовуються у сфері безпілотних авіаційних систем. Детально описано архітектуру відкритої апаратної платформи Pixhawk, її модульну структуру, принципи взаємодії між сенсорами, контролерами та зовнішніми обчислювальними модулями. Розглянуто склад і функціональні особливості основних сенсорів, які забезпечують формування телеметричних потоків у режимі реального часу. Особливу увагу приділено аналізу комунікаційного протоколу MAVLink, який є базовим для передачі даних між апаратною частиною дрону та наземними станціями. Наводяться практичні приклади реалізації парсингу телеметрії з використанням мови програмування Python та спеціалізованих бібліотек, таких як pymavlink та DroneKit-Python. Аналізуються можливості застосування отриманих даних для моніторингу стану безпілотного апарату в реальному часі, пост-польотного аналізу та розробки систем підвищення автономності та безпеки польотів. У роботі проведено розбір структури пакетів, типів повідомлень, принципів їх кодування, а також описано механізми виявлення та корекції помилок. У дослідженні оцінюються можливості застосування оброблених телеметричних даних для моніторингу технічного стану безпілотного апарату в реальному часі, виконання постпольотного аналізу та оптимізації параметрів керування.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА), Pixhawk, телеметрія, MAVLink, інтелектуальне управління, парсинг даних, багатоканальна система збору даних, координати, кібербезпека, автоматична орієнтація, хмарна обробка даних.

Роль телеметрії в сучасних безпілотних авіаційних системах

Стратегічне значення та стрімкий розвиток БПЛА

Безпілотні літальні апарати упродовж останнього десятиліття еволюціонували з вузькоспеціалізованих військових розробок до технології, що має фундаментальне значення для широкого спектра цивільних і оборонних застосувань [1]. Відзначається експоненційне зростання обсягів виробництва та масштабів використання у світі, а в Україні цей процес демонструє особливу динаміку та стратегічну вагу. Поряд із військовими задачами, які охоплюють розвідку, спостереження, коригування вогню та ураження цілей, швидко розширюються цивільні напрями застосування. Дрони слугують інструментами для агромоніторингу, логістики, протипожежних заходів, охорони громадського порядку, картографування та кіновиробництва. Універсальність платформи підкреслює її статус як технології подвійного призначення з мультиплікативним впливом на економіку та безпеку держави.

Телеметрія як основа управління та безпеки польотів

Функціонування сучасного БПЛА спирається на безперервний двобічний обмін даними між апаратом і наземною станцією керування або бортовим комп'ютером. Такий обмін визначається як телеметрія, тобто високоавтоматизований процес збирання даних із віддалених або важкодоступних точок і їх передавання на приймальне обладнання для вимірювання, моніторингу, відображення та запису. Візуальний потік з камери є важливим для оператора, проте не завжди є критичним для забезпечення самого польоту, тоді як телеметрія має визначальне значення. За відсутності стабільного телеметричного каналу безпечне та ефективне управління апаратом стає практично неможливим.

Телеметрія виконує роль цифрової нервової системи БПЛА і забезпечує інформацію, без якої неможливі ключові функції. У режимі реального часу оператор одержує просторові координати, висоту, кути орієнтації, лінійні та кутові швидкості, параметри стану бортових систем, рівень заряду акумулятора та індикатори якості

зв'язку, що дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення щодо керування польотом. Для роботи автопілота [2] телеметрія формує основне джерело навігаційних даних для руху за маршрутом, стабілізації просторового положення, автоматизованого зльоту та посадки, а також інших запрограмованих маневрів, причому алгоритми оцінювання стану на кшталт розширеного фільтра Калмана безперервно інтегрують дані сенсорів з метою підвищення точності. Безперервний моніторинг параметрів підвищує рівень безпеки завдяки своєчасному виявленню відхилень, зокрема надмірної вібрації, перегріву приводів, критичного падіння напруги або втрати супутникового сигналу, що уможливорює автоматичну активацію аварійних сценаріїв на кшталт повернення у точку старту у режимі Return to Launch. Записані телеметричні журнали становлять основу для постпольотного аналізу, діагностики відмов, з'ясування причин інцидентів, тонкого налаштування регуляторів і подальшої оптимізації продуктивності апарата.

Здатність своєчасно одержувати, коректно декодувати та аналітично опрацьовувати телеметричні дані є ключовою компетенцією розробників, дослідників і операторів БПЛА [3].

Мета роботи полягає у наданні комплексного аналізу методів та інструментів для парсингу телеметрії з відкритої апаратної платформи Pixhawk з використанням протоколу MAVLink і мови програмування Python. Для досягнення цієї мети в межах дослідження проаналізовано архітектуру та сенсорне оснащення польотних контролерів стандарту Pixhawk, детально розглянуто структуру та принципи функціонування протоколу MAVLink з урахуванням відомих вразливостей безпеки, наведено і зіставлено практичні підходи до парсингу MAVLink-повідомлень у Python на основі низькорівневих і високорівневих бібліотек, а також продемонстровано напрями використання телеметричних даних для аналізу та керування польотом.

Основою дослідження є поєднання трьох відкритих технологій, що формують цілісну екосистему. Використовується дос-

тупне та стандартизоване апаратне забезпечення Pixhawk, яке стало дослідницькою платформою для університетів і стартапів. Залучається відкрите програмне забезпечення автопілотів ArduPilot і PX4, яке забезпечує професійний функціонал без ліцензійних бар'єрів [4]. Застосовується відкритий протокол зв'язку MAVLink як уніфікована мова взаємодії компонентів. Синергія цих елементів демократизувала доступ до передових БПЛА-технологій і змістила фокус досліджень з розроблення пропріетарних систем на створення інтелектуальних алгоритмів і прикладних рішень на базі надійної стандартної платформи. Наведене дослідження є прикладом результатів, що стали можливими завдяки відкритості та доступності зазначеної екосистеми.

Архітектура системи збору телеметричних даних на базі Pixhawk

Pixhawk як відкритий апаратний стандарт

Pixhawk (рис. 1) слід розглядати не як окрему модель польотного контролера, а як незалежний відкритий апаратний проєкт, який формує та підтримує стандарти проєктування автопілотів. У межах цього проєкту визначаються специфікації апаратної частини, що охоплюють принципові схеми, типи компонентів, їх розміщення і набір інтерфейсів, завдяки чому забезпечується висока сумісність контролерів різних виробників зі стеками прошивок і засобами наземного керування. Еволюція стандарту відбувається у версіях Flight Management Unit, серед яких FMUv3, FMUv4, FMUv5, FMUv6C, FMUv6X. Кожне нове покоління пропонує продуктивніший процесор, розширену номенклатуру сенсорів і додаткові інтерфейси, при цьому на рівні прошивки зберігається зворотна сумісність. Для сучасних зразків, що відповідають вимогам FMUv6C і FMUv6X, зокрема Pixhawk 6C і Pixhawk 6X, характерне використання мікроконтролерів класу STMicroelectronics STM32H743 з ядром Arm Cortex-M7 на частоті 480 МГц або платформи NXP і.MXRT1176 із двома ядрами Cortex-M7 на

1 ГГц та Cortex-M4 на 400 МГц. Така елементна база забезпечує достатній обчислювальний резерв для реалізації алгоритмів навігації, керування і потокової обробки сенсорних даних у режимі реального часу.



Рисунок 1 – Pixhawk 5X

Компонентна база та сенсорне оснащення

Первинні телеметричні дані формуються сенсорним комплексом, інтегрованим на платі польотного контролера, причому для підвищення надійності часто застосовується резервування окремих вимірювальних каналів. Ключову роль у визначенні просторової орієнтації відіграє інерційний вимірювальний блок ІМУ, який зазвичай містить два або три незалежні набори тривісних акселерометрів і тривісних гіроскопів, наприклад ICM-42688-P, VMI055, VMI088. Акселерометри вимірюють лінійні прискорення з урахуванням гравітаційної складової, а гіроскопи вимірюють кутові швидкості, що у сукупності дозволяє отримувати оцінку стану апарата з необхідною точністю. Для зменшення впливу вібрацій на мультироторних платформах ІМУ монтують на віброзахисті, а стабільність характеристик підвищують завдяки вбудованим підігрівачам, які підтримують оптимальний тепловий режим чутливих елементів. Визначення курсу доповнюється даними тривісного магнітометра, поширеними є датчики IST8310 і VMM150. Відомо, що точність вбудованих магнітометрів у корпусах контролерів Pixhawk може бути нижчою за еталонні лабораторні прилади, що потрібно враховувати під час розроблення високоточної

навігації, тому на практиці часто застосовують зовнішні компаси, винесені від силових кабелів і джерел електромагнітних завад. Висоту за тиском визначає барометр, наприклад MS5611 або BMP390, який забезпечує високу чутливість до малих змін тиску, хоча підпадає під вплив повільного дрейфу через погодні фактори. Положення і швидкість відносно землі, а також еталонний час надає зовнішній модуль супутникової навігації GPS або GNSS, що підключається до контролера через стандартні послідовні інтерфейси.

З архітектурного погляду значна частина контролерів класу Pixhawk використовує двопроцесорну схему. Основний обчислювальний модуль FMU виконує задачі високого рівня, серед яких запуск операційної системи реального часу NuttX, виконання прошивки ArduPilot або PX4, реалізація алгоритмів сенсорної фузії на основі розширеного фільтра Калмана та планування місії [5]. Допоміжний процесор вводу-виводу, типовим прикладом є STM32F103, бере на себе низькорівневі функції керування приводами, генерацію ШІМ сигналів для двигунів і сервоприводів, а також оброблення сигналів з приймача радіокерування [6]. Такий розподіл обов'язків між ядрами зменшує затримки у критичних контурах керування і підвищує загальну відмовостійкість системи.

Екосистема програмного забезпечення: ArduPilot та PX4

Апаратна платформа Pixhawk слугує базою, на якій функціонує одна з двох домінуючих відкритих прошивок firmware – ArduPilot або PX4. Обидві системи перетворюють апаратний контролер на повноцінний автопілот [7], проте відрізняються архітектурними підходами та ліцензійними моделями.

ArduPilot належить до найстаріших і найпоширеніших відкритих прошивок, має велику спільноту і широко підтверджену надійність експлуатації. Архітектура ближча до монолітної, а спектр підтримуваних платформ охоплює мультикоптери, літаки, гелікоптери, наземні ровери, човни та підводні апарати. Завдяки тривалій історії

практичного використання код вважають перевіреним у реальних умовах, що робить ArduPilot поширеним вибором для комерційних застосувань з пріоритетом надійності. Розповсюдження відбувається за ліцензією GPLv3, яка вимагає відкриття похідних робіт.

PX4 походить з дослідницького середовища ETH Zurich і підтримується Dronocode Foundation під егідою Linux Foundation. Система має сучасну модульну архітектуру та використовує механізм обміну повідомленнями uORB, що працює за принципом видавець – підписник. Окремі модулі, такі як драйвери сенсорів, оцінювачі стану і контролери польоту, функціонують як незалежні процеси та взаємодіють через стандартизовані теми topics. Такий підхід забезпечує високу гнучкість, спрощує кастомізацію і інтеграцію нових компонентів, що є привабливим для академічних досліджень і просунутих комерційних розробок. PX4 поширюється за більш дозвоільною ліцензією BSD, яка дозволяє створювати закриті комерційні продукти на основі відкритого ядра.

Сила екосистеми полягає у симбіозі трьох відкритих стандартів – апаратної платформи Pixhawk, програмного забезпечення ArduPilot або PX4 та відкритого протоколу зв'язку MAVLink [8]. Апаратний стандарт забезпечує стабільну і передбачувану основу для виконання відкритих прошивок, програмне забезпечення формує критично важливі телеметричні дані, а протокол MAVLink надає уніфікований спосіб доступу до цих даних незалежно від конкретної реалізації апаратури чи вибраної прошивки. Взаємозамінність компонентів створює ключову перевагу платформи. Розробник може замінити контролер Holybro на аналог від CUAV або перейти з ArduPilot [9] на PX4, після чого Python-скрипт, що взаємодіє мовою MAVLink, з великою ймовірністю потребуватиме лише мінімального коригування або взагалі працюватиме без змін. Саме ця глибока інтегрованийність визначає інноваційність і гнучкість усієї екосистеми.

Протокол MAVLink: Структура, механізми передачі та аналіз безпеки

Загальна характеристика та структура повідомлень

MAVLink Micro Air Vehicle Link визначається як легковаговий бінарний протокол серіалізації повідомлень, створений для комунікації між безпілотними апаратами, наземними станціями та іншими компонентами системи. Ключовими перевагами вважаються висока ефективність, що дає змогу працювати на каналах із низькою пропускну здатністю на кшталт радіомодемів, а також розширюваність, яка забезпечує додавання нових типів повідомлень. У спільноті відкритих рішень для дронів MAVLink сформувався як де-факто стандарт.

Структура пакета у версії MAVLink 1.0 має чітко визначені поля. Початок кадру передається одним байтом із фіксованим значенням 0xFE. Довжина корисного навантаження задається одним байтом і може набувати значень від нуля до двохсот п'ятдесяти п'яти. Порядковий номер пакета також кодується одним байтом у діапазоні від нуля до двохсот п'ятдесяти п'яти та використовується для виявлення втрат. Ідентифікатор системи передається одним байтом і визначає джерело або приймач, зокрема за усталеною конвенцією наземна станція часто використовує значення двісті п'ятдесят п'ять, а перший апарат у мережі має значення один. Ідентифікатор компонента всередині системи кодується одним байтом і вказує модуль на кшталт автопілота, камери чи бортового комп'ютера, причому для автопілота поширеним є значення один. Ідентифікатор типу повідомлення кодується одним байтом і визначає формат корисних даних, наприклад для HEARTBEAT застосовується значення нуль, а для GLOBAL_POSITION_INT значення тридцять три. Поле корисного навантаження має змінну довжину від нуля до двохсот п'ятдесяти п'яти байтів, а його структура задається у файлах опису протоколу у форматі XML, зокрема у файлах common.xml та ardupilot.xml. Контрольна сума передається двома байтами і обчис-

Таблиця 1 – Ключові повідомлення телеметрії MAVLink та їх корисне навантаження

ID повідомлення	Назва повідомлення	Ключові поля корисного навантаження	Опис
0	HEARTBEAT	type, autopilot, base_mode, custom_mode, system_status	"Пульс" системи.
1	SYS_STATUS	voltage_battery, current_battery, battery_remaining, drop_rate_comm	Детальний статус системи, включаючи напругу, струм та залишок заряду батареї, а також відсоток втрачених пакетів зв'язку.
30	ATTITUDE	time_boot_ms, roll, pitch, yaw, rollspeed, pitchspeed, yawspeed	Дані про кутову орієнтацію (крен, тангаж, ристання) та кутові швидкості апарату. Виражені в радіанах.
33	GLOBAL_POSITION_INT	lat, lon, alt, relative_alt, vx, vy, vz, hdg	Глобальні координати.
74	VFR_HUD	airspeed, groundspeed, heading, throttle, alt, climb	Дані, оптимізовані для відображення на Heads-Up Display (HUD)

люється за алгоритмом CRC16-CCITT над усім пакетом без стартового байта з додаванням секретного байта MAVLINK_CRC_EXTRA, що забезпечує перевірку цілісності та відповідності формату.

Версія MAVLink 2.0 розширює наведений формат і водночас зберігає зворотну сумісність із MAVLink 1.0. Новий початок кадру кодується значенням 0xFD. Діапазон ідентифікаторів типів повідомлень розширено до двадцяти чотирьох бітів, що теоретично дозволяє визначити понад шістнадцять мільйонів різновидів. Передбачено механізм доповнення вже наявних повідомлень новими полями без порушення сумісності зі старими реалізаціями. Додано можливість підписування пакетів для автентифікації та посилення контролю цілісності, однак у типових конфігураціях ця функція використовується нечасто.

Для практичної роботи з телеметриєю доцільно володіти переліком ключових повідомлень, за допомогою яких передається основна інформація про стан апарату, оскільки саме вони формують мінімально необхідний набір даних для керування, моніторингу та подальшого аналітичного опрацювання.

Аналіз вразливостей та проблеми безпеки

Попри високу ефективність і широку популярність стандартна реалізація протоколу MAVLink має фундаментальні вразливості безпеки, що робить її чутливою до низки кібератак, і ця проблема активно досліджується в академічному середовищі. Парадокс полягає в тому, що саме простота, легкість та відкритість, які забезпечили успіх протоколу, перетворилися на ключові слабкі місця у сучасних сценаріях застосування безпілотників із критичними вимогами до безпеки. Історично проєкт приділяв пріоритетну увагу ефективності передавання даних, а не їх захисту, тому швидке промислове впровадження випередило розвиток комплексних механізмів безпеки.

Основні вектори атак охоплюють пасивне перехоплення трафіку унаслідок відсутності шифрування за умовчанням, що дає змогу зловмиснику в зоні дії радіоканалу отримувати телеметрію та відновлювати конфіденційні відомості про координати апарату, маршрут, місцезнаходження оператора і стан місії. Відсутність вбудованої автентифікації відправника створює можливість для ін'єкції пакетів, коли сто-

ронній вузол формує синтаксично коректні повідомлення та нав'язує команди зміни режиму польоту, коригування маршрутних точок або вимкнення двигунів, що веде до перехоплення керування або катастрофи. Додаткову загрозу становлять атаки типу людина посередині, під час яких злоумисник активно втручається у канал зв'язку між легітимними сторонами, модифікує повідомлення на льоту та ретранслює їх далі. Виявлені також ризики, пов'язані з фаззінгом, коли надсилання наборів невалідних або напіввалідних повідомлень уразливим реалізаціям парсерів на боці автопілота чи наземної станції спричиняє збої, відмову в обслуговуванні або навіть виконання довільного коду.

Запропоновані у науковій літературі підходи до підвищення захищеності передбачають інтеграцію криптографічних механізмів із мінімальним впливом на затримки та енергоспоживання. Розглядаються варіанти застосування симетричного шифрування на основі AES або ChaCha20 для забезпечення конфіденційності, а також спеціалізовані легковагові рішення на кшталт MAVShield, оптимізовані для ресурсно обмежених мікроконтролерів польотних контролерів. Попри наявність обнадійливих прототипів і експериментальних імплементацій стан справ поки не набув статусу загальноприйнятого стандарту з широким промисловим впровадженням, тому питання безпеки MAVLink залишається відкритим напрямом для подальших досліджень і стандартизації.

Практична реалізація парсингу телеметрії з використанням Python

Python як інструмент для розробки додатків для БПЛА

Вибір мови Python для роботи з телеметрією БПЛА є обґрунтованим з огляду на низку факторів [11]. Це високорівнева мова з читабельним синтаксисом, що прискорює розроблення і прототипування. Вона має розвинену екосистему наукових і інженерних бібліотек, серед яких NumPy для числових обчислень, Pandas для оброблення даних, Matplotlib і Seaborn для візу-

алізації, що робить її зручною для аналізу телеметричних журналів [10]. Активна спільнота підтримує спеціалізовані пакети для взаємодії з безпілотними платформами, унаслідок чого зменшується бар'єр інтеграції з апаратним забезпеченням.

Типовою архітектурою виконання Python-скриптів на борту є використання так званого бортового комп'ютера, зокрема одноплатної системи Raspberry Pi під керуванням Linux. Такий модуль під'єднують до одного з послідовних портів UART польотного контролера Pixhawk і організують обмін даними за протоколом MAVLink. Подібна конфігурація переносить обчислювально складні задачі на більш потужний процесор бортового комп'ютера і розвантажує мікроконтролер автопілота, що дає змогу повною мірою користуватися можливостями екосистеми Python для комп'ютерного зору, оптимізації траєкторій і методів машинного навчання.

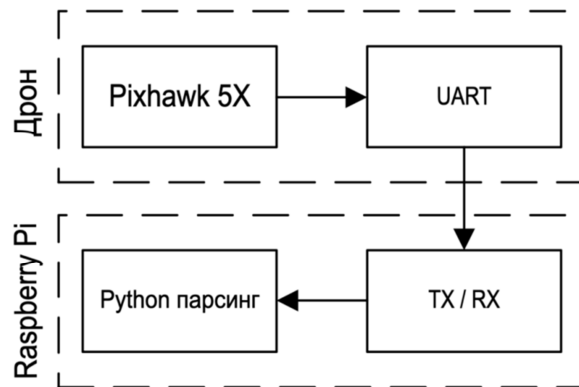


Рисунок 2 – Схема передачі даних

Для парсингу повідомлень MAVLink у Python застосовують два підходи, які відповідають різним рівням абстракції. Низькорівневий підхід базується на бібліотеці rtmavlink і надає прямий доступ до структури протоколу з можливістю тонкого контролю процесу декодування. Високорівневий підхід використовує фреймворк DroneKit-Python і пропонує зручні об'єктні інтерфейси до типових сутностей на кшталт параметрів, місій і телеметричних потоків, що прискорює прикладну розробку за мінімальних накладних витрат на інтеграцію.

Низькорівневий підхід: бібліотека *rumavlink*

Бібліотека *rumavlink* є фундаментальною реалізацією протоколу MAVLink на Python. Вона надає інструменти для генерації, відправки, прийому та парсингу сирих MAVLink-повідомлень. Це дає розробнику повний контроль над комунікаційним процесом, але вимагає глибшого розуміння самого протоколу.

Практична реалізація парсера телеметрії за допомогою *rumavlink* зазвичай включає наступні кроки:

1. Встановлення з'єднання: Створюється об'єкт з'єднання за допомогою функції *mavutil.mavlink_connection*. Як аргумент передається рядок, що описує тип з'єднання. Для підключення до Pixhawk через USB-кабель на Linux-системі це може бути шлях до послідовного порту, наприклад, `"/dev/ttyACM0"`, з вказанням швидкості передачі (`baud=57600`). Для підключення через мережу (наприклад, до симулятора або через Wi-Fi міст) використовується UDP, наприклад, `"udp:127.0.0.1:14550"`.

```
Python
from rumavlink import mavutil

# Створення об'єкта з'єднання
master = mavutil.mavlink_
connection('/dev/ttyACM0', baud=57600)
```

2. Очікування Heartbeat: Перед початком роботи необхідно переконатися, що зв'язок з автопілотом встановлено. Найнадійніший спосіб – дочекатися першого повідомлення HEARTBEAT.

```
Python
# Очікування першого heartbeat
master.wait_heartbeat()
print(f"Heartbeat from system (system
{master.target_system} component
{master.target_component})")
```

3. Цикл прийому та парсингу повідомлень: Основна логіка парсера реалізується в нескінченному циклі. Метод `master.recv_match()` блокує виконання

до отримання нового повідомлення. Він автоматично обробляє сирий потік байтів, знаходить MAVLink-пакети, перевіряє контрольну суму та повертає розпарсений об'єкт повідомлення.

```
Python
while True:
    try:
        # Очікування нового повідомлення
        msg = master.recv_match(blocking=True)
        if not msg:
            continue
        # Фільтрація за типом повідомлення
        if msg.get_type() == 'ATTITUDE':
            # Вилучення даних з полів
            roll_rad = msg.roll
            pitch_rad = msg.pitch
            yaw_rad = msg.yaw
            print(f"Attitude: Roll={roll_rad:.2f},
Pitch={pitch_rad:.2f}, Yaw={yaw_rad:.2f}")

            if msg.get_type() ==
'GLOBAL_POSITION_INT':
                lat = msg.lat / 1e7
                lon = msg.lon / 1e7
                alt = msg.relative_alt / 1000.0 # в метрах
                print(f"Position: Lat={lat}, Lon={lon},
Alt={alt}m")
            except Exception as e:
                print(e)
```

Цей підхід надає максимальну гнучкість, оскільки дозволяє працювати з абсолютно будь-яким типом MAVLink-повідомлень, включаючи нестандартні (діалектні) або нові, ще не підтримувані високорівневими бібліотеками.

Високорівневий підхід: фреймворк *DroneKit-Python*

DroneKit-Python – це фреймворк, що є високорівневою обгорткою над *rumavlink*. Його головною метою є спрощення розробки автономних додатків для БПЛА, абстрагуючись від складнощів протоколу MAVLink. Замість того, щоб вручну ловити та парсити повідомлення, *DroneKit* на-

дає об'єктно-орієнтований API, де дрон представляється у вигляді об'єкта `vehicle`, а його телеметричні дані – як атрибути цього об'єкта.

Ключова перевага цього підходу полягає в тому, що розробнику не потрібно писати низькорівневий код для обробки MAVLink-повідомлень. Фреймворк робить це "під капотом", автоматично підтримуючи актуальний стан об'єкта `vehicle`.³⁶

Приклад отримання телеметрії за допомогою DroneKit-Python:

1. *Імпорт та підключення*: Процес підключення схожий на `rpy2mavlink`, але використовується функція `connect`. Параметр `wait_ready=True` гарантує, що функція поверне керування лише після того, як буде встановлено зв'язок та завантажено основні параметри з автопілота.

```
Python
from dronekit import connect
import time
# Підключення до апарату
vehicle = connect('/dev/ttyACM0',
wait_ready=True, baud=57600)
```

2. *Прямий доступ до телеметрії*: Після підключення телеметричні дані доступні як атрибути об'єкта `vehicle`. Наприклад, для отримання висоти, орієнтації та напруги батареї можна просто звернутися до відповідних полів.

```
Python
print(f"Altitude:
{vehicle.location.global_relative_frame.alt}m")
print(f"Attitude: {vehicle.attitude}")
print(f"Battery: {vehicle.battery.voltage}V")
```

3. *Використання слухачів (Listeners)*: Для додатків, що працюють в реальному часі, постійне опитування атрибутів у циклі є неефективним. DroneKit пропонує більш елегантний механізм "слухачів" (або "спостерігачів"), який дозволяє зареєструвати функцію зворотного виклику (`callback`), що буде автоматично викликатися при оновленні певного атрибута.

```
Python
def attitude_callback(self, attr_name, value):
    print(f"ATTITUDE update: {value}")
# Додавання слухача для атрибуту 'attitude'
vehicle.add_attribute_listener('attitude',
attitude_callback)
# Головний цикл програми може займатися іншими справами
while True:
    time.sleep(1)
```

Цей асинхронний підхід є набагато більш ефективним і є рекомендованим для розробки складних додатків.

Вибір інструменту

Вибір між `rpy2mavlink` і DroneKit-Python є типовим інженерним компромісом між повнотою контролю та зручністю розроблення. Ці засоби належать до різних рівнів абстракції однієї програмної драбини. Бібліотека `rpy2mavlink` відповідає нижчому рівню, надає доступ до кожного байта протоколу і забезпечує максимальну продуктивність, однак вимагає вищої кваліфікації, ручної реалізації логіки оброблення повідомлень і ретельного управління станами. Фреймворк DroneKit-Python відповідає вищому рівню, пропонує інтуїтивні об'єктні інтерфейси і прискорює прикладну розробку, проте ціною стає часткова втрата гнучкості, оскільки не всі рідкісні типи MAVLink-повідомлень доступні безпосередньо, а накладні витрати можуть бути більшими.

Доцільність використання кожного інструмента визначається характером завдання. За потреби створити алгоритм керування на основі нестандартних типів повідомлень або виконати глибокий протокольний аналіз є сенс обрати `rpy2mavlink` як базовий інструмент. Для розроблення типових автономних сценаріїв на кшталт місій за маршрутними точками або режимів супроводження цілі практичною буде робота з DroneKit-Python, оскільки час до працездатного прототипу істотно скорочується, а обсяг коду зменшується.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз rpy mavlink та DroneKit-Python

Критерій	rpy mavlink	DroneKit-Python
Рівень абстракції	Низький	Високий
Простота використання	Складна, вимагає знання протоколу MAVLink	Проста, інтуїтивно зрозумілий об'єктно-орієнтований API
Гнучкість	Дуже висока, повний контроль над усіма аспектами протоколу	Середня, обмежена функціоналом, наданим API vehicle
Продуктивність	Висока, мінімальні накладні витрати	Середня, додатковий шар абстракції може вносити невелику затримку
Підтримка MAVLink	Повна, підтримує всі стандартні та діалектні повідомлення	Підтримка основних повідомлень, необхідних для керування та телеметрії
Основний сценарій	Розробка GCS, аналізаторів протоколу, реалізація нестандартних функцій	Швидка розробка автономних місій, освітні проекти, прототипування

Висновки та перспективи подальших досліджень

Поєднання відкритої апаратної платформи Pixhawk, стандартизованого протоколу MAVLink і мови програмування Python формує гнучку та доступну екосистему для одержання і аналітичного опрацювання телеметрії безпілотних літальних апаратів. Аналіз архітектури Pixhawk і його сенсорного комплексу свідчить, що сучасні польотні контролери надають повний набір вимірювань для реалізації алгоритмів навігації та керування високої складності. Порівняння підходів до парсингу показало, що rpy mavlink забезпечує повний контроль і є корисним для дослідницьких задач і нестандартних рішень, тоді як DroneKit-Python значно спрощує і прискорює створення прикладних автономних систем завдяки зручним інтерфейсам. Вибір між цими підходами слід здійснювати з урахуванням вимог конкретного проекту і прийняттого балансу між швидкістю розроблення та гнучкістю.

Окрему увагу приділено питанням безпеки MAVLink. Виявлено, що відсутність вбудованих механізмів конфіденційності та автентифікації у стандартній реалізації залишає канал телеметрії вразливим до перехоплення і ін'єкції команд, що зумовлює потребу у подальшій стандартизації захисних рішень і впровадженні перевірених криптографічних механізмів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення і впровадження легковагових криптографічних надбудов над MAVLink із гарантованим балансом між рівнем захисту та затримками передавання, а також з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролерів автопілотів. Перспективним є застосування методів глибинного навчання для аналізу телеметричних потоків з метою виявлення аномалій і прогнозування відмов за допомогою рекурентних архітектур і трансформерів. Значний науковий і прикладний інтерес становить побудова децентралізованих систем керування роєм із прямим обміном телеметрією між апаратами у межах протоколу MAVLink, що відкриває шлях до узгодженої колективної поведінки, кооперативного уникнення зіткнень і виконання спільних завдань без залежності від централізованої наземної станції.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення і впровадження легковагових криптографічних надбудов над MAVLink із гарантованим балансом між рівнем захисту та затримками передавання, а також з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролерів автопілотів. Перспективним є застосування методів глибинного навчання для аналізу телеметричних потоків з метою виявлення аномалій і прогнозування відмов за допомогою рекурентних архітектур і трансформерів. Значний науковий і прикладний інтерес становить побудова децентралізованих систем керування роєм із прямим обміном телеметрією між апаратами у межах протоколу MAVLink, що відкриває шлях до узгодженої колективної поведінки, кооперативного уникнення зіткнень і виконання спільних завдань без залежності від централізованої наземної станції.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутні.

Список використаних джерел / References

1. Akib A. S. M. A. S. et al. Efficient Route Planning and Navigation in Drones Using Pixhawk Autopilot. *2025 6th International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control (AIRC)*. IEEE. 2025. doi: [10.1109/airc64931.2025.11077519](https://doi.org/10.1109/airc64931.2025.11077519)
2. ArduPilot. ArduPilot Development Team. URL: <https://ardupilot.org/>
3. Unmanned aerial vehicle. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Безпілотний_літальний_апарат [in Ukrainian].
4. ArduPilot vs PX4: The Ultimate Guide to Open-Source Flight Control. A-Bots. URL: <https://a-bots.com/blog/PX4-vs-ArduPilot>.
5. Feng L., Fangchao Q. Research on the Hardware Structure Characteristics and EKF Filtering Algorithm of the Autopilot PIXHAWK. *2016 International Conference on Intelligent, Mechatronics and Control Engineering (IMCCC)*. 2016. doi: [10.1109/IMCCC.2016.128](https://doi.org/10.1109/IMCCC.2016.128)
6. Gharibi M., Boutaba R., Waslander S. L. Internet of Drones. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1148–1162. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2537208](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2537208)
7. Holybro Pixhawk 6C. PX4 Autopilot. URL: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk6c.html.
8. Holybro Pixhawk 6X-RT. Holybro. URL: <https://holybro.com/products/pixhawk-6x-rt> (дата звернення: 20.07.2025).
9. ArduPilot vs PX4: The Ultimate Guide to Open-Source Flight Control. A-Bots. URL: <https://a-bots.com/blog/PX4-vs-ArduPilot>.
10. Kumar A. et al. PI Drone using Python. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/358227145_PI_Drone_using_Python
11. Villacis J. L. P. et al. Telemetry and Video Surveillance System in a UAV for the Control and Monitoring of Long-Distance Missions. *Lecture Notes in Computer Science*. 2020. Vol. 12253. P. 556–569.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF MAVLINK TELEMETRY FOR UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS USING PIXHAWK FLIGHT CONTROLLERS

Nazarenko O. H.

Postgraduate Student
Sumy National Agrarian University
40000, Herasyima Kondratieva Str., 160, Sumy, Ukraine
ATZT "Ukrainian Motors"
61038, Saltivske Shosse, 43, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-2373-1159>
e-mail: nazarenko.oleksii@gmail.com

Ushkarenko O. O.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
54007, Heroes of Ukraine Avenue, 9, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3159-330X>
e-mail: oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua

Dyakonov O. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
54007, Heroes of Ukraine Avenue, 9, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7438-7066>
e-mail: alex.s.dyakonov@gmail.com

Sirivchuk A. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
54007, Heroes of Ukraine Avenue, 9, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2927-2600>
e-mail: sirivchuka@gmail.com

Obrubov A. V.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
National University of Shipbuilding Admiral Makarov
54007, Heroes of Ukraine Avenue, 9, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9667-1703>
e-mail: andrii.obrubov@nuos.edu.ua

Abstract. This article presents a comprehensive study of the acquisition, parsing, processing, and analytical use of telemetry data from Pixhawk-standard flight controllers, which are widely employed in unmanned aircraft systems (UAS). The architecture of the open Pixhawk hardware platform, its modular structure, and the principles of interaction among sensors, controllers, and external compute modules are described in detail. We examine the composition and functional characteristics of the primary sensors that generate real-time telemetry streams. Special attention is paid to the MAVLink communication protocol, which underpins data transfer between the drone's hardware and ground stations. Practical examples of telemetry parsing implemented in Python with specialized libraries such as pymavlink and DroneKit-Python are provided. We analyze how the resulting data can be used for real-time health monitoring of the UAV, post-flight analysis, and the development of systems that enhance flight autonomy and safety. The paper dissects packet structures, message types, and their encoding principles, and describes error-detection and correction mechanisms. The study also evaluates the use of processed telemetry for real-time monitoring of the UAV's technical condition, for post-flight analysis, and for optimizing control parameters.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), Pixhawk, telemetry, MAVLink, intelligent control, data parsing, multi-channel data acquisition system, coordinates, cybersecurity, automatic orientation, cloud data processing.

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

*Всеукраїнський науково-технічний
журнал*

**№ 2(55)
2025**

Головний редактор:

А. Топалов

Відповідальний редактор:

Н. Стецюк

Літературний редактор:

О. Роспопа

Комп'ютерна верстка:

О. Луканюк

Підписано до друку 29.12.2025 р. Формат 60*84/8

Умовн. друк. арк. 23,5. Тираж: 100 прим.

Адреса видавництва:

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

e-mail: redntv@nung.edu.ua, mpky@nung.edu.ua

<https://mpky.nung.edu.ua>

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

*All-Ukrainian Scientific and Technical
Journal*

**No 2(55)
2025**

Editor-in-Chief:

A. Topalov

Managing editor:

N. Stetsiuk

Language editor:

O. Rospopa

Desktop Publishing:

O. Lukaniuk

Signed for print 29.12.2025. Format 60*84/8
Conventional printed pages 23.5. Circulation 100 copies

Publishing address:

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
e-mail: redntv@nung.edu.ua, mpky@nung.edu.ua
<https://mpky.nung.edu.ua>