

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ



МАТЕРІАЛИ
VII ФОРУМУ
**«Автоматизація, електроніка та
робототехніка. Стратегії розвитку та
інноваційні технології»**
AERT-2025

11 - 12 грудня 2025 р.

Харків 2025



Збірник матеріалів VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025. – Харків, ХНУРЕ, 2025. – 105 стр.

В збірник включені матеріали VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025.



VII форум «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025 проведено кафедрами:



- мікропроцесорних технологій і систем (MTC),



- комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAR).

Видання підготоване
кафедрою мікропроцесорних технологій і систем (MTC)
Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ)

61166 Україна, Харків, просп. Науки, 14

Тел. +38 (057) 755 0220

Е-mail:

oleh.zubkov@nure.ua

© Харківський
національний університет
радіоелектроніки (ХНУРЕ), 2025

КОМІТЕТ ФОРУМУ

Голова комітету форуму:

Романенков Ю.О. д.т.н., проф., проректор з наукової роботи ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Програмний комітет форуму:

Зубков О.В. к.т.н., доц., в.о. зав. каф. МТС ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Воргуль О.В. к.т.н., доц., проф. каф. МТС ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Новоселов С.П. к.т.н., доц., проф. каф. КІТАР ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Горелов Д.Ю. к.т.н., доц., доц. каф. КРiCTЗi ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Сичова О.В. к.т.н., доц. каф. КІТАР ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Теслюк С.І. старший викладач каф. КІТАР ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Чумак В.С. старший викладач каф. МТС ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Волох А.В. асистент каф. МТС ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

Бойко Н.В. асистент каф. МТС ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

ТЕХНОЛОГІЯ OFDM: ВІД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ДО СЕРЦЯ 5G

професор, к.т.н., Воргуль О.В., студент Оніщенко А.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м. Харків, Україна

e-mail: oleksandr.vorgul@nure.ua

Abstract

The review considers orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) — a technology that has become the basis of modern high-speed communication systems. Its path from theoretical works of the 1960s to the status of a key physical layer technology in the Wi-Fi, 4G LTE and 5G NR standards is traced. The fundamental principles are analyzed: parallel transmission on orthogonal subcarriers, the use of FFT/SFFT and the role of the cyclic prefix in combating distortion. Special attention is paid to the adaptation of OFDM in the 5G NR standard, where the concept of flexible numerology made it possible to meet the diverse requirements of new services. The problems (high PAPR) and prospects of the technology are briefly discussed.

Keywords: OFDM, orthogonal subcarriers, FFT (SFFT), cyclic prefix (CP), 5G NR, numerology.

Вступ

Ортогональне частотне поділення каналів (OFDM) є фундаментальною технологією цифрової модуляції для сучасних бездротових і провідних систем. Її здатність ефективно протистояти багатопроменевому поширенню при високій спектральній ефективності зумовила вибір OFDM для стандартів Wi-Fi, цифрового телебачення, 4G LTE та 5G NR. Мета цього звіту — пояснити, як історичний розвиток та базові принципи OFDM призвели до її домінування на фізичному рівні зв'язку, з фокусом на реалізацію в 5G New Radio.

Історична еволюція та основні принципи

Ідея використання множини ортогональних піднесучах була математично обґрунтована Робертом Чангом у 1966 р. [1]. Ключовим проривом для практичної реалізації стала робота Вайнштейна та Еберта (1971 р.), що запропонували використовувати алгоритми ШПФ/ЗШПФ для цифрової генерації та обробки піднесучах, що перенесло складність реалізації в цифрову область [2]. Широке впровадження стало можливим із розвитком мікроелектроніки у 1980-90-х роках, розпочавшись з xDSL та DAB [3], а потім поширившись на Wi-Fi, DVB-T та 4G LTE. Вершиною стало прийняття OFDM/OFDMA в якості основи фізичного рівня для обох напрямків передачі у стандарті 5G NR [7].

Сутність OFDM — у вирішенні проблем багатопроменевості та спектральної ефективності. Високошвидкісний потік розбивається на N паралельних низькошвидкісних потоків, що передаються на ортогональних

піднесучах. Збільшення тривалості символу підвищує стійкість до міжсимвольної інтерференції (ISI). Ортогональність (крок $\Delta f = 1 / T_u$) дозволяє розміщувати піднесучі щільно, без захисних інтервалів, максимізуючи використання смуги та виключаючи міжканальну інтерференцію (ICI) [3,6].

Для захисту від багатопроменевості використовується циклічний префікс (CP) — копія кінця символу, що додається на його початок. Приймач відкидає CP, що усуває ISI між символами. Оскільки відкинута частина — копія кінця символу, вплив каналу зводиться до множення переданого символу (у частотній області) на комплексний коефіцієнт для кожної піднесучої. Це дозволяє легко компенсувати спотворення (частотний еквалайзинг) і відновлює ортогональність, усуваючи ICI всередині символу. Довжина CP (T_{cp}) обирається більшою за максимальну затримку в каналі, але її збільшення знижує корисну швидкість, створюючи компроміс при проектуванні [3,6,7].

Практична реалізація заснована на алгоритмах ШПФ/ЗШПФ, що виконують перетворення між частотною та часовою областями. Ефективність ШПФ зробила OFDM реалізованим, але висуває вимоги до обчислювальної потужності. Коректна робота також критично залежить від точної синхронізації та компенсації зсуву несучої частоти (CFO) [3,6].

OFDM у 5G New Radio: гнучкість та виклики

Стандарт 5G NR висуває різноманітні вимоги: екстремальні швидкості (eMBB), наднизькі затримки (URLLC), підтримка масового IoT (mMTC). OFDM у формі OFDMA був обраний як основа фізичного рівня, підтвердивши свою гнучкість.

Ключовим нововведенням стала **гнучка нумерологія** [7]. Параметр μ задає крок піднесучої Δf (15, 30, 60, 120, 240 кГц) та тривалість символу. Це дозволяє адаптувати систему до різних умов: малі кроки (15 кГц) для великих комірок; великі кроки (60-240 кГц) для високої мобільності, mmWave-діапазонів та зниження затримки (URLLC). Довжина CP також адаптується.

OFDM у 5G ефективно вирішує й інші завдання: агрегація піднесучах у дуже широкі смуги для гігабітних швидкостей eMBB; ідеальна сумісність з Massive MIMO, де обробка сигналу (еквалайзинг, формування променя) виконується незалежно для кожної піднесучої у частотній області [7].

Однак впровадження OFDM у 5G стикається з викликами:

1. **Високий PAPR:** Пікова потужність OFDM-сигналу значно перевищує середню, вимагаючи неефективних лінійних підсилювачів, особливо в мобільних пристроях. Для боротьби використовуються спеціальні методи, а для висхідного каналу в низці сценаріїв — схема DFT-s-OFDM з меншим PAPR [7].

2. **Жорсткі вимоги до синхронізації:** Великі Δf та вимоги URLLC потребують надзвичайно точних алгоритмів часової та частотної синхронізації, що реалізуються через спеціальні сигнали (PSS, SSS) та пілот-сигнали (DM-RS) [7].
3. **Вразливість до доплерівського зсуву:** В умовах екстремальної мобільності або mmWave доплерівський зсув може порушувати ортогональність, вимагаючи просунутих алгоритмів компенсації.

Висновок

OFDM пройшла шлях від математичної концепції до технологічного базису цифрового зв'язку. Її успіх заснований на унікальному поєднанні високої спектральної ефективності (ортогональність) та стійкості до багатопроменевості (циклічний префікс), що реалізується завдяки алгоритмам ШПФ. У 5G NR OFDM підтвердив свою актуальність, а впроваджена гнучка нумерологія дозволила адаптувати технологію під суперечливі вимоги нових сервісів. Незважаючи на виклики (PAPR, синхронізація), ведуться активні дослідження щодо їх пом'якшення. Очікується, що принципи OFDM продовжуватимуть грати ключову роль в еволюції систем зв'язку, включаючи 5G Advanced та 6G.

Список використаних джерел

1. Chang, R. W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *The Bell System Technical Journal*, 45(10), 1775–1796 (1966).
2. Weinstein, S. B., & Ebert, P. M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 19(5), 628–634 (1971).
3. Proakis, J. G., & Salehi, M. *Digital Communications* (5th ed.). McGraw-Hill Education (2008).
4. IEEE Std 802.11-2020. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* (2021).
5. ETSI EN 300 744 V1.6.1: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television* (2009).
6. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* (2nd ed.). Academic Press (2014).
7. 3GPP TS 38.211 V17.4.0: *NR; Physical channels and modulation* (Release 17) (2022).

ДИНАМІЧНА ЧАСТКОВА РЕКОНФІГУРАЦІЯ В СУЧАСНИХ ПЛІС: ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

професор, к.т.н., Воргуль О.В., студент Сербський Г.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м. Харків, Україна

e-mail: oleksandr.vorgul@nure.ua

Abstract

The abstracts present an analysis of the dynamic partial reconfiguration (DPR) technology in programmable logic integrated circuits. The key motives, implementation methodology in Xilinx Vivado, comparison of solutions from other manufacturers, main problems and promising areas of application are considered. Special attention is paid to adaptive communication systems, aerospace engineering and artificial intelligence. The summary is based on the systematization of modern scientific and technical sources.

Keywords: DYNAMIC PARTIAL RECONFIGURATION, FPGA, VIVADO, ICAP, ADAPTABILITY.

Вступ

Сучасні складні електронні системи вимагають підвищеної гнучкості, ефективності та надійності. Традиційна повна переконфігурація ПЛІС часто не відповідає цим вимогам, особливо для систем безперервної роботи. Технологія динамічної часткової реконфігурації (DPR) дозволяє змінювати частину логічної структури ПЛІС без зупинки всієї системи, відкриваючи шлях до створення адаптивних, енергоощадних та відмовостійких апаратних рішень [1, 2].

Сутність та мотивація DPR

DPR — це процес зміни конфігурації виділеної області пам'яті ПЛІС під час її роботи, що призводить до оновлення логічної функції без впливу на інші частини пристрою. Основні мотиви для її використання включають:

1. Оптимізацію ресурсів: можливість завантажувати лише необхідні в даний момент функціональні модулі в одну фізичну область кристала.
2. Підвищення гнучкості: динамічну адаптацію системи до змінних умов, наприклад, швидке перемикання протоколів зв'язку в SDR [3].
3. Зниження енергоспоживання: відключення невикористовуваних областей шляхом їх вивантаження та потенційного зниження тактової частоти.
4. Надійність та "гаряче" оновлення: можливість виправляти помилки або додавати функції без простої критичних систем, таких як космічні апарати [4].
5. Прискорення обробки: динамічна підгрузка спеціалізованих апаратних прискорювачів для алгоритмів ШІ або обробки сигналів.

Реалізація в Xilinx Vivado та альтернативи

Реалізація DPR у Xilinx Vivado базується на чіткому архітектурному плануванні з виділенням статичної області та однієї або кількох реконфігурованих областей (RP). Зв'язок між ними забезпечується через фіксовані інтерфейси (наприклад, AXI). Керування процесом здійснюється за допомогою внутрішнього порту ICAP та контролера AXI HWICAP, що дозволяє програмному забезпеченню на процесорному ядрі завантажувати часткові бітстрими нових модулів (RM) у RP [5, 6].

Інші виробники пропонують схожі, але спеціалізовані рішення:

- Intel (Quartus Prime): аналогічна методологія для сімейств Stratix та Agilex з акцентом на часовий аналіз [7].
- Microchip (PolarFire): використання вбудованої Flash-пам'яті для швидкої та надійної реконфігурації, що важливо для аерокосмічних застосувань [8].
- Lattice Semiconductor (ECP5, CrossLink-NX): орієнтація на мінімальну затримку та швидке перемикання для IoT та відеоаналітики [9].

Проблеми та обмеження

Впровадження DPR пов'язане зі значними складнощами:

1. Висока складність проектування, що вимагає глибоких знань архітектури ПЛІС та суворої методології.
2. Обмеженість та складність інструментів проектування та налагодження.
3. Критично важливі завдання синхронізації та забезпечення цілісності даних під час перемикання модулів.
4. Жорсткі обмеження на розміри та розміщення реконфігурованих модулів.
5. Потенційні загрози безпеки через динамічне завантаження конфігурації, що вимагає механізмів аутентифікації [10].

Області застосування

DPR знаходить застосування там, де її переваги вирішальні:

Телекомунікації та SDR: адаптивне перемикання протоколів зв'язку.

Аерокосмічна техніка: оновлення логіки супутників та підвищення відмовостійкості.

Штучний інтелект та обчислення: динамічна зміна апаратних прискорювачів для різних нейронних мереж.

Автомобільна електроніка: адаптація систем ADAS до умов навколишнього середовища.

Медицина та промислова автоматизація: гнучке перемикання режимів роботи обладнання.

Висновок

DPR є потужною технологією для створення адаптивних та ефективних систем на ПЛІС. Незважаючи на складність реалізації та наявні проблеми, її потенціал для критично важливих галузей, таких як

зв'язок, космос та автономні системи, є надзвичайно високим. Розвиток інструментів, методологій безпеки та нових архітектур ПЛІС (наприклад, АСАР) буде сприяти подальшому поширенню DPR як ключової технології для майбутніх обчислювальних платформ.

Список використаних джерел

1. Vipin, K., & Fahmy, S. A. (2018). FPGA Dynamic and Partial Reconfiguration: A Survey of Architectures, Methods, and Applications. ACM Computing Surveys.
 2. Xilinx, Inc. Vivado Design Suite User Guide: Dynamic Function eXchange (UG909).
 3. Wang, Z., & Liu, D. (2020). Software-Defined Radio Implementation Using Partial Reconfiguration on FPGA. Proc. of IEEE ICSPCC.
 4. Sterpone, L., & Ullah, A. (2017). On-Board Partial Reconfiguration for Space Applications. Proc. of IEEE Aerospace Conference.
 5. Xilinx, Inc. 7 Series FPGAs Configuration User Guide (UG470).
 6. Safronov, A. Yu. (2019). Design of digital systems on FPGAs using Vivado. Cham: Springer Nature Switzerland.
 7. Intel Corporation. Intel Quartus Prime Pro Edition User Guide: Partial Reconfiguration (UG-20085).
 8. Microchip Technology Inc. PolarFire FPGA and PolarFire SoC FPGA User Guide (UG0754).
 9. Lattice Semiconductor Corporation. ECP5 and ECP5-5G sysCONFIG Usage Guide (FPGA-TN-02030).
- Drzevitzky, S., et al. (2009). Proof-Carrying Hardware: Towards Runtime Verification of Reconfigurable Modules. Proc. of ReConFig.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF FPGA AND MICROCONTROLLER
ARCHITECTURES FOR REAL-TIME FILTERING IN AIRSPACE
SURVEILLANCE SYSTEMS**

PhD, Prof. Vorgul O., student Sierikov A.

Kharkiv National University of Radio Electronics, Department of MTS,
Kharkiv, Ukraine

e-mail: oleksandr.vorgul@nure.ua, anton.sierikov1@nure.ua

Abstract. Modern Airspace Surveillance Systems (ASSS) demand high-speed, low-latency data processing to ensure timely and accurate target tracking. This paper presents a comparative analysis of two hardware platforms—Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) and high-performance Microcontrollers (MCs)—for implementing critical Kalman Filter (KF) algorithms used in radar data preprocessing and noise reduction. The study evaluates the architectural suitability of each platform with respect to processing speed, determinism, power efficiency, and development complexity. The findings indicate that while MCs offer advantages in development ease and power efficiency for localized tasks, FPGAs are indispensable for achieving the ultra-low latency and massive parallelism required for complex multi-sensor data fusion. This capability directly enhances the quality and integrity of information support for air traffic control.

Keywords: FPGA; Microcontroller (MC); Kalman Filter (KF); Real-Time Processing; Data Filtering; Air Surveillance Systems (ASSS); Main body.

Introduction. The quality of information support provided by Airspace Surveillance Systems (ASSS) is contingent upon the timeliness and accuracy of processing large volumes of heterogeneous data from various sensors (e.g., radars, ADS-B). Contemporary requirements for tracking high-speed and maneuvering targets impose stringent constraints on processing latency. Traditional software solutions running on general-purpose processors often fail to guarantee the necessary level of deterministic execution time, leading to computational bottlenecks. This results in degraded trajectory prediction accuracy, which is unacceptable for mission-critical systems. The objective of this work is to conduct a comparative analysis of FPGA and Microcontroller (MC) architectures as hardware platforms for implementing pre-filtering algorithms, specifically the Kalman Filter (KF). The aim is to provide a rationale for platform selection to enhance the quality of information support in ASSS.

Main body. For an objective comparative analysis, the classic Kalman Filter (KF) is selected as the foundational recursive algorithm for noise reduction and state estimation of aerial objects. The implementation of this algorithm on different hardware platforms—FPGAs and Microcontrollers

(MCs)—highlights their fundamental architectural suitability for high-speed surveillance systems.

The architectural differences are key. FPGAs are distinguished by their flexibility, allowing for massive parallel execution of all necessary KF matrix operations (multiplication, addition, inversion) simultaneously, rather than sequentially. This is achieved through the creation of a dedicated hardware pipeline. This parallelism, combined with the use of optimized fixed-point arithmetic, results in ultra-low, strictly deterministic latency (on the order of microseconds). This performance is crucial for ensuring the timeliness of information support for tracking highly dynamic targets. While development in Hardware Description Languages (HDLs) is complex, it allows for the maximum optimization of underlying hardware resources.

Conversely, Microcontrollers (MCs) rely on a traditional sequential architecture (von Neumann). The algorithm is executed step-by-step by the CPU core, typically utilizing floating-point arithmetic. This sequential processing limits the overall throughput and leads to higher, non-deterministic latency compared to FPGAs, often introducing fluctuations due to RTOS overhead. Nonetheless, MCs are the superior choice for energy efficiency and are better suited for distributed peripheral nodes, low-level control tasks, and primary data filtering in autonomous systems where development speed and lower power consumption are prioritized.

The comparative analysis reveals that the choice of architecture directly impacts the quality of information support through several key metrics (Table 1).

Table 1 – Comparative analysis of FPGA and MC architectures for data filtering tasks.

Quality Criterion	FPGA	MC (Microcontroller)	Impact on Information Quality
Speed / Latency	Ultra-low (μ s) due to parallelism	Medium; limited by sequential processing	Determines the timeliness of tracking high-speed targets.
Throughput	Massively parallel processing of thousands of points/sec.	Limited by single-core performance.	Determines the capability for multi-sensor data fusion.
Determinism	Strictly deterministic execution time.	Potential fluctuations due to RTOS and interrupts.	Ensures reliability and synchronization accuracy.

Power Consumption	Higher under full load.	Lower in standby or periodic processing modes.	Affects system autonomy and mobility.
-------------------	-------------------------	--	---------------------------------------

The key findings confirm that FPGAs offer a decisive advantage in speed, throughput, and determinism. This makes them essential for centralized processing nodes managing multi-sensor data fusion, directly enhancing the operational quality and accuracy of trajectory analysis under heavy load. MCs, excelling in power efficiency and development complexity, are optimal for peripheral nodes and auxiliary subsystems, complementing the high-speed core.

Conclusions. This study confirms that the choice of hardware platform architecture is crucial for improving the quality of information support in ASSS. It has been demonstrated that FPGAs are indispensable for meeting stringent real-time requirements in filtering and radar data fusion algorithms. Future research will focus on integrating more complex algorithms (e.g., Unscented Kalman Filter - UKF) and implementing "Edge AI" components on FPGAs for direct classification of aerial objects at the point of data collection.

References

1. Цифрова обробка сигналів: теорія і практика : навч. посіб. / О. М. Кудирко, В. В. Шевченко, І. П. Бойко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 344 с.
2. Системи спостереження за повітряним простором : монографія / П. С. Ковальчук, Д. Ю. Мельник, А. В. Романенко ; за ред. П. С. Ковальчука. – Харків : ХНУПС, 2019. – 276 с.
3. Kalman Filtering: Theory and Applications / B. D. O. Anderson, J. B. Moore. – New York : Dover Publications, 2012. – 410 p.
4. Field-Programmable Gate Arrays: Architecture and Design Methods / S. Brown, J. Rose. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2015. – 530 p.
5. Проектування вбудованих систем на основі мікроконтролерів : навч. посіб. / Ю. Л. Коваленко, О. М. Дяченко, М. В. Гончар. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. – 298 с.
6. Real-Time Digital Signal Processing on FPGAs / R. Tessier, W. Burleson. – New York : Springer, 2016. – 365 p.
7. Алгоритми оцінювання стану та фільтрації сигналів : монографія / В. І. Тимошенко, А. А. Лисенко. – Одеса : ОНПУ, 2020. – 241 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОЛПШЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

к.т.н., асистент Волох А.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра

Мікропроцесорних технологій і систем

e-mail: andrii.volokh@nure.ua

Abstract. The article examines existing methods for reducing microcontroller power consumption. The impact of changing the microcontroller core frequency on energy usage during the execution of a complex computational task is analyzed. It is shown that the feasibility of using dynamic voltage and frequency scaling (DVFS) or various power-saving modes in microcontrollers must be evaluated while taking into account the additional overhead introduced by these modes.

Ключові слова: вбудовані системи, енергоефективність.

Вступ. Задачі енергоефективності вбудованих систем вирішуються в двох основних напрямках: перший це використання методів отримання енергії від зовнішніх джерел, таких як сонце, вітер, тепло або радіовипромінювання; другий – зменшення потужності споживання за рахунок динамічного масштабування напруги та частоти (DVFS) [1-2], використання режимів енергозбереження та розробки програм для пристроїв з урахуванням максимальної оптимізації [3-4]. У різних SoC існує декілька типів режимів енергозбереження, які відрізняються різним рівнем споживання, продуктивністю роботи, а також, що важливо, різною швидкістю повернення в активний стан. Одночасне врахування вказаних трьох факторів і пошук простих алгоритмів доцільності використання тих чи інших методів зменшення енергоспоживання мікроконтролерів (МК) дозволять досягти максимальної ефективності роботи вбудованих систем.

Основна частина. Згідно загальновідомого рівняння енергія залежить не тільки від потужності споживання, а й від загальної тривалості роботи системи з такою потужністю. Але підвищення частоти роботи процесора МК для вирішення задач з високою обчислювальною інтенсивністю не завжди приводить до збільшення потужності споживання. Використання ж таких методів зниження енергоспоживання як DVFS та перемикання з активного в режим пониженого споживання викликає додаткові накладні витрати, які можуть бути суттєвими в порівнянні з загальною тривалістю та споживанням основного циклу роботи МК. Крім того навіть для найпростіших систем загальна потужність споживання МК складається не тільки зі споживання його процесора, а й зі споживання периферійних блоків [5-6].

Підвищення частоти роботи процесору мікроконтролеру в загальному випадку збільшує споживання і зменшує час виконання програмного коду. В ідеальних умовах час виконання обернено пропорційний до частоти процесора. Дослідження впливу частоти на енергоефективність

виконувалося на базі мікроконтролера STM32F407, який підтримує широкий діапазон частот до максимального значення – 168 МГц [7]. Енергоефективність роботи МК за рахунок збільшення частоти досягається, коли збільшення енергії компенсується прискоренням виконання програми, в тому числі з урахуванням частки енергії, яка споживається периферійними блоками. Динамічне масштабування напруги та частоти (DVFS) в мікроконтролері STM32F407 виконується шляхом модифікації параметрів PLL (Phase-Locked Loop), що також вимагає повторної ініціалізації системного таймеру SysTick і периферійних блоків, в зв'язку з чим додаються накладні витрати до загального часу виконання програми. STM32F407 має три режими енергозбереження: Sleep, Stop і Standby. Використання цих режимів на практиці, крім зменшення споживання, також приводить до накладних витрат, пов'язаних з часовими затримками виходу з таких режимів. Тобто і DVFS, і режими енергозбереження вносять додаткові затримки до загального часу виконання програми мікроконтролером. Загальну ефективність використання вказаних режимів енергозбереження можна оцінити за такою формулою:

$$E_{opt} + E_{ed} < E_{st}$$

де E_{st} та E_{opt} – енергії споживання до та після використання режиму енергозбереження, E_{ed} – енергія, що витрачається на зміну режимів.

Якщо використовується DVFS, то додаткові витрати E_{ed} будуть пов'язані з переходом до цільової частоти та поверненням до її початкового значення. Для режимів енергозбереження це витрати на перехід в та пробудження з одного з трьох можливих станів з низьким споживанням. Велике значення E_{ed} , в порівнянні з загальним споживанням системи, ставить питання про доцільність використання обраного варіанту енергозбереження.

Експериментальне дослідження впливу зміни частоти на енергоспоживання наведено на рисунку 1. Згідно документації STMicroelectronics, типовий струм мікроконтролера STM32F407 в активному режимі становить приблизно 238 мкА/МГц, що узгоджується з результатами дослідження. На основі результатів експериментальної перевірки можна зробити висновок, що хоча струм зростає по мірі збільшення частоти, одночасне скорочення часу виконання програми компенсує зростання енергії, яку споживає мікроконтролер. При цьому периферійні блоки споживають сталу енергію, на яку практично не впливає зміна частоти, що пояснюється зменшенням часу їх роботи при збільшенні частоти ядра. Таким чином, якщо основну частину програми МК складає обчислювально складна задача, то споживання електроенергії буде зменшуватися з ростом частоти ядра.

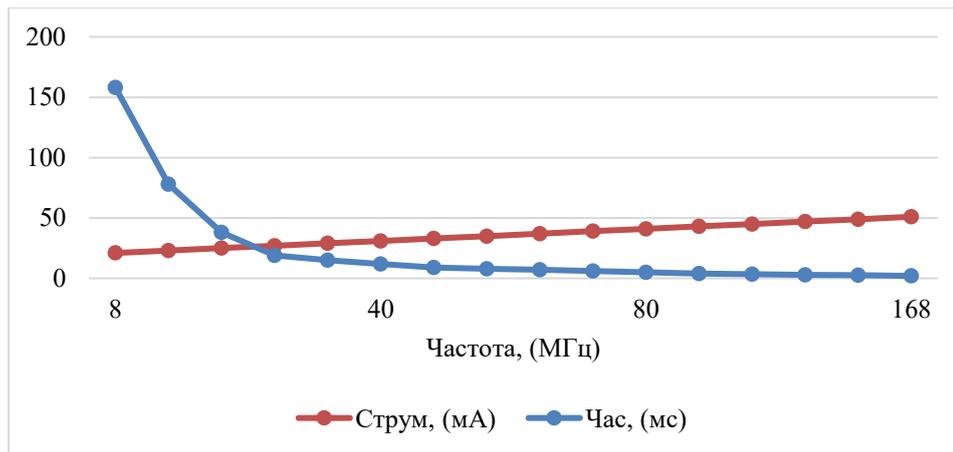


Рисунок 1 - Залежність струму споживання та часу виконання програми від частоти ядра МК.

Окремо проведена перевірка впливу використання режиму DVFS та різних режимів енергозбереження - Sleep, Stop і Standby, на загальну затримку виконання програми. При використанні DVFS часові затримки майже не залежать від різниці між частотами до переходу і після переходу у вказаний режим і для STM32F407 в середньому складають до 70 мс. З трьох режимів енергозбереження найбільш ошадливим з точки зору споживання, передбачувано, став режим Standby, найменш – Sleep, що також добре відомо з документації до мікроконтролерів [7]. Інтерес представляє величина затримок, пов'язана з виходом з цих режимів і результати експериментів щодо цього наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Час виходу в активний стан з різних режимів енергозбереження.

Режим	Час виходу з режиму (мкс)
Sleep	0.675
Stop	5.517
Standby	23.61

Висновки. Отримані експериментальні результати дозволяють зробити рекомендації щодо поліпшення енергоефективності роботи вбудованих системах-на-кристалі (SoC). Якщо брати ідеальні умови, коли процесор мікроконтролеру виконує обчислювально складні задачі, енергоспоживання процесору майже не залежить від частоти з якою він працює, оскільки збільшення енергії пов'язане з ростом частоти компенсується зменшенням часу виконання задачі. Використання низької частоти ядра мікроконтролеру не дозволяє зменшити споживання його периферійних блоків, оскільки подовжується загальний час їх роботи. Технологія DVFS призводить до появи додаткових енергетичних витрат та затримок на кожне переключення частоти, тому можливість її

використання потрібно ретельно зважувати з урахуванням загального часу, який витрачається на виконання основної програми. Хоча енергозберігаючі режими Stop та Standby мають найбільший вплив на зниження загального енергоспоживання мікроконтролеру, вони також вносять найбільші затримки на вихід з них в активний режим. Тільки режим Sleep має дуже малу затримку виходу з нього, що дозволяє використовувати його в задачах енергозбереження майже без обмежень.

Список використаних джерел

1. Khrijj S., Cheour R., Kanoun O. Динамічне масштабування напруги та частоти і циклування активності для наднизькопотужних бездротових сенсорних вузлів. *Electronics*, 2022, т. 11, с. 4071.

2. Lueangvilai A.; Robertson C.; Martinez C. Техніка динамічного керування частотою для енергокерування у комерційних мікроконтролерах. *Journal of Computer Science and Engineering*, 2012, т. 6, с. 79–88.

3. Thakkar A., Chaudhari K., Shah M. Комплексний огляд енерго-ефективних методів керування живленням. *Procedia Computer Science*, 2020, т. 167, с. 1189–1199.

4. Kyrpota F., Khalimonov Y., Chumak V. Тенденції та інновації в енергоефективній розробці мікропроцесорів: комплексний аналіз. *MC&FPGA*, 2023, с. 42-43.

5. Слабінога М., Пашковський Б., Гайдейчук С. Емпіричне моделювання залежності енергоспоживання мікроконтролерної системи на базі ESP-32 від частоти опитування сенсорів. *Вісник КрНУ*, 2024, т. 2, с. 63-67.

6. Adegbiya T., Rogacs A., Patel C., Gordon-Ross A. Оптимізація мікропроцесорів для Інтернету речей. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2018, т. 37, с. 7–20.

STM32F407/417: веб-сайт. - URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html> (дата звернення: 10.11.2025).

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЕННЯ MFCC КОЕФІЦІЄНТІВ НА АПАРАТНІЙ ПЛАТФОРМИ STM32

студент Ткачов Д.В., доцент, к.т.н. Зубков О.В.,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м.Харків, Україна
e-mail: denys.tkachov@nure.ua, oleh.zubkov@nure.ua

Abstract. The relevance of calculating cepstral coefficients on the STM32 hardware platform for subsequent recognition by neural networks is demonstrated. An algorithm for calculating the coefficients, requiring minimal RAM usage, was developed. The algorithm takes into account the features of the librossa library to achieve identical calculations in Python and C++ for STM32. The execution time of the algorithm blocks was measured and the possibility of calculating the MFCC in real time was proven.

Ключові слова: кепстральні коефіцієнти, мікроконтролер, STM32, нейронна мережа, алгоритм, DSP, час обчислення.

Вступ. Аналіз звукових сигналів і виділення інформативних ознак є базовою задачею у багатьох прикладних системах: розпізнавання мовлення та ключових слів (keyword spotting), класифікація звуків оточення, виявлення подій безпеки та біометрична ідентифікація [1]. Однією з найбільш поширених та перевірених у практиці характеристик для цих задач є набір Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), який забезпечує компактне і інформативне представлення спектрально-перцептивних властивостей сигналу [2,3]. Оскільки дедалі більше застосунків переміщується на «граничні» пристрої (edge) — з міркувань енергоефективності, безпеки й латентності — виникає необхідність виконувати обчислення MFCC безпосередньо на мікроконтролерах з обмеженими ресурсами, зокрема на сімействі STM32. Це вимагає адаптацій алгоритму (спрощення фільтрбанків, фіксована арифметика, оптимізовані FFT/DFT реалізації) та використання апаратних оптимізацій (DSP-інструкції й бібліотеки), щоб забезпечити реальноремне виконання та прийнятне енергоспоживання на пристроях із обмеженою пам'яттю і тактовою частотою.

Поява все більшої кількості застосунків «завжди-увімк» (always-on) для голосових інтерфейсів, моніторингу довкілля та IoT-пристроїв робить критично важливим забезпечення стабільного й енергоефективного фронтенду для виділення ознак. Сучасні дослідження показують практичні підходи до спрощення та апаратно-специфічної оптимізації MFCC для вбудованих платформ, а також демонструють, що при розумних компромісах точності можна домогтися прийнятної продуктивності на MCU класу Cortex-M. Крім того, наявні програмні комплекти (наприклад, ARM CMSIS-DSP) і приклади реалізацій для STM32 дозволяють

прискорити розробку та підвищити ефективність обчислень при збереженні коректності спектральних перетворень.

Метою цього дослідження є розробка та апробація ефективної реалізації обчислення MFCC-коефіцієнтів на платформах STM32 з урахуванням апаратних обмежень (об'єм RAM/FLASH, пропускна здатність ADC та енергоспоживання). Крім того обчислення коефіцієнтів MFCC є першим кроком в задачах розпізнавання акустичних сигналів і оцінка часу обчислення коефіцієнтів, а також ресурсів на реалізацію обчислення є дуже важливим з точки зору подальшої інтеграції з нейронними мережами.

Основна частина.

Перед обчисленням MFCC коефіцієнтів аналоговий сигнал дискретизується у часі з частотою f_s та перетворюється у кодові комбінації за амплітудою. Потік відліків розбивається на перекриваючі кадри з розміром N відліків. Сам алгоритм обчислення коефіцієнтів MFCC складається з шести етапів [3]. Спочатку, для зменшення спектральних витіків виконується віконна обробка кадра (наприклад, вікно Хеммінга), тобто відліки аналогового сигналу помножуються на значення віконної функції $w[k]$ за формулою 1. Математично ця операція визначається формулою 2.

$$w[k] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right), k = 0 \dots N - 1 \quad (1)$$

$$s[k] = y_{frame}[k] \cdot w[k] \quad (2)$$

Стандартна DSP бібліотека для мікроконтролерів STM32 не містить вбудованих функцій віконної обробки. Тому реалізація віконної обробки – це послідовне помноження відліків сигналу на відліки вікна у циклі. На другому етапі виконується перетворення Фур'є (FFT). Реалізація FFT мінімізує час обчислень та витрати оперативної пам'яті. В результаті отримуємо масив спектральних компонент $X[k], k = 0 \dots N_{FFT} - 1$, а після цього обчислюється спектральна потужність

$$P[k] = \frac{|X[k]|^2}{N_{FFT}} \quad (3)$$

Стандартна DSP бібліотека містить вбудовану оптимізовану за швидкодією функцію перетворення Фур'є `arm_cfft_f32`, що видає комплексні значення на виході. За цими значеннями у циклі реалізується обчислення потужності $|X[k]|^2$. Наступний етап – це обчислення шкали частот Фішера за формулою

$$mel(f) = 2595 \log_{10}\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (4)$$

Далі для шкали задаються $M+2$ точок, що відповідають M трикутним фільтрам, а за ними розраховуються нормалізовані значення частот (біни)

$b_i = \lfloor (N_{FFT} + 1)f_i/f_s \rfloor$ і формуються імпульсні характеристики трикутних фільтрів $m=1 \dots M$ за формулою 5.

$$H_m(k) = \begin{cases} 0, k < b_{m-1} \\ \frac{k-b_{m-1}}{b_m-b_{m-1}}, b_{m-1} < k < b_m \\ \frac{b_{m+1}-k}{b_{m+1}-b_m}, b_m < k < b_{m+1} \\ 0, k > b_{m+1} \end{cases} \quad (5)$$

За допомогою прямого фільтруючого підходу обчислюється енергія сигналу на виході кожного фільтра

$$S_m(k) = \sum_{k=0}^{N_{FFT}/2} P[k] \cdot H_m(k) \quad (6)$$

Реалізація трикутних фільтрів у стандартній DSP бібліотеці відсутня. Тому для зменшення вимог до використання оперативної пам'яті розрахунок імпульсних характеристик проводиться заздалегідь та їх значення розміщуються у FLASH пам'яті. Так, як у STM32 читання FLASH пам'яті відбувається за 1 такт, то зменшення швидкодії не відбувається.

На останньому етапі виконується логарифмування значень енергії та обчислення дискретного косинусного (DCT) перетворення для розрахунку значень K коефіцієнтів MFCC c_n .

$$c_n = \sum_{m=1}^M S(m) \cdot \cos\left[\frac{\pi n}{M}(m - 0.5)\right], n = 0..K - 1$$

На цьому етапі використовується оптимізована функція бібліотеки DSP.

Результати досліджень.

Практична реалізація накопичення відліків аналогового сигналу після АЦП вимагає мінімального буфера розміром $N+N_{пер}$, де $N_{пер}$ – кількість відліків перекриття кадрів. Сам процес накопичення оптимізується за часом завдяки використанню кільцевого буфера та вбудованого DMA контролера, що заповнює цей буфер паралельно з роботою ядра процесора.

Для зменшення використаної оперативної пам'яті значення відліків віконної функції та імпульсних характеристик фільтрів розміщуються у флеш пам'яті, що дозволяє економити $2N$ комірок оперативної пам'яті, а, з урахуванням, що всі операції виконуються з числами з плаваючою комою, економія складає $8N$ байт. Додаткові вимоги до флеш пам'яті несуттєві, бо стандартні розміри програми для контролерів серії STM32F4 не перевищують 128кбайт, а контролери мають від 512кбайт флеш пам'яті.

Використання бібліотеки DSP для FFT та DCT передбачає, що вхідні та вихідні масиви повинні містити числа з плаваючою комою, що потребує по 4 байти на кожний елемент масиву. Використання обчислень з цілими числами виявило формування суттєвих похибок обчислень коефіцієнтів MFCC до 11%, особливо у випадку слабких акустичних сигналів.

Так, як для навчання сучасних нейронних мереж використовується мова Python, а для обчислення коефіцієнтів MFCC застосовується бібліотека librossa, було виконано перевірку результатів обчислення коефіцієнтів MFCC у контролері та з використанням бібліотеки librossa. Виявлена суттєва розбіжність між цими результатами була пов'язана з відмінністю алгоритма бібліотеки librossa у формулі (3), бо ділення відбувалось на N_{FFT}^2 . Після усунення розбіжності результатів обчислення коефіцієнтів MFCC було виконано вимірювання часу виконання основних операцій. При вимірюваннях використовувалась частота дискретизації 44100Гц та розмір кадра 1024 відліка, що відповідає часу 23мс. Результати вимірювань наведені у таблиці 1

Таблиця1 – Значення часу виконання основних операцій обчислення MFCC

Операція	$s[k]$	$P[k]$	c_n
Час обчислення, мс	0,3	0,61	4,2

Висновки. Реалізований алгоритм обчислення коефіцієнтів MFCC на мікроконтролері STM32F407 дозволяє виконувати всі операції у реальному часі при тактовій частоті процесора 168МГц. Алгоритм відповідає стандартній бібліотеці librossa, що широко використовується у сукупності з алгоритмами навчання нейронних мереж. Це дозволяє гарантувати вірну роботу вбудованих нейронних мереж у контролерах STM32 при їх попередньому навчанні на ПК.

Список використаних джерел

1. Gupta N., Ahlawat P. A Review of Audio Classification Techniques. 2024 International BIT Conference. Dhanbad, India. 07-08 December 2024. P. 1–16.
2. Wang, M., Chu, Z., Entzminger, C., Ding, Y. and Zhang, Q. Visualization and Interpretation of Mel-Frequency Cepstral Coefficients for UAV Drone Audio Data. 13th International Conference on Data Science, Technology and Applications., Dijon, France, 9 July 2024. P. 528-534
- Hosseinzadeh M, Haider A, Malik MH, Adeli M, Mzoughi O, Gemeay E, et al. Enhanced heart sound classification using Mel frequency cepstral coefficients and comparative analysis of single vs. ensemble classifier strategies. PLoS ONE. 2024. Vol.19, Iss.12. P. 1–17.

HARDWARE ASIST VERIFICATION

Ihor Bondarenko, Volodimir Karnaushenko, Ihor Shcherban
Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
e-mail: vladimir.karnaushenko@nure.ua

Abstract. The rapid development of semiconductor technology is driven by four complex elements: software, hardware, interface, and architecture. As modern chips integrate billions of transistors, support heterogeneous computing, and perform increasingly software-defined workloads, ensuring their functionality has never been more challenging. Modern systems use complex software stacks, requiring early software validation along with hardware verification. HAV platforms allow for pre-silicon software creation through FPGA-based emulation and prototyping.

Keywords: AI, high-performance computing, SoC, RTL, FPGA.

Introduction. The semiconductor industry is experiencing an unprecedented shift toward artificial intelligence, driven by the ever-increasing demand for computing power, autonomous systems, and next-generation architectures. As a result, the complexity of silicon components and the software content in systems and products continue to grow exponentially.

Manufacturers and their suppliers are redesigning system-level components using new electrical/electronic (EE) architectures that help create new quality. This trend is spreading to other markets such as industrial automation, high-performance computing (HPC) data centres, and aerospace, where software-defined systems are delivering massive computing power both at the edge (smartphones, cars, and cameras) and in the core data centre.

Compounding complexities – spanning software, hardware, interfaces, and workload-optimized architectures – are creating tremendous challenges for those developing today’s most advanced chip, system on chip (SoC), and multi-die designs. Verification and software development processes, in particular, can require quadrillions of test and validation cycles across simulation, emulation, and prototyping stages. As a result, there has been a distinct need for faster HAV solutions that accelerate the development and validation of advanced chip designs and help ensure optimized functionality of the software-defined systems they enable.

As artificial intelligence now impacts nearly every aspect of modern technology, chip designers face new challenges to ensure their products meet performance expectations and operate reliably and efficiently under increasing computational demands. These changes are pushing the boundaries of traditional design and verification methodologies, creating a need for innovative solutions for today's integrated circuit architectures and industrial systems.

To understand the complexity of modern integrated circuit design, it is important to consider each step of the process, starting with the fundamental

using a hybrid approach using both on-premises and cloud resources. The key to effective verification is to seamlessly transition between different use cases, from rapid early-stage RTL debugging to high-throughput validation of software workloads. HAV platforms that are configurable and can effectively handle this spectrum are essential for validating the real-world complexities of chip and system design that require real-world workloads.

HAV Hardware Justification

Designing AI accelerator chips is incredibly complex. Modern chips contain billions of transistors and multiple processors (CPUs, NPUs, GPUs, etc.) that work in parallel. Verifying this complexity with traditional simulation is challenging, not only for functional correctness, but also to ensure power efficiency and performance targets under real-world workloads.

New AI accelerators typically use workload-specific optimizations (e.g., high-precision arithmetic, new data streams), which require extensive architectural validation. The sheer scale of the operations (often quadrillions of cycles for a full validation) makes software simulation alone impractical.

Software stacks (drivers, AI frameworks) are complex, so hardware validation must now include early software preparation and collaborative validation. Finally, high-speed memory and I/O interfaces (HBM, PCIe, etc.) add another layer of complexity and must be tested at real-world speeds to avoid bottlenecks. In short, AI accelerators go beyond traditional methods in terms of scale, speed, and scalability.

Implementing HAV systems provides several tangible benefits for advanced chips in general and AI accelerator projects in particular:

- **Faster verification cycles:** Hardware emulation and prototyping can speed up verification throughput by orders of magnitude. Tests that take days or weeks in traditional software simulation can be completed on an FPGA-based emulator in a matter of hours.

- **Early software preparation and validation:** Software teams need to develop and test firmware, drivers, and AI models long before silicon becomes available. With HAV, developers can boot an operating system on an emulated accelerator or use an FPGA prototype to run real-world AI workloads against the design. This early, joint verification of software and hardware means that by the time the silicon arrives, the hardware and software are verified together, reducing integration issues. Parallel development of software and silicon can significantly accelerate time to market and build design confidence.

- **Higher level of verification and accuracy:** HAV allows for a much higher number of cycles and more complex scenarios to be run than traditional simulation. Engineers can test more corner cases, longer sequences, and full application workloads to uncover bugs that short simulations might miss. The result is a more thoroughly verified design with fewer hidden bugs, which directly reduces the risk of catastrophic silicon failures. In addition, emulators

have RTL-level cycle accuracy, so the behavior closely matches the actual silicon, increasing the accuracy of verification results.

- Performance bottleneck detection: The actual throughput of an AI accelerator can only be estimated by running near-real-time workloads on prototypes. This feedback can lead to design adjustments (such as adjusting buffer sizes or scheduling algorithms) before going to film. Power consumption can also be monitored so the team can ensure that the chip meets energy efficiency goals.

- Reduced risk of silicon reflow: Risk reduction is perhaps the most important benefit of HAV. Hardware-based solutions significantly reduce the likelihood of a critical silicon defect by identifying functional errors, integration issues, or performance issues during pre-silicon validation.

- Reduced time to market: These factors—faster validation, concurrent software development, and avoidance of rework—combine to shorten the overall development cycle. A well-validated chip can confidently go into production, and the software can be ready to deploy on real hardware when the chip returns from the factory, giving companies a competitive advantage in the rapidly evolving AI market.

The HAPS series of test systems developed by Synopsys are primarily used for FPGA-based prototyping.

Summary

HAV has become indispensable for AI accelerator development teams. It solves the critical challenges of validating incredibly complex, high-performance chips in realistic environments. By using solutions like the Synopsys HAV portfolio, teams can achieve greater confidence in their designs, meet high performance/power targets, and avoid costly errors—all while accelerating the overall development cycle.

References

1. Transforming IC design with agent-based artificial intelligence / Volodimir Karnaushenko, Ihor Shcherban, Ihor Bondarenko, Oksana Babychenko / VII Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС». MC&FPGA-2025. 27 червня 2025 року, м. Харків, Україна.

2. Combining ASIC and SoC / Volodimir Karnaushenko, Hennadii Bendeberia, Ihor Bondarenko, Oksana Babychenko / VI Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС». MC&FPGA-2024. 27-28 червня 2024 року, м. Харків, Україна

3. <https://www.synopsys.com/>

4. FPGA Nano Structures for Vehicle Electronics./ Volodimir Karnaushenko/ XII International Scientific Conference “Functional Basis of Nanoelectronics”. September 9 - 13, 2021, Odesa, Ukraine

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TWINS

Ihor Bondarenko, Volodimir Karناushenko, Olexiy Pashchenko

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

e-mail: olexiy.pashchenko@nure.ua

Abstract. Robots and AI-based software can be expensive, delaying adoption in some industries. In addition, AI tools are not always ready for mission-critical applications because there are not enough data sets to train them. One of the important factors in the development of cyber-physical systems is the use of digital twin technology. As embedded vision systems, sensors, and AI pipelines become increasingly complex, digital twins will continue to be the testing ground where the robotic accounting of the future are created today.

Keywords: digital twins, artificial intelligence, robotics, data.

Introduction. Digital twins are quickly becoming a key tool in developing and implementing artificial intelligence in robotics. While previously limited to aerospace or high-budget automotive projects with significant use of simulation, they are represented by highly accurate, real-time virtual models that can significantly simplify the implementation of sensory systems.

Digital twins provide a fast, secure, and scalable tool for training and optimizing AI models for developers of embedded machine vision systems, sensors, and AI applications. Worldwide, this convergence of the physical and virtual worlds enables machines to see, think, and act more accurately.

Traditional approaches to implementing AI systems have always been too expensive, slow, and limited by production constraints. The challenges are not only hardware-related, but also real-world conditions. In addition, extreme scenarios are often challenging to capture or replicate in the real world.

Digital twins are changing the status quo. By simulating a manufacturing process or system on a computer, engineers can subject a model to thousands of tests for different environmental conditions, manufacturing processes, materials, technologies, or natural anomalies. These tools speed up model training and enable more intelligent decision-making by allowing engineers to test scenarios that would be difficult, expensive, or impossible to perform in the real world.

Moreover, because the data are collected in a known, controlled environment, the results are guaranteed to be accurate. These data significantly reduce the need for human correction, an expensive and time-consuming aspect of supervised machine learning.

Implementing AI based on digital twins

Some leading vehicle manufacturers are partnering with electronics industry leaders to integrate digital twin technology with AI-based robotics, particularly in smart manufacturing and logistics.

These digital twins simulate robotic manipulators and autonomous transportation systems, and train AI-based vision models to process assembly

data, recognize parts, and recognize obstacles in the workspace. Training embedded vision systems in the simulation cycle will increase the production efficiency and reduce integration errors in real-world conditions.

Manufacturing uses 3D scanning of factory floors to create digital twins automatically. This map includes complete semantic object segmentation and composition geometry, which are critical for training AI vision models that must interact with congested, complex industrial spaces (Fig).

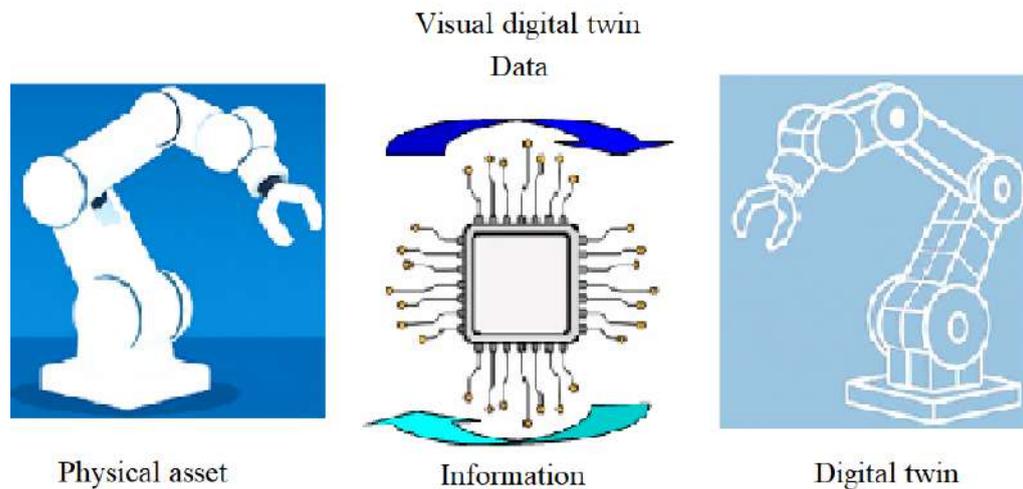


Fig. Generalized framework for implementing AI based on digital twins

Synthetic data as the basis of AI

Synthetic data were recently seen as a workaround for the lack of real-world data sets. But today, it is becoming the basis for developing AI systems for vision analysis in digital twin applications. The special feature of synthetic data is the ability to scale and evolve. It allows for dynamic randomization of domains, allowing models to learn the visual features of the system under a wider distribution of conditions.

Synthetic data generated by AI based on samples. It takes a real dataset as input and is used to train a generative AI model. The model learns the original data's structure, patterns, and statistical properties, and then generates entirely new data points that reflect those properties. The result is synthetic data that closely mirror the original dataset regarding utility and behavior but contains no personal information.

Real data, in contrast, are created without reference to real data. They rely on predefined rules, randomness, or patterns. Because they lack real-world context and complexity, mock data often fail to capture the statistical nuances needed for complex use cases such as model training or analytics.

A recent development uses AI-generated mock data, which is made possible due to large language models. This approach does not rely on a sampled dataset, but instead uses query-based generation to produce data that conforms to structural or semantic patterns. While it can be more flexible and realistic than

rule-based dummy data, it still lacks the statistical underpinnings that sample-based synthetic data provides.

There is also an important distinction between structured and unstructured synthetic data. Unstructured synthetic data includes images, audio, or video, which are common in fields such as computer vision or speech recognition. Structured synthetic data, on the other hand, refers to tabular data with defined relationships between values, such as financial transactions, medical records, or time-series behavioral data. This data type is widely used in enterprise systems and is particularly valuable for developing artificial intelligence and analytics.

Developers can simulate changes in the time of day, sensor condition, component form factor, or camera positioning, all without having to touch the equipment. Moreover, failure modes can be intentionally induced, training AI systems to respond to unlikely but critical edge cases. Conducting such tests on a physical object directly on the production line is very difficult, if not impossible.

Embedded vision in manufacturing

Integrating embedded machine vision systems into a digital twin simulation environment offers significant advantages from an engineering perspective. Using virtual cameras and simulated image streams, developers can prototype AI algorithms directly on virtual versions of embedded hardware, such as FPGAs, ASICs, PLDs, or MCUs.

When these embedded systems are combined with continuously operating actuators, such as levers or coordinate systems, that provide high precision and repeatability, the resulting synthetic data becomes even more valuable. The precise mechanical behavior ensures that the AI vision model can learn from consistent motion similar to real-world motion, which is crucial for object detection, sorting, or micro-assembly tasks.

It opens the way to in-loop hardware simulation in conjunction with AI vision, where engineers can evaluate the performance of their system under real-time constraints. An engineer can simulate latency, frame rate limitations, and sensor noise without the physical object.

The promise of digital twins is not just convenience, but also productivity. AI systems trained in these environments are more reliable, adaptable, and ultimately more valuable to the industries implementing them.

Digital twins allow robots to adapt to unfamiliar environments by learning in virtual environments, replicating their physical counterparts. These simulations allow engineers to test the limits and optimize collaborative tasks in real time. AI can learn collectively across industries by integrating digital twins with IoT sensor data and feedback on system performance.

Sensor integration for reliable defect detection

Quality control is an important but often inefficient part of the manufacturing process. Machine vision can help by automating some or all of the defect detection operations, but it cannot provide improvements on its own.

Engineers must understand and improve the machine vision inspection process for the technology to deliver the desired results. Like artificial intelligence technologies, machine vision is just a tool. How well it works depends on how well the end users can use it. With that in mind, there are several critical steps to integrating machine vision systems into defect detection.

The first step in the machine vision inspection process is determining what qualifies as a defect. AI is not as flexible or capable of nuanced thinking as humans, so it needs specific guidance. Effective defect detection depends on understanding what acceptable products look like and what does not.

Next, it is necessary to determine the technology that meets the specific task of detecting defects or discrepancies.

One of the important factors that complicates the application of machine vision in digital twin technologies is lighting. All visual studies depend on light, so it is necessary to provide the right environment to increase the contrast of the object of identification and minimize the contrast of other elements.

The next step in the machine vision validation process is to build and train a machine learning model. The data fed into the system is the most important factor in this step. The key here is to have enough informative defect examples and acceptable data. All data should be in the same format as the machine vision system to analyze it in practice.

Implementing results into production

Therefore, machine vision, embedded vision systems, sensors, and AI pipelines can significantly improve the speed and accuracy of defect detection, provided that they are properly implemented. This is crucial to maximize the impact of this technology.

References

1. Виклики п'ятої індустріальної революції / Пятайкіна М.І., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Васильєв Ю.С. // Збірник матеріалів V форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка.» АERT-2023. – Харків, ХНУРЕ, 2023
2. Сучасна компонентна база електронних систем: навч. посібник для студентів ЗВО. / І.М. Бондаренко, О.В. Бородин, В.П. Карнаушенко. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 268 с. ISBN 978-966-659-288-3
3. <https://www.prevu3d.com/news/understanding-digital-twins/>
4. Пятайкіна М. Карнаушенко В., Васильєв Ю., Горбенко Є. Перехід до промисловості 4.0 з прогнозованими рішеннями для обслуговування// IV CISP Conference “Scientific researches and methods of their carrying out: World experience and domestic realities”. – 2022. №20 – pp.97-101
5. Пятайкіна М. Карнаушенко В., Васильєв Ю., Горбенко Є. Інформаційні технології в транспортних додатках // Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» – АERT-2022.

PROJECT MANAGEMENT AS A STRATEGIC INSTRUMENT FOR ORGANIZATIONAL PERFORMANCE AND INNOVATION

Assoc. Prof. Dr. Daryan Boykov
International Business School - Sofia, Bulgaria
dboykov@ibsedu.bg

Abstract: Project management has evolved from a tactical operational function into a strategic instrument that drives organizational performance, innovation capacity and long-term competitiveness. In contemporary business environments, characterized by digital transformation, rapid change and increasing complexity, project-based work has become a dominant form of organizational activity. This paper examines the strategic role of project management in enhancing organizational effectiveness, reviewing major methodologies (PMBOK, PRINCE2, Agile, Hybrid), leadership competencies, risk management frameworks and innovation-driven project practices. A conceptual model is proposed to explain how project maturity, governance structures and portfolio alignment contribute to organizational performance. The study integrates insights from global standards and empirical research to provide practical recommendations for improving project success and strategic outcomes.

Keywords: project management, organizational performance, innovation, strategic alignment.

Introduction. In modern organizations, project management has transitioned from a supporting operational tool into a central strategic capability. According to the Project Management Institute (PMI, 2021), more than 50% of global organizational activity is now executed in project form. Projects serve as vehicles for implementing innovation, achieving strategic goals, improving processes, developing products and responding to external changes. Effective project management ensures that resources are used efficiently, risks are minimized, and goals are achieved on time and within budget. Organizations with high project management maturity demonstrate higher profitability, improved customer satisfaction and stronger innovation capacity (Kerzner, 2019).

The purpose of this paper is to analyze the role of project management as a strategic instrument for enhancing organizational performance and innovation across various sectors. The study explores methodological frameworks, leadership competencies, governance mechanisms and evidence-based models that link project practices with strategic outcomes.

The Strategic Importance of Project Management

1. Project management as a driver of organizational performance

Research shows that organizations with strong project practices outperform competitors in productivity and financial results (PMI, 2021). Project

management contributes to:

- strategic alignment of resources;
- improved decision-making;
- faster response to market changes;
- reduced operational inefficiencies;
- enhanced cross-department communication.

2. Project management and innovation

Innovation is often implemented through structured project initiatives. Tidd & Bessant (2020) emphasize that systematic project processes accelerate the development of new products and services, support experimentation and reduce innovation risks.

Review of Major Project Management Methodologies

1. PMBOK (Project Management Body of Knowledge)

The PMBOK framework defines five process groups and ten knowledge areas that standardize planning, execution, monitoring, risk management and stakeholder engagement (PMI, 2021). It is widely applied for large, complex or regulated projects.

2. PRINCE2

PRINCE2 emphasizes governance, clearly defined roles, documentation, stage controls and business justification (Axelos, 2020). It strengthens accountability and transparency, especially in public and corporate environments.

3. Agile methodologies

Agile methodologies focus on adaptability, iterative development, customer collaboration and rapid delivery (Highsmith, 2009). Agile is ideal for dynamic environments such as IT, creative industries and digital transformation projects.

4. Hybrid approaches

Modern organizations frequently combine PMBOK, PRINCE2 and Agile practices to increase flexibility while maintaining governance (Kerzner, 2019). This hybridization enhances both innovation and control.

Project Leadership and Team Competencies

1. Leadership styles

Successful project leaders demonstrate emotional intelligence, adaptability and stakeholder awareness (Goleman, 1995). Transformational leadership correlates with higher team motivation and innovation.

2. Communication management

Effective communication is critical for preventing misunderstandings, aligning expectations and resolving conflicts (Watzlawick et al., 2011).

3. Competency frameworks

PMI's Talent Triangle identifies three essential dimensions:

- technical project skills
- leadership competencies
- strategic and business acumen

Organizations with strong competency development show higher project success rates.

Risk and Governance in Project Management

1. Risk management

ISO 31000 and PMBOK frameworks highlight systematic risk identification, analysis and mitigation (Hillson, 2017). Proactive risk management reduces project failures by up to 30%.

2. Governance structures

Project governance integrates accountability, decision-making authority, reporting structures and strategic alignment mechanisms (Too & Weaver, 2014). Well-designed governance enhances transparency and reduces project overruns.

3. Portfolio and program management

Portfolio management ensures that projects support organizational priorities (PMI, 2017). Strategic alignment increases resource efficiency and innovation capacity.

Proposed Model: Project Management as a Strategic Instrument

The model developed in this study consists of four integrated dimensions:

1. Strategic Alignment

Projects are selected based on organizational goals, competitive strategy and value creation.

2. Governance and Standardization

Implementation of standardized frameworks (PMBOK, PRINCE2, Agile-Hybrid) ensures quality and control.

3. Leadership and Team Competencies

Effective leadership, communication and emotional intelligence facilitate collaboration and motivation.

4. Learning, Innovation and Continuous Improvement

Organizational learning systems (lessons learned, retrospectives, knowledge management) support continuous improvement and innovation.

This four-pillar model demonstrates how project management increases organizational resilience, adaptability and long-term performance.

Conclusions.

Project management is no longer merely an operational discipline. It has become a strategic instrument that shapes organizational performance, innovation development and competitive positioning. By integrating standardized methodologies, strong leadership, effective communication, proactive risk management and portfolio governance, organizations increase project success rates and accelerate strategic outcomes.

The proposed model emphasizes the importance of alignment between project practices and organizational strategy. Future research may examine how digital tools (AI, cloud technologies, analytics) enhance strategic project management capabilities.

References

1. Axelos. (2020). *Managing Successful Projects with PRINCE2*. TSO Publishing.
2. Goleman, D. (1995). *Emotional Intelligence*. Bantam.
3. Highsmith, J. (2009). *Agile Project Management*. Addison-Wesley.
4. Hillson, D. (2017). *The Risk Management Handbook*. Kogan Page.
5. Kerzner, H. (2019). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (12th ed.). Wiley.
6. PMI. (2017). *The Standard for Portfolio Management*. Project Management Institute.
7. PMI. (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)* (7th ed.).
8. Tidd, J., & Bessant, J. (2020). *Managing Innovation* (7th ed.). Wiley.
9. Too, E., & Weaver, P. (2014). The management of project management: A conceptual framework. *International Journal of Project Management*, 32(8), 1382–1394.
10. Watzlawick, P., Beavin, J., & Jackson, D. (2011). *Pragmatics of Human Communication*. Norton.

AI-ENHANCED COMMUNICATION MANAGEMENT IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Assoc. Prof. Dr. Marieta Goceva
New Bulgarian University, Sofia, Bulgaria
e-mail: marietagoceva@gmail.com

Abstract: Effective communication is essential for coordinating teaching, assessment, student support and administrative processes in modern education. The rapid expansion of digital learning environments has increased the complexity of communication flows, often leading to information overload and inconsistent feedback. This paper proposes a model for AI-enhanced communication management, drawing on current research and practical developments. Artificial intelligence tools—such as chatbots, learning analytics, predictive systems and automated feedback mechanisms—offer new opportunities for improving engagement, personalisation and learning efficiency. The paper analyses the pedagogical, managerial and ethical dimensions of AI implementation, highlighting transparency, data protection and the irreplaceable role of the teacher. The proposed framework supports more coherent communication strategies in general, vocational and higher education institutions.

Keywords: artificial intelligence, communication management, digital education.

Introduction

Communication management plays a central role in structuring how educational organisations function. It defines how information is exchanged among teachers, students, administrators and external partners, influencing engagement, clarity of expectations and learning outcomes. Traditional education often relies on fragmented communication flows, which reduces timely feedback and limits personalised support (Sun & Chen, 2016).

Digital transformation has expanded communication channels, increasing both opportunities and challenges. Learning management systems, electronic diaries, institutional e-mails and messaging applications have multiplied the volume of interactions and created a need for strategic coordination. Without effective management, these systems may overwhelm learners and educators.

Artificial intelligence (AI) provides new mechanisms for structuring, analysing and optimising communication. Research indicates that AI-enhanced analytics, intelligent tutoring systems, and chatbots can support decision-making, identify student needs early and automate routine communication tasks (Holmes et al., 2019; Zawacki-Richter et al., 2019). AI does not replace the teacher's role; instead, it strengthens the communication ecosystem by providing data-driven insights (Luckin et al., 2016). The purpose of this paper is to

propose and justify an AI-enhanced communication management model applicable to secondary schools, vocational education and universities.

Theoretical foundations of communication management in education

Communication management in education refers to the organised and purposeful planning, execution and monitoring of communication activities that support instruction, learning and governance. It includes three major domains:

- Pedagogical communication: interaction related to teaching, tasks, feedback, assessment and motivation.
- Administrative communication: information about schedules, regulations, attendance, grades and organisational processes.
- External communication: interactions with parents, employers, local authorities and partner institutions.

Effective institutions ensure structured communication channels aligned with strategic educational goals (Bush, 2020). However, digitalisation has intensified communication demands and highlighted the need for intelligent systems capable of filtering and prioritising information.

AI tools provide opportunities for tackling this complexity. For example, early-warning analytics tools enable timely identification of struggling learners, supporting proactive communication (Siemens & Long, 2011). Similarly, natural language processing (NLP) techniques facilitate automated summarisation, interpretation, and feedback generation (Shute, 2008).

AI tools supporting communication management

AI in education encompasses conversational agents, analytics dashboards, intelligent tutoring systems, recommendation engines and automated feedback mechanisms (Luckin et al., 2016). The following categories are central to communication management:

1. Conversational chatbots

AI chatbots deliver immediate responses to student questions regarding deadlines, assignments, school rules and administrative processes. Studies demonstrate that chatbots reduce teacher workload and improve response time and student satisfaction (Winkler & Söllner, 2018).

2. Automated feedback systems

AI-supported feedback on quizzes, programming tasks or writing assignments offers instant guidance and scaffolding. Formative feedback is a critical factor in learning efficiency and student persistence (Shute, 2008).

3. Learning analytics and predictive systems

AI-driven dashboards analyse learning behaviour, attendance, participation and performance patterns. Predictive analytics help detect at-risk students and prompt timely communication interventions (Siemens & Long, 2011).

4. Adaptive communication and personalisation

AI can tailor messages, recommendations and notifications to individual learners

based on preferences, prior behaviour and performance data (Kovanović et al., 2016).

A model for AI-enhanced communication management

The proposed model integrates pedagogical principles, technological infrastructure and management processes through four stages:

1. Planning

Educators define goals, target groups and appropriate channels. AI supports planning by analysing historical engagement data to recommend communication patterns (Holmes & Tuomi, 2022).

2. Implementation

Communication is executed through LMS, e-diaries, chatbots and automated notification systems. The teacher retains final authority over pedagogical messages.

3. Monitoring

Learning analytics tools monitor interactions and visualise patterns such as response time, unread messages, participation frequency and correlations with learning performance (OECD, 2021).

4. Improvement

AI-generated insights inform adjustments in communication style, timing, content and frequency. This continuous improvement loop enhances engagement and learning outcomes.

Ethical and pedagogical considerations

The use of AI raises ethical challenges related to transparency, privacy, autonomy and fairness. AI systems must uphold data protection standards and avoid algorithmic biases that could disadvantage certain student groups (Williamson & Eynon, 2020).

AI should support—not replace—the relational and motivational functions of teachers. UNESCO (2023) emphasises the need for teacher digital competence and ethical awareness when deploying AI tools.

Professional development is essential to ensure that educators can interpret analytics appropriately and integrate AI tools in pedagogically sound ways.

Conclusions

AI-enhanced communication management offers transformative opportunities to support teaching, learning and administration. By using AI-powered chatbots, analytics, predictive systems and automated feedback tools, institutions can optimise communication flows, improve student engagement and support evidence-based educational decisions.

The proposed model provides a structured approach to planning, implementing and refining communication strategies. While AI strengthens the efficiency and personalisation of communication, teachers remain central to guiding and moderating the educational process.

Future research should examine the impact of specific AI tools on communication outcomes across different school contexts and compare pre- and post-implementation results.

References

1. Bush, T. (2020). *Theories of Educational Leadership and Management* (5th ed.). Sage.
2. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Center for Curriculum Redesign.
3. Holmes, W., & Tuomi, I. (2022). AI in education: Drivers, trends, and policy implications. *European Journal of Education*, 57(4), 623–640.
4. Kovanović, V., Joksimović, S., Gašević, D., Siemens, G., & Hatala, M. (2016). What public media reveals about MOOCs. *British Journal of Educational Technology*, 47(3), 580–597.
5. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education*. Pearson.
6. OECD. (2021). *Digital Education Outlook 2021: Pushing the Boundaries with AI*. OECD Publishing.
7. Shute, V. J. (2008). Focus on formative feedback. *Review of Educational Research*, 78(1), 153–189.
8. Siemens, G., & Long, P. (2011). Penetrating the fog: Analytics in learning and education. *EDUCAUSE Review*, 46(5), 30–40.
9. UNESCO. (2023). *AI Competency Framework for Teachers*. UNESCO Publishing.
10. Winkler, R., & Söllner, M. (2018). Unleashing the potential of chatbots in education. *Academy of Management Annual Meeting Proceedings*.

CLOUD TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR OPTIMIZING BUSINESS PROCESSES

PhD student Moni Mihaylov

University of Library Science and Information Technology - Sofia, Bulgaria

mihaylov2000@abv.bg

Abstract: Cloud technologies have become a strategic driver for optimizing business processes in organizations of various sizes and sectors. By enabling scalable infrastructure, real-time data access, automation and cost efficiency, cloud platforms transform the way companies manage operations, communication, decision-making and digital services. This paper examines how cloud computing enhances business process optimization through agility, automation, integration, and data-driven management. The study reviews current research and presents a structural model demonstrating how Infrastructure-as-a-Service (IaaS), Platform-as-a-Service (PaaS) and Software-as-a-Service (SaaS) support process redesign, workflow automation and operational efficiency. The paper also reviews security, governance and strategic challenges associated with cloud adoption. The proposed approach highlights best practices for digital transformation in private firms, public institutions and educational organizations.

Keywords: cloud computing, business process optimization, digital transformation, automation.

Introduction

Digital transformation has radically reshaped the way organizations design, manage and optimize their business processes. One of the most influential technologies in this transformation is cloud computing, defined as on-demand network access to shared computing resources, provisioned rapidly with minimal management effort (Mell & Grance, 2011). Cloud services support agility, scalability and cost efficiency, enabling organizations to innovate rapidly and operate flexibly in dynamic environments (Marinescu, 2022).

Business process optimization aims to improve operational efficiency, reduce costs, shorten cycle times and enhance service quality (Dumas et al., 2018). Traditionally, organizations used on-premises infrastructure, which limited their ability to experiment, scale and update processes quickly. Cloud technologies address these limitations by offering dynamic provisioning, centralized data management, integrated platforms and automation capabilities.

This paper explores how cloud technologies serve as an enabling infrastructure for optimizing business processes across industries, including education, manufacturing, public services and SMEs. It proposes a conceptual model of cloud-driven process optimization and discusses the benefits, challenges and strategic implications of cloud adoption.

Cloud Technologies and Business Process Optimization: Conceptual Background

Business process optimization involves rethinking workflows, eliminating inefficiencies and leveraging technologies to support improved performance. Cloud systems provide a foundation for such optimization by:

- enabling centralized and real-time access to information,
- automating routine processes,
- integrating disparate systems,
- reducing infrastructure costs,
- supporting scalability and rapid deployment (Armbrust et al., 2010).

Cloud computing offers three main service models:

1. Infrastructure-as-a-Service (IaaS)

Virtualized computing resources such as storage, servers and networks.

Organisations can deploy scalable infrastructure without investing in physical hardware (Marinescu, 2022).

2. Platform-as-a-Service (PaaS)

A platform for developing, testing and deploying applications.

Supports automation of development processes, CI/CD pipelines and microservices architecture.

3. Software-as-a-Service (SaaS)

Cloud-hosted applications accessible through a browser.

Supports communication, document management, CRM, ERP and collaborative workflows.

These layers enable organizations to shift from capital expenditure (CAPEX) to operational expenditure (OPEX), simplifying IT processes and enabling focus on core business activities.

Mechanisms through Which Cloud Technologies Optimize Business Processes

1. Automation and reduction of manual tasks

Cloud systems automate repetitive administrative and operational tasks.

Workflow automation tools such as Microsoft Power Automate or Google Cloud Workflows reduce errors and accelerate cycle times.

2. Integration and interoperability

Cloud platforms integrate heterogeneous systems — CRM, ERP, HRM, analytics — into unified workflows.

This enhances transparency, improves communication and supports more informed decision-making.

3. Real-time analytics and data-driven decision-making

Cloud-based analytics services (e.g., AWS Analytics, Azure Synapse, Google BigQuery) provide real-time insights into performance, customer behaviour and operational bottlenecks (Hashem et al., 2015).

4. Scalability and flexibility

Cloud environments scale automatically in response to workload demands, ensuring business continuity and reducing downtime.

5. Cost optimization

Organizations reduce costs associated with hardware, maintenance, software licensing and IT support (Armbrust et al., 2010).

Pay-as-you-go pricing models eliminate unused capacity.

Proposed Model for Cloud-Driven Business Process Optimization

1. Process Assessment

Organizations evaluate existing business processes, identify inefficiencies and set optimization objectives.

2. Cloud Enablement

Selecting appropriate IaaS, PaaS and SaaS tools.

This includes application migration, data migration and integration planning.

3. Workflow Redesign and Automation

Redesigning processes around cloud capabilities: automated approvals, smart notifications, dynamic dashboards, microservices architectures.

4. Monitoring, Governance and Continual Improvement

Cloud-based monitoring tools provide performance indicators, security alerts and usage analytics.

Continuous evaluation ensures that processes remain aligned with strategic goals.

The model applies to all sectors, including schools and universities, which benefit from cloud-based student information systems, LMS platforms, collaborative tools and administrative automation.

Challenges and Risk Factors in Cloud-Based Optimization

1. Security and privacy concerns

Data protection, identity management and compliance with standards like GDPR.

2. Vendor lock-in

Dependence on a single cloud provider may limit long-term flexibility (Marinescu, 2022).

3. Integration complexity

Migrating legacy systems requires planning, technical expertise and gradual transition.

4. Skills gap

Organizations need personnel trained in cloud architecture, cybersecurity and DevOps.

5. Governance and cost control

Without clear governance policies, organizations may face unexpected costs.

Successful cloud-driven optimization requires strategic planning, risk mitigation

and continuous staff development.

Conclusions

Cloud technologies provide an essential foundation for optimizing business processes by enabling automation, reducing costs, enhancing communication and providing scalable infrastructure. Through IaaS, PaaS and SaaS services, organizations redesign workflows, improve data accessibility and increase efficiency. The proposed model highlights key stages of cloud-driven process optimization and demonstrates how cloud adoption supports long-term digital transformation. Future research may explore sector-specific cloud models and evaluate the measurable impact of cloud maturity on business performance.

References

1. Armbrust, M., et al. (2010). A View of Cloud Computing. *Communications of the ACM*, 53(4), 50–58.
2. Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2018). *Fundamentals of Business Process Management* (2nd ed.). Springer.
3. Hashem, I. A. T., et al. (2015). The rise of “big data” on cloud computing. *Information Systems*, 47, 98–115.
4. Marinescu, D. (2022). *Cloud Computing: Theory and Practice* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
5. Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing*. NIST Special Publication 800-145.
6. OECD. (2021). *Digital Education Outlook 2021: Pushing the Boundaries with AI*. OECD Publishing.
7. Zawacki-Richter, O., Marín, V., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on AI in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 1–27.

MANIPULATIVE COMMUNICATION IN PERSONAL RELATIONSHIPS: PSYCHOLOGICAL MECHANISMS, ETHICAL IMPLICATIONS AND STRATEGIES FOR RESISTANCE

Prof. Dr. Vance Boykov

University of Nis, Faculty of electronic engineering Nis, Serbia

vance.bojkov@elfak.ni.ac.rs

Abstract: Manipulative communication represents a hidden form of interpersonal influence that aims to control, distort or dominate another person's perceptions, emotions and decisions. In personal relationships, such communication can undermine trust, autonomy and emotional well-being. This paper examines the psychological foundations, communication mechanisms and ethical implications of manipulative communication in close interpersonal contexts. Drawing on research from psychology, communication theory and behavioural science, the study analyses key techniques such as gaslighting, emotional coercion, strategic ambiguity and impression management. A structural model is proposed to explain how manipulative patterns develop, escalate and affect relationship dynamics. Finally, the paper identifies evidence-based strategies for recognition, resistance and healthy boundary-setting.

Keywords: manipulation, interpersonal communication, personal relationships, emotional influence, resistance strategies.

Introduction

Interpersonal communication forms the foundation of human relationships, shaping trust, emotional bonding, conflict resolution and shared meaning (Watzlawick, Beavin & Jackson, 2011). While communication can foster intimacy and cooperation, it can also be used strategically to influence, distort and control. Manipulative communication refers to intentional attempts to affect another person's thoughts, emotions or behaviour through covert, deceptive or exploitative tactics (Cialdini, 2021).

In personal relationships, manipulation is particularly harmful because it exploits emotional closeness, attachment and vulnerability. Unlike direct persuasion, manipulative messages often operate through hidden psychological mechanisms, such as guilt induction, emotional withdrawal, distortion of reality, false framing or conditional affection.

The aim of this paper is threefold:

- 1) to identify the major psychological and communicative mechanisms of manipulation in personal relationships;
- 2) to analyse the ethical and emotional implications of such behaviour;
- 3) to propose evidence-based strategies to recognize, prevent and resist manipulative influence.

Psychological Mechanisms of Manipulative Communication

1. Gaslighting

Gaslighting is one of the most destructive forms of manipulation, defined as a systematic attempt to undermine another person's perception of reality (Abramson, 2014). Through denial, contradiction and false narratives, the manipulator induces self-doubt, confusion and dependency.

2. Emotional coercion

Emotional coercion involves guilt-tripping, threats of withdrawal, emotional blackmail or dramatization. Forward & Buck (1997) describe emotional blackmail as a cycle of demand → resistance → pressure → threat → compliance.

3. Strategic ambiguity

Manipulators often use vague, contradictory or incomplete information to maintain control and avoid accountability (Bavelas, 2005). Ambiguity creates uncertainty and makes the victim dependent on the manipulator for interpretation.

4. Impression management

Goffman's (1959) theory explains how individuals attempt to shape others' perceptions by controlling their "presentation of self." Manipulators strategically display charm, vulnerability or competence to influence judgement.

Communicative Techniques in Manipulative Relationships

1. Selective disclosure

Providing partial information to distort understanding or hide intentions is a frequent tactic (Grice, 1989).

2. Triangulation

Introducing a third person into a relationship to create jealousy, rivalry or dependency — a common tactic in toxic relational dynamics.

3. Reframing and blame-shifting

Manipulators reframe events to shift responsibility, minimize harm or portray themselves as victims (Goleman, 1995).

4. Intermittent reinforcement

Borrowed from behavioural psychology, intermittent positive reinforcement creates emotional dependency — similar to patterns described by Skinner (1974).

Ethical Implications and Relational Impact

Manipulation in personal relationships violates principles of respect, autonomy and truthfulness — central ethical norms in interpersonal communication (Bok, 1999).

Ethical consequences include:

- destruction of trust;
- emotional trauma and anxiety;

- erosion of personal autonomy;
- power asymmetry and dependency;
- long-term psychological harm.

Research shows that chronic manipulative dynamics correlate with reduced self-esteem, increased stress, emotional burnout and difficulties in forming secure attachments (Bartholomew & Horowitz, 1991).

Strategies for Recognition and Resistance

1. Awareness and identification

Recognizing patterns such as gaslighting, guilt-induction, distortion or conditional affection is the first step. Clear emotional boundaries help individuals detect manipulation earlier.

2. Assertive communication

Assertiveness allows individuals to express needs and limits without aggression. Techniques include “I-messages,” repetition, boundary-setting and metacommunication.

3. Cognitive reframing

Challenging distorted messages and replacing them with objective interpretations helps reduce emotional influence (Beck, 2011).

4. Social support

Consulting trusted individuals helps validate experiences, especially in cases of gaslighting.

5. Ethical confrontation

Addressing manipulative behaviours directly, with clarity and calmness, helps re-establish balance and reduce power asymmetry.

6. Professional intervention

In chronic or severe cases, psychological counseling is essential to rebuild autonomy and self-esteem.

Conclusions

Manipulative communication in personal relationships represents a complex interplay of psychological mechanisms, communicative tactics and ethical violations. Its covert nature makes it difficult to recognize and resist, yet its impact on emotional well-being and relational stability is profound. By understanding the mechanisms of manipulation and applying evidence-based resistance strategies, individuals can strengthen their autonomy, protect their emotional health and foster healthier relational dynamics.

Future research may examine cross-cultural variations in manipulative patterns, digital manipulation in online interpersonal communication, and preventive education for vulnerable groups.

References

1. Abramson, K. (2014). Turning up the lights on gaslighting. *Philosophical Perspectives*, 28(1), 1–30.

2. Bartholomew, K., & Horowitz, L. (1991). Attachment styles among young adults. *Journal of Personality and Social Psychology*, 61(2), 226–244.
3. Bavelas, J. (2005). *Equivocation. Theory, Research, and Application*.
4. Beck, J. (2011). *Cognitive Behavior Therapy*. Guilford Press.
5. Bok, S. (1999). *Lying: Moral Choice in Public and Private Life*. Vintage.
6. Cialdini, R. (2021). *Influence: The Psychology of Persuasion (Updated ed.)*. Harper Business.
7. Forward, S., & Buck, D. (1997). *Emotional Blackmail*. HarperCollins.
8. Goffman, E. (1959). *The Presentation of Self in Everyday Life*. Doubleday.
9. Goleman, D. (1995). *Emotional Intelligence*. Bantam.
10. Grice, H. P. (1989). *Studies in the Way of Words*. Harvard University Press.
11. Skinner, B. F. (1974). *About Behaviorism*. Knopf.
12. Watzlawick, P., Beavin, J., & Jackson, D. (2011). *Pragmatics of Human Communication*. Norton.

АДАПТИВНІ НМІ ДЛЯ ІНКЛЮЗИВНОГО ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА (INDUSTRY 4.0 ТА ПОТ)

аспірант Павленко Т.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки,
e-mail: taras.pavlenko@nure.ua

Abstract. In modern Industry 4.0 and PoT environments, ensuring effective human-machine interaction (HMI) for all operators is crucial. Traditional HMI systems often overlook the needs of users with limited mobility, excluding them from certain production tasks and remote equipment control. This paper proposes an approach to designing adaptive interfaces that tailor their layout and controls to the individual capabilities of each operator. A multi-channel interaction strategy is advocated, combining voice control, simplified touch/gesture inputs, and scenario-based automation to accommodate diverse user needs. Implementing such adaptive HMIs can significantly improve accessibility, ergonomics, and safety in industrial operations, while expanding the workforce by enabling the participation of specialists with limited mobility. The proposed solutions are promising for applications in control rooms, robotic manufacturing cells, and remote monitoring systems.

Ключові слова: Industry 4.0; ПоТ; адаптивні НМІ; інклюзивність; мультимедійна взаємодія.

Вступ. Концепції Industry 4.0 та ПоТ трансформують сучасне виробництво, посилюючи роль цифрових технологій та автоматизації, однак людиноцентричність залишається ключовим принципом нової промислової парадигми. У цих умовах особливо важливим є забезпечення ефективної та доступної людино-машинної взаємодії (НМІ) для всіх категорій операторів, включно з фахівцями, які мають порушення мобільності. Традиційні НМІ часто не враховують індивідуальні фізичні можливості користувачів, обмежуючи їх участь у виробничих процесах та знижуючи безпеку. Це формує потребу у розробці адаптивних, інклюзивних інтерфейсів, здатних підлаштовуватися під користувача та забезпечувати персоналізовану, зручну й безпечну взаємодію з інтелектуальними виробничими системами.

Основна частина. Обмеження традиційних НМІ для операторів з обмеженою мобільністю. Багато класичних НМІ-систем орієнтовані на “середньостатистичного” оператора і мають фіксовані елементи керування – кнопки, перемикачі, стандартні сенсорні екрани. Такі інтерфейси не враховують особливі потреби користувачів з інвалідністю або порушеннями рухливості, тому дрібні кнопки, високорозташовані панелі чи вимога до точних дотиків можуть стати суттєвим бар'єром. У результаті фахівці з обмеженою мобільністю обмежені у взаємодії з обладнанням, не можуть повноцінно брати участь у виробничих процесах чи дистанційно керувати машинами, що означає одночасно і соціальну проблему, і втрату

кадрового потенціалу для підприємств.

Відсутність адаптації інтерфейсів під різні можливості користувачів знижує загальну ефективність системи: оператор, який фізично не здатний швидко натискати потрібні клавіші або діставати до певних органів керування, працює повільніше й з вищим ризиком помилок. Сучасні принципи дизайну НМІ передбачають доступність для людей з інвалідністю, спрощення керування та мінімізацію необхідних фізичних зусиль [2], але більшість промислових панелей досі не відповідають цим вимогам, що спонукає до пошуку інклюзивніших та ергономічніших рішень.

Перспективним напрямом є створення адаптивних НМІ, які динамічно змінюють структуру та елементи керування відповідно до можливостей і потреб конкретного оператора. На відміну від стандартних “універсальних” панелей, адаптивний інтерфейс може в реальному часі враховувати фізичні обмеження, рівень навченості чи втому користувача [3]. Це дозволяє, зокрема, збільшувати розмір віртуальних кнопок, спрощувати навігацію меню, оптимізувати обсяг інформації на екрані або активувати підказки й автоматичні режими роботи. Завдяки такій адаптації складні машини стають зрозумілішими і керованішими для працівників з різним досвідом та можливостями: розумна НМІ-система “підлаштовується” під людину, а не змушує людину пристосовуватися до технології.

Мультиканальні методи взаємодії. Ключовим аспектом адаптивних інтерфейсів є підтримка багатоканальної взаємодії, коли користувач може обирати зручний для нього спосіб керування.

Голосове управління. Розпізнавання голосу дає змогу віддавати команди без використання рук, що особливо важливо, коли фізичне натискання кнопок ускладнене або неможливе. Сучасні голосові помічники вже виходять за межі побутового застосування і впроваджуються у промислові системи [4]. У виробничому середовищі голосовий інтерфейс дозволяє дистанційно запускати чи зупиняти обладнання, змінювати параметри без підходу до панелі, підвищуючи продуктивність і безпеку.

Спрощені сенсорні та жестові інтерфейси. Для користувачів, яким важко працювати з дрібними елементами, інтерфейс може пропонувати укрупнені кнопки, слайдери, а також керування жестами або рухами очей. Технології відстеження погляду дають змогу вибирати об’єкти на екрані без рук, просто фокусуючи погляд [5], а жести перед камерою (наприклад, помах рукою для підтвердження дії) можуть виконувати роль команд. Такі touchless-рішення розширюють можливості взаємодії для людей з порушеннями опорно-рухового апарату.

Сценарна автоматизація. Адаптивний інтерфейс може дозволяти виконання складних послідовностей дій однією командою. Замість

множинних дрібних кроків оператор запускає заздалегідь підготовлений сценарій: наприклад, голосова команда “Підготувати виробничу лінію до пуску” може ініціювати увімкнення живлення, самодіагностику систем, налаштування параметрів за шаблонами тощо. Подібно до “сцен” у розумних будинках (типу “Goodnight” [5]), у промисловості сценарна автоматизація мінімізує кількість ручних дій, що особливо важливо для фахівців з обмеженою моторикою.

Поєднання різних каналів взаємодії робить НМІ більш гнучким та інтуїтивним: голос зручний для швидких команд, жести – коли руки зайняті іншими діями, а класичне натискання кнопки – для точного налаштування. Мультиканальний підхід дозволяє компенсувати недоліки кожного окремого способу: дотик забезпечує точність, голос – доступність [6]. У результаті формується більш природна, зручна людино-машинна взаємодія, де технологія адаптується до користувача.

Переваги впровадження адаптивних НМІ. Запропонований підхід до НМІ-дизайну вирішує не лише проблему доступності, а й дає низку практичних переваг.

Доступність та інклюзивність. Інтерфейс, гнучкий до потреб користувача, знімає бар’єри для операторів з інвалідністю та обмеженою мобільністю, надаючи їм можливість самостійно й продуктивно працювати з обладнанням. Це розширює кадровий потенціал підприємств і дає змогу залучити кваліфікованих працівників незалежно від їхніх фізичних можливостей [1].

Ергономічність та зменшення навантаження. Адаптивні інтерфейси знижують фізичне й когнітивне навантаження, дозволяючи операторам покладатися на автоматизацію та голосові команди, отримувати лише релевантну інформацію й персоналізовані підказки. Дослідження показують, що “розумні” НМІ підвищують продуктивність, особливо для літніх або малодосвідчених операторів, і дають змогу керувати складними роботизованими системами більш впевнено [3].

Безпека роботи. Hands-free взаємодія дає змогу тримати руки вільними для аварійних дій, а дистанційні сценарії зменшують необхідність перебування в небезпечних зонах. Адаптивна система може враховувати типові помилки користувача, підказувати або блокувати небезпечні дії, що робить інтерфейс, спроектований за принципами universal design, не лише зручним, а й безпечним. У підсумку підприємство отримує гнучкішу й надійнішу систему управління, де кожен оператор взаємодіє з обладнанням оптимальним для себе способом.

Перспективи застосування. Адаптивні НМІ-рішення мають широкий спектр застосувань у сучасній промисловості.

У диспетчерських та контрольних центрах (енергомережі, транспорт, виробничі лінії) оператори одночасно моніторять велику кількість параметрів і реагують на інциденти. Адаптивні інтерфейси дозволяють

диспетчерам з різними можливостями рівноправно керувати системами: голосові команди можуть прискорювати виклик потрібних даних чи активацію аварійних протоколів, а спрощені візуальні інтерфейси з більшим шрифтом і контрастними індикаторами – підтримувати операторів з ослабленим зором чи координацією рухів.

У роботизованих виробничих комплексах оператор частіше виступає наглядачем та налаштовувачем автоматизованих станцій. Адаптивний НМІ дозволяє ефективно керувати роботизованими системами навіть за обмеженої мобільності: типові послідовності дій можна запускати як сценарії, а AR/VR-рішення доповнюють інтерфейс зоровими підказками та можливістю керування жестами у віртуальному просторі.

У системах віддаленого моніторингу і керування (нафтові платформи, вітрові електростанції тощо) адаптивні інтерфейси забезпечують повноцінну взаємодію без фізичної присутності на об'єкті. Завдяки мультимедійності оператор може обирати зручний спосіб роботи: прослуховувати голосові оповіщення, переглядати спрощені панелі стану з можливістю керування голосом чи одним натисканням [5]. Це робить віддалений моніторинг доступним для інженерів з інвалідністю та дозволяє компаніям краще використовувати таланти незалежно від географії й фізичних обмежень.

Висновки. Розвиток концепцій Industry 4.0 неминуче змінює роль людини у виробництві, але водночас висуває нові вимоги до людино-машинних інтерфейсів. Забезпечення доступності технологій для всіх операторів, включно з особами з обмеженою мобільністю, стає не лише соціальним завданням, а й фактором підвищення ефективності та інноваційності підприємств. Запропонований підхід – адаптивні, мультимедійні НМІ – демонструє, як можна поєднати передові IT-рішення (розпізнавання голосу, жестів, автоматизацію сценаріїв) з принципами універсального дизайну. Такі інтерфейси динамічно підлаштовуються під користувача, роблячи керування промисловими процесами інтуїтивним, ергономічним і безпечним.

Практичне впровадження адаптивних НМІ-рішень здатне розширити кадровий горизонт промислових компаній – фахівці з інвалідністю зможуть повноцінно реалізувати свій потенціал у виробництві, що зрештою сприяє формуванню більш різноманітних і стійких команд. Крім того, підвищуються показники продуктивності та знижується ризик аварій завдяки кращій взаємодії людини і машини. Отже, інвестиції у розвиток інклюзивних НМІ-технологій цілком виправдані як з соціальної, так і з економічної точки зору.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у випробуванні прототипів адаптивних інтерфейсів у реальних промислових умовах, стандартизації підходів до їх розробки, а також у розширенні використання штучного інтелекту для ще тоншого налаштування НМІ під користувача. З

огляду на тенденції Industry 5.0, що ще більше акцентує людиноцентричність та співпрацю людини і роботів, роль таких рішень лише зростатиме. Включення кожного працівника у виробничий процес незалежно від його можливостей – це шлях до справді смарт- та соціально стійкого виробництва майбутнього.

Список літературних джерел

1. Mark, B. G., Hielscher, V., & Zink, K. J. Inclusion of workers with disabilities in production 4.0: legal foundations in Europe and potentials through worker assistance systems // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, No. 21. – Article 5978. – DOI: 10.3390/su11215978.
2. Unravel. HMI design: automotive, industry 4.0 & healthcare [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unravel.cc/hmi-design> (дата звернення: 26.11.2025).
3. Villani, V., Sabbatini, L., Bonfè, M., & Fantuzzi, C. A methodology for the development of smart adaptive HMI // arXiv preprint. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.08467> (дата звернення: 26.11.2025).
4. Веño, L., Kopas, M., Pastierik, L., & Kovács, G. Transforming industrial automation: voice recognition control via containerized PLC device // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article 29387. – DOI: 10.1038/s41598-024-81172-w.
5. Wevolver – Mahmood, Y. Human machine interfaces enhance user experience through touchless technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wevolver.com/article/human-machine-interfaces-enhance-user-experience-through-touchless-technology> (дата звернення: 26.11.2025).
6. Spyrosoft. Multimodal HMI solutions: combining touch and voice with AI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spyrosoft.com/blog/hmi/multimodal-hmi-solutions> (дата звернення: 26.11.2025).

**МОДЕЛЮВАННЯ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ З
УРАХУВАННЯМ УМОВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Головатенко С.В., Стрількова Т. О.

e-mail: serhii.holovatenko@nure.ua, tetiana.strilkova@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
мікропроцесорних технологій і систем

Abstract. This research focuses on the development of software for simulating the operation of a location system under various observation conditions. The study presents methods for modeling random light objects and analyzes the main challenges associated with registering optical signals on rectangular sensor matrices. Special attention is given to the mismatch between the geometry of diffraction patterns and the structure of rectangular photodetectors. Graphical examples generated by the implemented software are provided, demonstrating the efficiency of the proposed modeling approach.

Ключові слова: оптична локація, фотоприймачі, дифракція.

Оптична локація, на сьогоднішній день, є одним з найефективніших способів спостереження повітряного простору. Даний спосіб локації дозволяє з високою точністю визначати координати повітряних об'єктів [1]. В результаті прийому вторинного або власного випромінювання повітряних об'єктів, відбувається визначення їх координат та параметрів [2, 3]. Однією з основних проблем практичної реалізації оптичних локаційних систем є їх ефективність роботи в різноманітних умовах через вплив зовнішніх факторів, таких як турбулентність атмосфери, рівень завадового фону, умови освітленості простору [4, 5].

Метою роботи є створення інформаційної моделі реєстрації оптичного випромінювання систем оптичної локації на основі хвильової теорії світла.

Аналіз особливостей систем. Фотоприймачі, що застосовуються у сучасних локаційних системах, здебільшого мають прямокутну геометрію та реалізуються у вигляді матриць світлочутливих елементів (елементів роздільної здатності). Така конфігурація обумовлена технологічними особливостями виготовлення напівпровідникових сенсорів, а також зручністю їх інтеграції у цифрові системи обробки сигналів. Прямокутна форма елементів дозволяє ефективно організувати дискретизацію просторової інформації та забезпечує високу щільність розташування пікселів у площині приймання.

Водночас, оптична природа формування зображення накладає певні обмеження. Класична дифракційна пляма, що виникає внаслідок круглої симетрії вихідної апертури, має круглу форму. Це призводить до неузгодженості між геометрією дифракційного зображення та

прямокутною структурою матриці фотоприймача. У результаті частина енергії світлового сигналу розподіляється не оптимально, що може знижувати ефективність реєстрації та погіршувати просторову роздільну здатність системи.

Для усунення зазначеної невідповідності доцільним є введення в оптичну схему спеціальних елементів – прямокутних діафрагм та транспарантів. Їх використання дозволяє трансформувати круглу вхідну апертуру у прямокутну, що забезпечує більш узгоджене співвідношення між формою дифракційної плями та геометрією фотоприймача. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності використання світлової енергії, зменшенню втрат інформації та покращенню метрологічних характеристик локаційної системи.

Крім того, застосування прямокутних апертур відкриває можливості для оптимізації алгоритмів цифрової обробки сигналів. Оскільки форма дифракційної плями стає ближчою до прямокутної, зменшується кількість артефактів при дискретизації та реконструкції зображення. Це особливо важливо в умовах спостереження з низьким відношенням сигнал/шум, коли кожна одиниця енергії має критичне значення для точності визначення координат об'єкта.

Методи моделювання. Для моделювання та аналізу роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження використана хвильова теорія світла, яка дозволяє адекватно описати процеси дифракції. Основним завданням є формування розподілу амплітуди світлового збурення у фокальній площині приймальної оптичної системи. Моделювання ґрунтується на використанні інтегральних співвідношень Френеля та Фраунгофера, які описують поширення хвильових фронтів крізь апертури різної форми. Для прямокутних діафрагм застосовується двовимірне інтегрування по площі апертури, що дозволяє отримати аналітичні вирази для амплітудного розподілу. Формування дифракційної картини у випадку круглої апертури амплітудний розподіл описується функцією Бесселя першого порядку, що формує класичну «Airy pattern». Для прямокутної апертури розподіл визначається добутком синусоїдальних функцій (sinc-функцій) уздовж двох координатних осей, що забезпечує прямокутну симетрію дифракційної плями.

Моделювання роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження повинно враховувати не лише фізичні параметри середовища та джерела випромінювання, але й геометричну узгодженість між оптичною апертурою та структурою фотоприймача. Введення прямокутних діафрагм та транспарантів є одним із ключових інженерних рішень, що дозволяє підвищити ефективність функціонування системи та забезпечити її адаптивність до широкого спектра експлуатаційних умов.

Модель ґрунтується на використанні прямокутної вхідної апертури. Розподілення амплітуди світлового збурення у фокальній площині є

дифракційною картиною Фраунгофера при дифракції на прямокутному отворі з розмірами a та b . Це розподілення також відомо та має вигляд:

$$E_{\text{фк}}(u, v) \approx E_0 \frac{\sin\left[c(u-u_0)\frac{a}{2}\right]}{c(u-u_0)\frac{a}{2}} \frac{\sin\left[d(v-v_0)\frac{b}{2}\right]}{d(v-v_0)\frac{b}{2}}, \quad (1)$$

де u, v – координати у площині фотоприймача; c, d – коефіцієнти, які відображають параметри оптичної системи.

Для оцінки ефективності реєстрації повітряних об'єктів у різноманітних умовах розроблено комп'ютерну (інформаційну) модель, яка дозволяє генерувати зображення об'єктів на заданій площині з урахуванням дифракційної картини Фраунгофера, а також створювати шуми різної інтенсивності та стохастичними характеристиками.

Для програмної реалізації використано метод Бокса – Мюллера:

$$M[i, j] = \mu + \sigma \sqrt{-2 \ln(u_1)} \cdot \cos(2\pi u_2)$$

де: $u_1, u_2 \sim u(0,1)$ – незалежні рівномірні випадкові числа; μ - середнє (центр розподілення); σ – стандартне відхилення.

Моделювання проводиться для різних сценаріїв умов спостереження: зміна розміру та форми апертури; варіація довжини хвилі випромінювання; вплив шумів та фонових перешкод; різні відстані між об'єктом та приймальною системою. Це дозволяє оцінити адаптивність системи та її здатність зберігати необхідну роздільну здатність у реальних умовах експлуатації.

Результати моделювання. Даний програмний засіб реалізує відображення результатів моделювання у вигляді 3D гістограми, у полі довільного розміру, а також 2D чорно-білого зображення, з можливістю змінювати різноманітні параметри. Яке складається з результатів накладання декількох світлових об'єктів у фокальній площині, а також випадкового шуму.

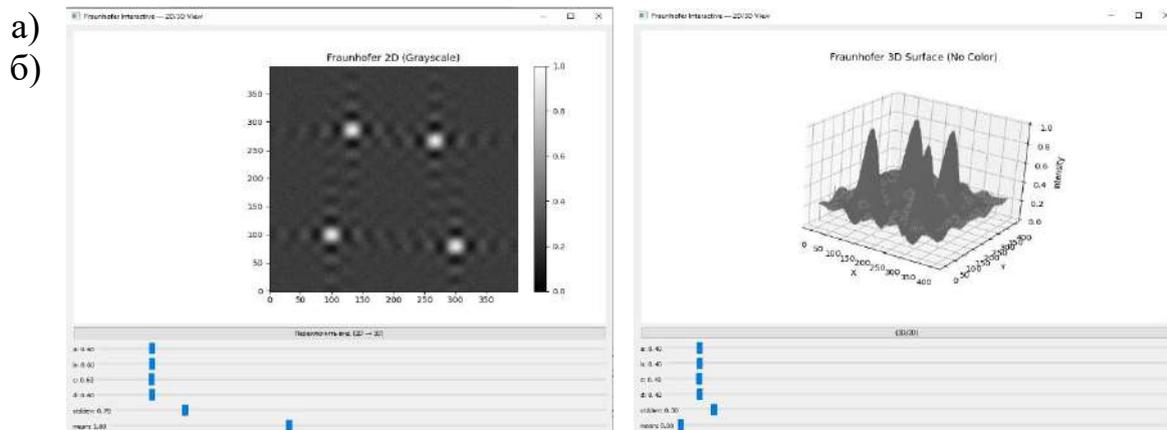


Рисунок 1 Розподілення амплітуди світлового збурення у фокальній площині, яке отримано з використанням хвильової теорії світла.

- а) вивід результатів моделювання у вигляді 2D зображення;
- б) вивід результатів у вигляді 3D гістограми.

Висновки. Таким чином, методи моделювання базуються на хвильовій теорії світла, поєднують аналітичні та числові підходи, і забезпечують можливість дослідження впливу геометрії апертури та умов спостереження на якість роботи локаційної системи. Розроблений програмний засіб забезпечує наочне відображення результатів моделювання розподілу амплітуди світлового збурення у фокальній площині. Можливість варіювання параметрів моделювання (розмір поля, кількість та конфігурація об'єктів, рівень випадкового шуму) забезпечує гнучкість дослідження та дозволяє адаптувати систему до різноманітних умов спостереження. Врахування випадкового шуму у моделюванні дозволяє наблизити результати до реальних експлуатаційних умов, що підвищує достовірність отриманих висновків та практичну цінність розробленої комп'ютерної моделі. Це забезпечує можливість моделювати сценарії роботи локаційних систем, наближених до реальних умов експлуатації, та створює основу для подальшої оптимізації. Отримані результати мають практичну значущість для розробки високоточних оптичних систем, здатних працювати в широкому спектрі умов спостереження.

Список використаних джерел

1. Стрількова Т.О., Литюга О.П., Калмиков О.С., Кожушко Я.Н., Неофітний М.В. Оптико-електронні технології супроводження рухомих об'єктів // IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS-ODS 2020” Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 5-7, 2020, pp. 25.
2. Свид І.В. Обод І.І., Головатенко С.В., Дацько С.В. Оцінка якості визначення координат повітряних об'єктів кооперативними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору. // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2023. Вип. 214. - С. 102-114. doi: 10.30837/rt.2023.3.214.09.
3. Головатенко С.В., Стрількова Т. О. Моделювання роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження / С. В. Головатенко, Т. О. Стрількова // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму, 16–19 квітня 2025 р. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Т. 1. – С. 35–37.
4. Strelkova T., Lytyuga A., Kalmykov A., Khoroshun G., Riazantsev A., Ryazantsev O. [Influence of a signal description model on the calculations of the efficiency indicators of optoelectronic systems](#) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. – 4/5 (106). – pp. 41-50.
5. Strelkova T.A., Lytyuga A.P., Kalmykov A.S. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. 2021, Pages: 134-162. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005.

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЯ ЯКОСТІ ЖИТТЯ

професор, д.т.н. Стрількова Т.О., професор, д.ф.-м.н. Грицунов О.В.,
аспірант Кавецький В.В., студент Шевченко М.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
e-mail: tetiana.strilkova@nure.ua, alexander.gritsunov@nure.ua,
viacheslav.kavetskyi@nure.ua, mykyta.shevchenko3@nure.ua .

Abstract. The report presents modern intelligent systems for health monitoring and quality of life control, based on automated data collection from sensors, IoT devices, and electronic modules within the context of Industry 4.0 and Industry 5.0 concepts. An automated cellular-biophysical method is proposed for assessing work capacity, stress load level, and health status based on the indicators of the electronegativity of buccal epithelial cell nuclei. This method provides an objective evaluation of the organism's adaptive capabilities and can be applied for monitoring the effectiveness of rehabilitation measures.

Ключові слова: контроль якості життя, реабілітаційні заходи, Industry 5.0

Вступ. Здоров'я є найважливішою біологічною характеристикою особистості, проте слід зазначити, що сутність цього поняття в сучасній медицині ще недостатньо вивчена. Не можна сказати, що проблемі здоров'я приділялося мало уваги в історії науки, однак переважно у медицині акцент робився на дослідженні хвороб, а здоров'я розглядалося як альтернатива хворобі. Водночас цим поняттям здоров'я далеко не вичерпується, і це питання заслуговує на спеціальне розгляд, особливо з огляду на його значення для військовослужбовців. Недостатня вивченість сутності поняття «здоров'я» пояснюється особливою складністю цього явища, що пов'язане з глибинною природою біологічних процесів. І якщо медицина має справу з окремими порушеннями загального стану, то розуміння загальної сутності здоров'я повинно стати фундаментом сучасної медицини.

Сучасні інтелектуальні системи моніторингу стану здоров'я та контролю якості життя базуються на автоматизованому зборі даних сенсорів, IoT-пристроїв, електронних модулів. У рамках Industry 4.0 інформаційні системи контролю якості життя інтегруються з кіберфізичними системами, великими даними та штучним інтелектом. Industry 5.0 додає акцент на людиноцентричність, сталий розвиток, якісну освіту та спрямованість на контроль якості життя та підвищення добробуту суспільства. Розробка таких систем потребує міждисциплінарної співпраці: інженери-електроніки, програмісти, медичні та соціальні дослідники. Це створює платформу для інтеграції науки (нові алгоритми), освіти (підготовка кадрів у STEM), виробництва

(впровадження сенсорних технологій та роботизованих систем).

Методи оцінки функціонального стану людини. Оцінка функціонального стану людини є комплексною процедурою, що включає фізіологічні, психофізіологічні та клітинні показники, які відображають адаптаційні можливості організму та ефективність його регуляторних систем. Використовуються різні методи та технології: електрофізіологічні, які забезпечують неінвазивний моніторинг функцій серця, мозку та м'язів; біоімпедансометрія, які визначають склад тіла та рівень енергетичного обміну; психофізіологічні – тести на увагу, швидкість реакції; клітинно-біофізичні, які відображає енергетичний потенціал і гомеостаз.

Сучасні електронні системи повинні відповідати не лише технічним вимогам, що до них висуваються, але й анатомічним, фізіологічним та психологічним вимогам, визначеним особливостями діяльності людини. Причому найвищим рівнем цієї групи вимог є психологічні вимоги, які визначають відповідність техніки психічним особливостям людини, тобто особливостям сприйняття, пам'яті, мислення тощо. Можливості людини значно розширюються завдяки використанню засобів автоматики та телемеханіки, електронно-обчислювальної техніки, обчислювально-розв'язувальних і керуючих машин. У значній мірі автоматизовано процеси управління технікою. Однак застосування засобів автоматизації та обчислювальної техніки не дозволяє повністю виключити людину з процесу управління. Це зумовлено низкою причин, серед яких однією з основних є економічна доцільність включення людини до системи «людина–машина».

Таким чином, одночасно з проблемою вдосконалення техніки постає завдання оптимального синтезу систем «людина–машина» з метою створення найбільш продуктивного комплексу, у якому взаємно компенсувалися б недоліки людини і техніки та максимально використовувалися їхні переваги. Психофізіологічні можливості людини повинні враховуватися і під час експлуатації такого класу систем «людина–машина», як сучасні електронні системи.

Метою досліджень є розробка та удосконалення автоматизованого клітинно-біофізичного методу контролю працездатності, визначення рівня стресового навантаження, стану здоров'я та ефективності реабілітаційних заходів на основі методу оцінки стану людини за показниками електровід'ємності ядер клітин букального епітелію. У сучасних умовах підвищеного психофізіологічного навантаження зростає потреба в об'єктивних методах оцінки функціонального стану людини. Одним із перспективних підходів є використання показників електровід'ємності ядер клітин букального епітелію - доступного біоматеріалу, що відображає адаптаційні можливості організму. Метод базується на визначенні електрокінетичних властивостей ядер клітин, які змінюються під впливом стресу, втоми, вікових та патологічних факторів. Зниження

електровід'ємності свідчить про зменшення енергетичного потенціалу клітин, що корелює з порушенням гомеостазу та зниженням функціональної активності.

У ході досліджень, проведених за методикою Шахбазова В.Г., Шкорбатова Ю.Г., Гончаренко М.С., Стрількова О.І., Стрільковой Т.О., встановлено достовірні зміни ЕОЯ у представників професій з високим рівнем відповідальності (оператори, диспетчери, військові), а також у студентів під час екзаменаційного навантаження [1-5]. Метод дозволяє здійснювати моніторинг функціонального стану в динаміці, оцінювати ефективність реабілітаційних заходів та прогнозувати ризики перевантаження. Метод є неінвазивним, доступним і придатним для широкого застосування в медико-біологічних, психофізіологічних та геронтологічних дослідженнях.

Препарат, що являє собою суспензію клітин буккального епітелію у фосфатному буфері, поміщається в камеру для мікроелектрофорезу. Зовнішній вигляд клітин буккального епітелію наведено на рисунку 1.

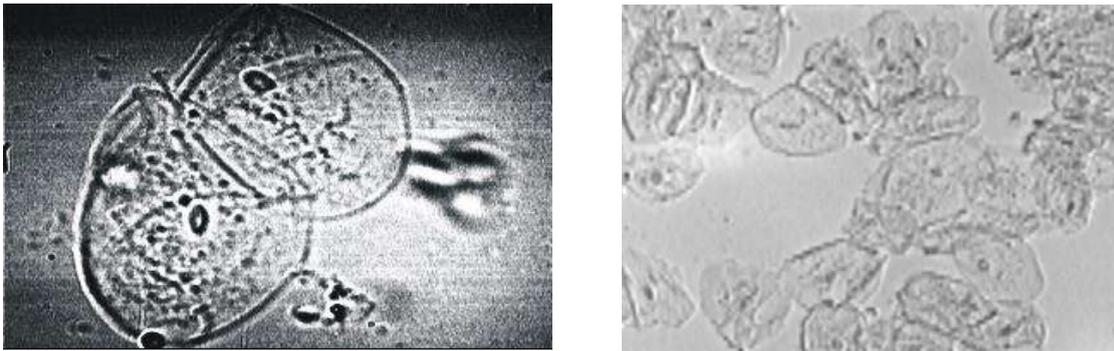


Рисунок 1 – Зображення клітин буккального епітелію в полі зору мікроскопа

В доповіді представлено розроблену автоматизовану систему контролю якості життя. Принцип роботи системи полягає у наступному: телевізійний сигнал з виходу телевізійної камери подається на вхід блока захоплення відеопотоку, який здійснює аналогово-цифрове перетворення сигналу та формування зображення. Отримане зображення надходить на вхід блока просторово-часової фільтрації, що виконує внутрішньокадрову обробку у реальному масштабі часу та видає інформацію про телевізійні координати кожного спостережуваного об'єкта. Ці дані подаються на вхід блока визначення кінетичних характеристик для подальшої міжкадрової обробки.

Отримана інформація передається до персонального комп'ютера для статистичної обробки, вимірювання траєкторій руху клітинних ядер та відображається на моніторі у вигляді розподілу об'єктів за амплітудами коливань, швидкостями та прискореннями. Додатково формується банк

даних результатів дослідження проб букального епітелію.

Запропонована система контролю якості життя включає наступні функції: Здійснюється визначення загальної кількості клітинних ядер у пробі, кількості електронегативних та нейтральних ядер, а також їх процентного співвідношення. Дозволяє розширити параметри аналізу: автоматично вимірюється амплітуда коливань, додатково визначаються швидкість та прискорення рухомих ядер, це забезпечує отримання додаткової інформації про ступінь діелектричної поляризації клітинних ядер та пов'язану з нею генетичну активність ядерного геному. Формувати бази даних: результати досліджень автоматично накопичуються у банку даних для подальшої статистичної обробки. Володіє високою точністю: похибка вимірювань не перевищує 1%, що дозволяє фіксувати мінімальні зміни параметрів руху клітинних ядер у процесі мікроелектрофорезу.

Подальші дослідження спрямовані на поєднання автоматизованого методу оцінки енергетичного стану букального епітелію та різних методів у єдиній системі оцінки стану здоров'я. Поєднання запропонованого методу з алгоритмами сучасних методів обробки зображень [6] та машинного навчання забезпечить автоматичне виявлення прихованих закономірностей у великих масивах даних, прогнозувати зміни функціонального стану організму та ризику зниження адаптаційних можливостей. Це сприяє створенню інтелектуальних профілів якості життя, що відповідають концепціям Industry 4.0/5.0 та цілям сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Шкорбатов Ю.Г. Структурні та електрокінетичні властивості ядер клітин букального епітелію людини у зв'язку з дією фізико-хімічних факторів та зміною функціонального стану організму. Дисертація доктора біологічних наук. Харків, 2005.

2. Стрелков О.І., Стрелкова Т.О., Литюга О.П. Реализация цитобиофизического метода определения функционального и физиологического состояния человека оптико-электронными средствами // Радиоэлектроника и информатика. – 1998. - № 2. – С. 128-130.

3. Шахбазов В.Г., Стрелков О.І., Стрелкова Т.О., Литюга О.П., Коробов А.М. Автоматизована система визначення біологічного віку людини // Фотобіологія і фотомедицина. – 2000. - № 1,2. – С. 128-130.

4. Гончаренко М.С. Волновые процессы. Природа. Человек. Здоровье.: уч. Пособие. // сост. проф. М.С. Гончаренко, - Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. – 327 с.

5. Т. О. Стрелкова, О. І. Стрелков, та О. П. Литюга, «Спосіб вимірювання і контролю функціонального та фізіологічного стану людини». Патент на корисну модель № 55351. Заявка № u201007004.

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

професор, д.т.н. Стрількова Т.О., Пятайкина М.І.,
студентка Дмитрук С.С., студентка Певцова М.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
e-mail: tetiana.strilkova@nure.ua, mariia.piataikina@nure.ua,
sofiia.dmytruk@nure.ua, madina.pievtsova@nure.ua

Abstract. In this work, the development of an educational and research complex for studying the energetic, spatio-temporal, stochastic, and statistical properties of optical radiation is presented. The proposed information system for modeling the process of optical radiation registration includes modules for physical modeling, sensor registration, signal processing, and result visualization. The system is intended for scientific research, engineering development, and educational purposes, providing simulation, analysis, and optimization of processes related to the detection and processing of optical signals.

Ключові слова: фотодетектори, освітні цілі, інженерні розробки

Актуальність роботи. Сьогодні оптичні та оптико-електронні технології застосовуються практично у всіх областях людської діяльності, медицині, нано- та мікротехнологіях. Активній розвиток таких технологій обумовлює необхідність підготовки професіональних наукових та науково-педагогічних кадрів, які спроможні вирішувати системні інноваційні задачі науки та промисловості в умовах технологічного прогресу.

На сучасному етапі розвитку вищої школи, в умовах постійного нарощування наукоємності та ступеню комп'ютеризації, від майбутніх фахівців вимагають не тільки якості професійних знань, а також розвиненого системного, спроможного до прогнозування та випереджаючого технологічний прогрес інтелектуального мислення.

Тому розробка новітніх інноваційних комплексів по дослідженню методів прийому та перетворення оптичних сигналів в мікро- та наноелектронних приладах дозволить підвищити якість підготовки дипломованих фахівців технічних спеціальностей, динамічно змінювати зміст технічної освіти, розробляти інноваційні методики викладання, а також підтримувати зворотний зв'язок зі студентами – споживачами освітніх послуг.

Метою даної наукової роботи є створення навчального комплексу для вивчення енергетичних, просторово-часових, стохастичних та статистичних властивостей оптичного випромінювання.

Інформаційна система моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання – це програмно-апаратний комплекс, призначений для імітації, аналізу та оптимізації процесів виявлення, збору, обробки та зберігання даних, отриманих в результаті реєстрації оптичного

випромінювання (наприклад, світла, лазерного сигналу, інфрачервоного випромінювання тощо). В основі розробки системи є теоретичні й експериментальні методи досліджень, а саме: при перетворенні сигналів в мікроелектронних системах та вивченні статистичних характеристик використано основні положення хвильової та корпускулярної теорії світла, теорії ймовірностей, статистичної теорії потоків, теорії побудови мікроелектронних систем.

Основними компонентами системи є модуль фізичного моделювання, який служить для імітації джерел оптичного випромінювання (спектр, інтенсивність, напрямок); врахування середовища поширення (атмосфера, перешкоди, розсіювання). Модуль сенсорної реєстрації необхідне для моделювання роботи фотодетекторів, CCD/CMOS матриць; визначення параметрів чутливості, шумів, динамічного діапазону. Модуль обробки сигналів виконує функції фільтрації, нормалізації, перетворення сигналу; визначення характеристик випромінювання (інтенсивність). Модуль візуалізації та аналізу використовується для побудови графіків, гістограмного та статистичного аналізу результатів моделювання.

Інформаційна система моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання в наукових дослідженнях використовується для вивчення характеристик оптичного випромінювання в різних умовах, в інженерних розробках для тестування оптичних сенсорів, камер, CCD/CMOS матриць; освітні цілі – навчання студентів принципам реєстрації та обробки оптичного сигналу.

Моделювання інформаційної системи реєстрації оптичного випромінювання. В умовах розвитку мікро- та наносистемної техніки виникає потреба в простих, доступних та функціонально завершених комплексах для вивчення процесів реєстрації, перетворення і аналізу оптичних сигналів. Саме для цього розроблено навчально-дослідницький Комплекс Реєстрації Оптичних Сигналів (КРОС). КРОС поєднує в собі компоненти джерела випромінювання, фотоприймача, аналогових та цифрових схем обробки сигналів, що дозволяє наочно досліджувати основні закономірності перетворення оптичної енергії в електричну. Комплекс орієнтований на інтеграцію з програмними засобами аналізу та моделювання, зокрема Mathcad та Python а також застосування хмарних технологій у дослідженнях мікро- та нанотехнологій [1-4], зокрема для моделювання взаємодії оптичного випромінювання з напівпровідниковими фотоструктурами [5-6], що забезпечують гнучкість, масштабованість і доступність ресурсів, дозволяючи обробляти великі обсяги даних, проводити симуляції, аналізувати експерименти та створювати віртуальні лабораторії без дорогого обладнання. Система забезпечує вимірювання інтенсивності та просторового розподілу випромінювання з високою роздільною здатністю.

Робота спрямована на побудову структурної та функціональної схем

комплексу, обґрунтування вибору компонентної бази, аналіз стохастичних характеристик сигналів і шумів, а також моделювання вихідного сигналу приймача при різних умовах випромінювання.

Розробка структурної та функціональної схеми КРОС. Створення навчального комплексу комплекс реєстрації оптичних сигналів (КРОС) складається з таких основних елементів: оптичне джерело; оптичне середовище (волокно або повітря); фотоприймачі – в залежності від фізичних явищ, які визначають принцип дії, приймачі оптичного випромінювання використовуються декілька груп; комп'ютерна система обробки (ПК з програмним забезпеченням).



Рисунок 1. Проект комплексу реєстрації оптичних сигналів. Формування сигналу → Поширення в середовищі → Перетворення фотонів у струм → Програмна обробка та аналіз сигналу → Візуалізація / Збереження

Моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання. Моделювання проводиться для оцінки впливу шумів (внутрішніх і зовнішніх) на вихідний сигнал системи. Для цього використовують чисельні вибірки значень сигналу при різних умовах освітлення, та розраховують відповідні стохастичні характеристики. Типовий підхід: перетворення енергії випромінювання у кількість фотонів; перетворення фотонів у електрони за допомогою коефіцієнта квантової ефективності; порівняння кількості сигналових електронів із кількістю електронів, спричинених шумом. Результати моделювання подаються у вигляді таблиць та графіків, що показують роздільність сигналу і шуму за різних відстаней та освітленості.

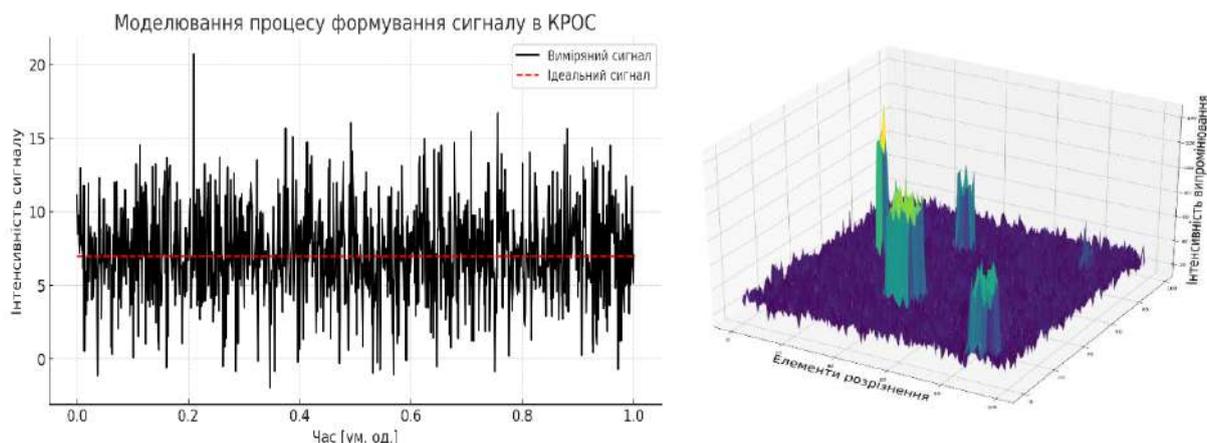


Рисунок 2. Моделювання процесу формування сигналу в КРОС

Висновки. В сучасних умовах розвитку вищої освіти створення навчальних комплексів, які дозволяють системно вивчати процеси формування, приймання та оброблення сигналів в електронних системах дає можливість формувати у студентів професійні знання та інтелектуальне мислення. Застосування сучасних комп'ютерних технологій дає можливість обробляти отриману інформацію. Розроблені методики приймання та оброблення сигналів сприяють укріпленню міждисциплінарних зв'язків (фізики, вищої математики, оптоелектроніки, матеріалознавства). В результаті використання розробленого комплексу реєстрації оптичних сигналів, вивчення та розрахунків їх статистичних характеристик дозволяє студентам формувати знання щодо планування та проведення експериментальних та теоретичних досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шевченко М.С., Стрілкова Т.О. Формування та обробка інформації в дифузному середовищі на основі технології обробки великих даних (BIG DATA) // Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Харків, 16-18 травня 2025 року, ХНУРЕ, С. 64–65.

2. Бородин Я. В, Стрілкова Т.О. Застосування хмарних технологій в галузі мікро- та нанотехнологій // Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Харків, 16-18 травня 2025 року, ХНУРЕ, С. 71–73.

3. Патров Д.О., Стрілкова Т.О. Оцінка ефективності оптико-електронних систем формування та обробки сигналів та зображень // Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Харків, 16-18 травня 2025 року, ХНУРЕ, С. 27–29.

4. Стрілкова Т.О., Калмиков О.С., Бендеберя Г.М., Пятайкина М.І., Поліщук О.В. Стохастичні моделі вихідних сигналів в оптико-електронних системах // Колективна монографія «Сучасні технології в науці та освіті». 2021. Северодонецьк. С. 256-259.

5. Strelkova T.A., Lytyuga A.P., Kalmykov A.S. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. 2021, Pages: 134-162. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005. Монографія. Chapter 5 in book. IGI Global. USA.

T. Strelkova, A.I. Strelkov, V.M. Kartashov, A. P. Lytyuga, A S. Kalmykov. Methods of Reception and Signal Processing in Machine Vision Systems // Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0., 2021, Pages: 71-102. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch003. Монографія. Chapter 3 in book. IGI Global. USA.

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

професор, д.т.н. Стрількова Т.О., Пятайкина М.І.

аспірант Патров Д.О., студент Селіванов С.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
e-mail: tetiana.strilkova@nure.ua, mariia.piataikina@nure.ua, denys.patrov@nure.ua,
serhii.selivanov@nure.ua

Abstract. The paper addresses the relevant problem of quality control of metallic surfaces in the context of Industry 5.0. An information processing method for machine vision systems is proposed, combining spatio-temporal and entropy-based approaches. Modeling and experimental studies were conducted to detect low-contrast defects. The results confirm improved accuracy and reliability of diagnostics, contributing to the development of intelligent quality control systems in industry.

Ключові слова: технічний зір, контроль якості, металеві поверхні.

Вступ. Технології виготовлення металевих деталей вимагають високого рівня точності та надійності контролю якості. Навіть незначні поверхневі дефекти, такі як подряпини, тріщини, корозійні включення чи неоднорідності структури, можуть призвести до зниження експлуатаційних характеристик виробів, скорочення їхнього ресурсу та виникнення аварійних ситуацій у критично важливих галузях, таких як машинобудівна, авіаційна та автомобільна. Традиційні методи візуального контролю не завжди забезпечують необхідну об'єктивність та швидкість, особливо у випадках аналізу малоконтрастних дефектів, які важко виявити.

Industry 5.0 орієнтується на синергію людини та технологій, де інтелектуальні системи допомагають підвищити якість виробництва. Сучасні системи технічного зору, поєднані з алгоритмами обробки даних забезпечують автоматизований контроль якості та дозволяють виявляти дефекти (подряпини, тріщини, корозія). Застосування методів машинного навчання для класифікації типів дефектів та прогнозування їхнього впливу на експлуатаційні характеристики дозволяють підвищити точність контролю якості та здійснювати аналіз поверхонь у реальному часі, використовуючи алгоритми цифрової обробки сигналів та зображень. Водночас існуючі підходи та методи мають обмеження при виявленні малорозмірних та малоконтрастних дефектів поверхні металів. Також на точність алгоритмів можуть впливати зовнішні фактори, такі як неоднорідність освітлення та властивості матеріалу [1].

Для технічної діагностики металевих поверхонь застосовуються оптичні, радіографічні, ультразвукові, магнітні методи, а також системи технічного зору, які дають можливість за рахунок застосування просторово-часової обробки сигналів суттєво підвищити точність

виявлення дефектів [1-3]. У сучасних виробничих лініях системи технічного зору дозволяють автоматизувати перевірку продукції зі швидкістю до сотень метрів стрічки за хвилину або тисяч деталей за годину. Просторово-часова обробка забезпечує можливість виявлення малокоонтрастних дефектів, відокремлення відблисків від реальних пошкоджень і стабільність роботи при змінних умовах освітлення. В роботі [4] досліджується застосування просторово-часової обробки сигналів, зокрема методу міжкадрової обробки для покращення співвідношення сигнал/шум (SNR) в системах технічного зору. Методи просторово-часової обробки враховують кореляцію сигналів у просторі та часі, що підвищує чутливість до мало контрастних дефектів і знижує кількість хибних спрацьовувань систем контролю якості [5, 6]. Апробація таких методів активно ведеться на прокатних лініях, у контролі зварних швів, виготовленні прецизійних металевих компонентів. Також важливим є використання методів статистичної обробки (Big Data) та стохастичних моделей сигналу й шуму для проектування складних систем технічного зору, особливо при виявленні дефектів, де шум, флуктуації, кореляції в часі й просторі можуть істотно впливати на результат [7, 8].

Таким чином розробка та удосконалення методів контролю якості металевих поверхонь із використанням систем технічного зору є актуальним завданням сучасної науки й промисловості, що відповідає стратегічним цілям Industry 5.0 – створення безпечного, ефективного та гуманно-центричного виробництва.

Метою роботи є розробка та дослідження методу обробки інформації для системи технічного зору, спрямованого на підвищення точності та надійності виявлення поверхневих дефектів металевих деталей шляхом поєднання методів просторово-часової та ентропійної обробки сигналів.

Об'єкт дослідження – процес контролю якості металевих деталей.

Предмет дослідження – методи та алгоритми обробки інформації в системах технічного зору для автоматизованого контролю якості виготовлення металевих деталей.

Основні завдання дослідження. Розробити метод обробки інформації, що поєднує підходи просторово-часової фільтрації та аналізу ентропії для покращення виявлення малокоонтрастних дефектів.

В доповіді представлено метод обробки інформації, який поєднує просторово-часові та ентропійні підходи що дозволяє комплексно оцінювати стан поверхні та підвищити точність та надійність виявлення поверхневих дефектів металевих деталей. Такий підхід може бути використано для розвитку інтелектуальних систем технічного зору та застосовано у промислових системах контролю якості.

Опис дослідження. Моделювання методу контролю якості виготовлення металевих поверхонь проводилось в декілька етапів. *Перший етап:* енергетичний та просторовий аналіз зображень дефектів на

металевих поверхнях. Розглянуто особливості розподілу інтенсивності сигналів та просторову локалізацію дефектів. Це дозволило визначити ключові ознаки, які можуть бути використані для автоматизованого виявлення пошкоджень. *Другий етап:* моделювання зображень дефектів на металевих поверхнях. Для перевірки ефективності методів обробки було здійснено моделювання зображень дефектів різної природи (подряпини, тріщини, корозійні плями). Моделі враховували варіації освітлення, шумові впливи та геометричні особливості поверхні. *Третій етап:* розробка програмного забезпечення. Застосовано спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує генерацію модельних зображень дефектів, визначення їх параметрів та подальший аналіз. Програма дозволяє змінювати умови спостереження та застосовувати різні алгоритми обробки для оцінки їх ефективності. *Четвертий етап:* проведення експериментальних досліджень. Застосовано методи збільшення контрастності та ентропійного аналізу на модельних та реальних зображеннях.

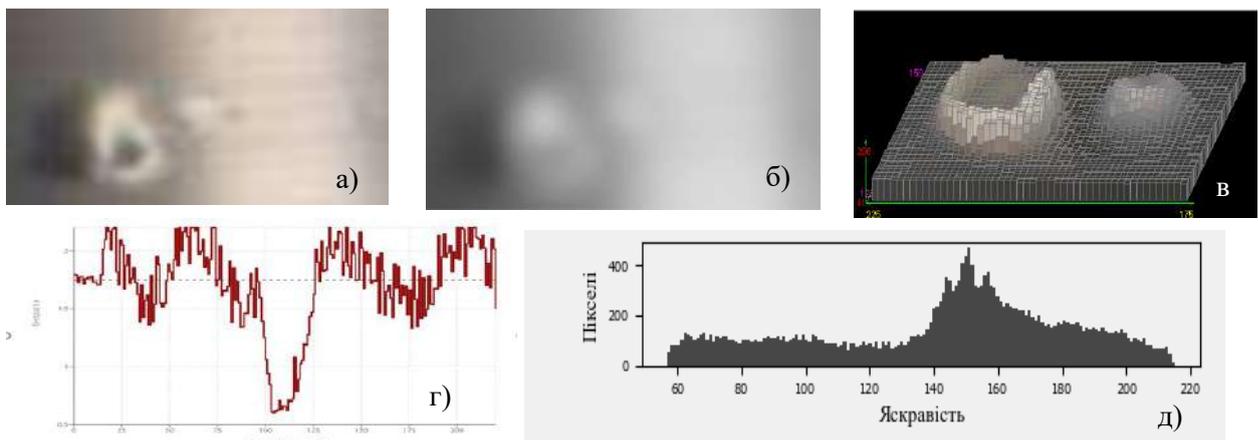


Рисунок 1. Результати візуалізації а) реальне зображення; б) модельне зображення; в) просторова гістограма дефекту прим'ятини на металевій деталі; г) ентропійний аналіз зображення; д) гістограмний аналіз зображення

Висновки. Експериментальні результати на модельних зображеннях показали, що застосування адаптивних методів дозволяє значно покращити видимість дрібних дефектів. Ефективність запропонованих методів також підтверджено на реальних зображеннях металевих поверхонь. Дослідження показали, що алгоритми локального контрасту забезпечують найкраще співвідношення між фрагментами на зображенні. Окремо досліджено застосування ентропійних методів для виявлення дефектів. Використання ентропійних показників дозволило оцінити ступінь структурної неоднорідності поверхні та виділити ділянки з потенційними

пошкодженнями. Експерименти підтвердили, що поєднання методів просторово-часової та ентропійної обробки сигналів є ефективним інструментом для автоматизованої діагностики, особливо у випадках, коли дефекти мають слабо виражені контрастні ознаки.

Список використаних джерел

1. Steger C., Ulrich M., Wiedemann C. Machine Vision Algorithms and Applications. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2018. 516 p.

2. Коваленко І. В., Петров С. М. Системи технічного зору в промисловості: навч. посібник. Харків : НТУ "ХПІ", 2022. 324 с.

3. Селіванов С. І., Стрількова Т. О. Візуальні методи контролю якості виготовлення металевих деталей за допомогою технічного зору // *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 29-го міжнародного молодіжного форуму, 16–19 квітня 2025 р.* Харків : ХНУРЕ, 2025. Т. 1. С. 61–63.

4. Патров, Д. О., Стрількова, Т. О. «Оцінка ефективності оптико-електронних систем формування та обробки сигналів та зображень» // *Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», ХНУРЕ, 16–19 квітня 2025 р.* – С. 27–29.

5. Strelkova T.A., Lytyuga A.P., Kalmykov A.S. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. 2021, Pages: 134-162. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005.

6. Strelkova T.A., Strelkov A.I., Lytyuga A.P., Kalmykov A.S. Methods of Reception and Signal Processing in Machine Vision Systems in Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0., 2021, Pages: 71-102. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch003.

7. Патров, Д. О., Стрількова, Т. О. «Технології обробки Big Data в оптико-електронних системах з урахуванням статистичних властивостей вихідних сигналів» // *Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», КПІ ім. І. Сікорського, Київ, 13–14 травня 2025 р.*

Пятайкина М.І., Стрількова Т.О. Інформаційні технології в діагностиці процесів дефектоутворення мікро- та наноелектронних структур / М. І. Пятайкина, Т. О. Стрількова // *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму, 16–19 квітня 2025 р.* – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Т. 1. – С. 50–52.

АДАПТИВНИЙ ОПТИЧНИЙ СЕНСОР НА ПЛАНАРНОМУ ХВИЛЕВОДІ ДЛЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

доцент, к.ф.м.н., Галат О.Б., студент Стаднік Д.В., студент Лашко Е.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна
e-mail: daniil.stadnik@nure.ua

Abstract. This paper investigates an adaptive optical sensor based on a planar waveguide for environmental monitoring systems. The proposed design offers a simpler technological alternative to D-shaped fiber sensor while retaining the advantages of total internal reflection and evanescent-field interaction. The study includes modeling of light propagation in the glass plate and calculation of key parameters such as penetration depth, number of reflections, and total attenuation. The results show that adjusting the input angle provides an effective mechanism for tuning sensor sensitivity. The approach enables the development of a flexible, microcontroller-controlled multispectral system suitable for field environmental measurements.

Ключові слова: оптичний сенсор, планарний хвилевід, екологічний моніторинг.

Вступ. Дослідження продемонстрували високий потенціал D-подібних волоконних сенсорів, що працюють на принципі повного внутрішнього відбиття (ПВВ) та взаємодії еванесцентного поля з середовищем. Такі сенсори є надзвичайно привабливими для задач сучасного моніторингу завдяки їхній високій чутливості до приповерхневих змін, можливості роботи в реальному часі та стійкості до електромагнітних завад, що є критичним для промислової автоматизації. Було показано, що їхня чутливість сильно залежить від оптичних параметрів системи (показників заломлення n_1 , n_2) та геометрії (кут падіння θ) [1].

Водночас, незважаючи на їхні характеристики, практична реалізація сенсорів на базі D-подібного волокна пов'язана зі значними технологічними викликами. Процес бокового шліфування є складним, дорогим та важко відтворюваним у серійному виробництві. Крім того, точне введення випромінювання в такій мікроструктурі вимагає складного юстувального обладнання.

Ці фактори обумовлюють необхідність пошуку альтернативних, технологічно простіших та економічно ефективніших конфігурацій, які б зберігали фундаментальні переваги методу ПВВ. Для подальшого дослідження фундаментальних принципів та розробки практичної, автоматизованої системи моніторингу, було проведено моделювання альтернативної, простішої в реалізації конфігурації сенсора. Ця конфігурація базується на тих самих фізичних принципах, але використовує макроскопічний планарний хвилевід – скляну пластину, що

відкриває широкі перспективи для її інтеграції в автоматизовані системи та використання як навчального стенду для підготовки фахівців.

Основна частина. Розглянемо систему, що складається зі стандартної скляної пластини (76x26x1.2 мм) з показником заломлення $n_{glass} \approx 1.5$, яка занурена у кювету з досліджуваною рідиною (рис. 1). Випромінювання від джерела світла (лазера) вводиться через один із торців пластини під певним кутом падіння θ_{in} .

Світло, увійшовши в пластину, зазнає заломлення і поширюється всередині неї, послідовно відбиваючись від плоских граней "скло-середовище" та "скло-повітря".

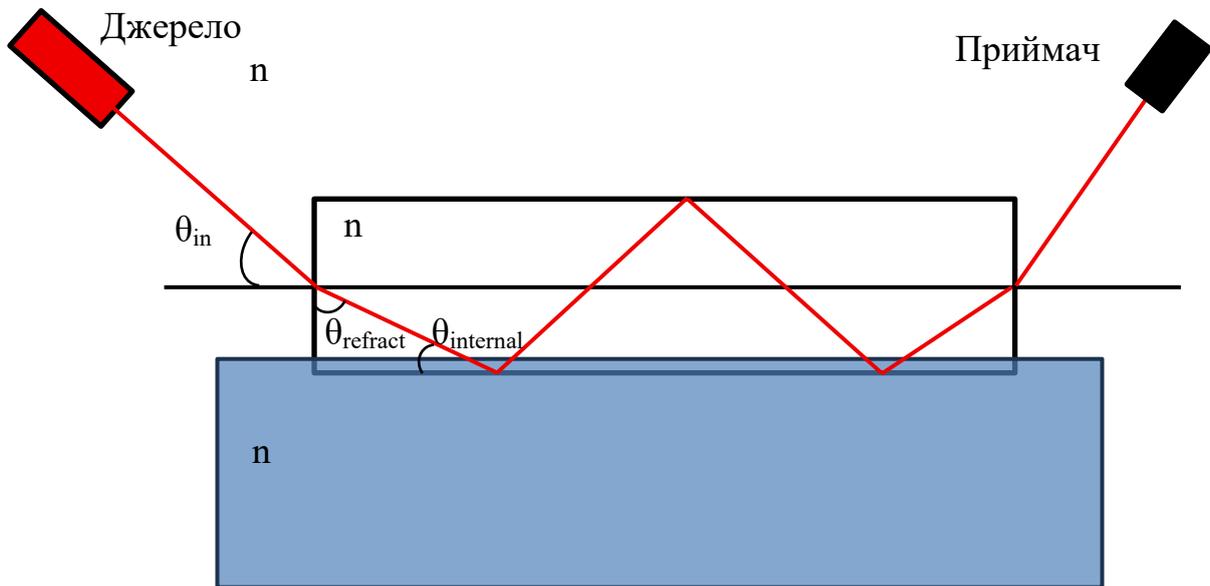


Рис 1. – Схематичне зображення поширення променя у планарному хвилеводі (скляній пластині) при введенні через торець.

Ключовим параметром, що визначає всю фізику процесу, є внутрішній кут $\theta_{internal}$ (кут падіння на робочу грань "скло-середовище") [2]. Цей кут безпосередньо пов'язаний із входним кутом θ_{in} , враховуючи геометрію введення:

$$n_{air} \cdot \sin(\theta_{in}) = n_{glass} \cdot \cos(\theta_{internal}), \quad (1)$$

Це співвідношення є надзвичайно важливим: воно показує, що, змінюючи зовнішній, легко контрольований кут, ми можемо прецизійно керувати внутрішнім кутом, а отже – всіма характеристиками сенсора [3].

Глибина проникнення еванесцентного поля (δ) є функцією λ (довжини хвилі) та $\theta_{internal}$ (а отже, і θ_{in}):

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{glass}^2 \sin^2(\theta_{internal}) - n_{sol}^2}}, \quad (2)$$

Розрахунки (рис. 2) показують, що при збільшенні входного кута θ_{in} (що відповідає зменшенню $\theta_{internal}$ та його наближенню до критичного кута

θ , глибина проникнення δ різко зростає. Наприклад, для $\lambda_3 = 650$ нм, δ зростає від ≈ 150 нм до ≈ 450 нм при зміні θ_{in} від 0 до 40 градусів. Це означає, що еванесцентне поле "опитує" значно товщий шар рідини.

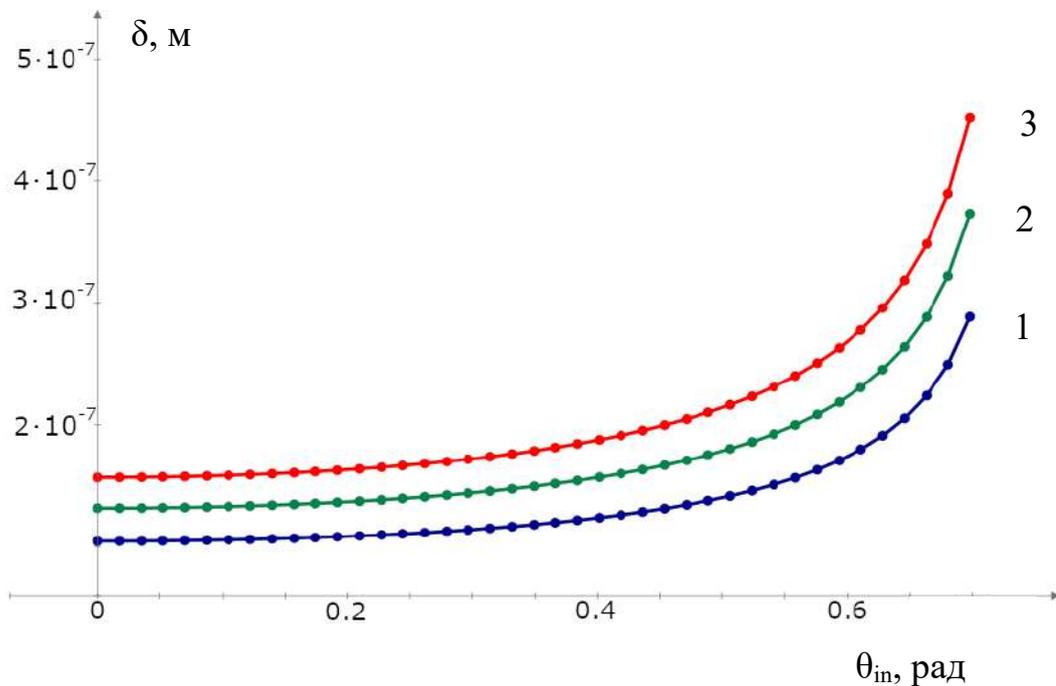


Рис 2. – Залежність глибини проникнення еванесцентного поля від вхідного кута для трьох довжин хвиль.

Для пластини довжиною $L=76$ мм і товщиною $t=1.2$ мм, кількість відбиттів N також залежить від кута:

$$N = \frac{L}{t \cdot \tan(\theta_{internal})} \quad (3)$$

При збільшенні θ_{in} (зменшенні $\theta_{internal}$), кількість відбиттів N збільшується (з 1-2 до 5-6).

Сумарне затухання сигналу має характер помножувального ефекту, який визначається як втратами на кожному окремому відбитті, так і загальною кількістю цих відбиттів. Вихідна потужність (P_{out}) описується наступною моделлю:

$$P_{out} = P_{in} \cdot (1 - Loss)^N \quad (4)$$

де P_{in} – вхідна напруга, P_{out} –

Втрати на одному відбитті ($Loss$) моделюються як функція, пропорційна глибині проникнення ($Loss = k \cdot \delta$), а N – це кількість повних відбиттів.

Аналіз показує, що при збільшенні вхідного кута θ_{in} одночасно зростають і втрати на кожному відбитті, і їх загальна кількість, що спричиняє стрімке експоненційне падіння P_{out} , ступінчастий характер якого обумовлений дискретною зміною N .

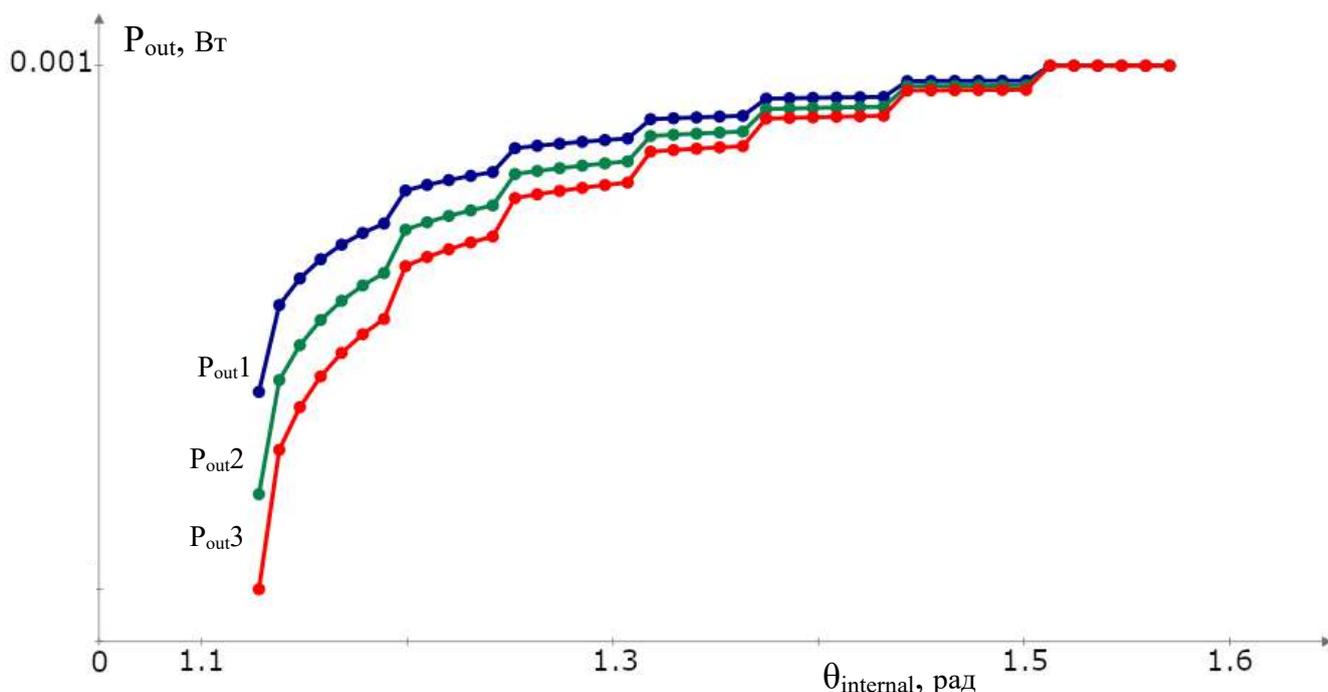


Рис 3. – Модельна вихідна потужність (P_{out}) як функція внутрішнього кута ($\theta_{internal}$) для трьох довжин хвиль.

Висновки. Моделювання сенсора на основі планарного хвилеводу підтвердило фундаментальні принципи, раніше розглянуті для D-подібного волокна. Водночас воно виявило новий, механізм керування – адаптацію чутливості шляхом зміни кута введення.

Цей підхід дозволяє проектувати не просто статичний сенсор, а інтелектуальну систему. Використання мікроконтролера для керування кутом та перемикання між різними довжинами хвиль перетворює пристрій на гнучкий, багатопараметричний аналізатор.

Поєднання такого вимірювального вузла з сучасними інформаційними технологіями відкриває шлях до створення нового покоління засобів автоматизації для польового екологічного моніторингу.

Список використаних джерел:

1. Surface Plasmon Resonance Based Sensors / ed. by J. Homola. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006.
URL: <https://doi.org/10.1007/b100321>
2. Snyder A. W., Love J. D. Optical Waveguide Theory. Boston, MA : Springer US, 1984. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2813-1>
3. Luo Z., Huang Y. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor based on wavelength and angular combined modulations. Optik. 2018. Vol. 168. P. 271–277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.085> (date of access: 13.11.2025).

РОЗШИРЕНЕ ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ТРИВАЛОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

студент Шутєєв Н. В., доцент, к.ф.м.н. Галат О.Б.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв,

e-mail: nazar.shutieiev@nure.ua, oleksandr.galat@nure.ua

Abstract. The global transition toward sustainable energy sources places photovoltaic (PV) technology at the forefront of the world's future power infrastructure. While the solar industry has matured significantly, a critical challenge remains: the often-observed gap between the predicted energy performance of a solar panel and its actual output over its 25–30 year lifespan. This performance discrepancy is driven by the complex interplay of material degradation, environmental stressors (such as temperature and varying light irradiance), and the inherent limitations of conventional models.

The primary aim of this work is to address this reliability gap by developing a sophisticated physical and numerical model of solar cell. This model is designed to accurately predict energy yield, simulate internal degradation mechanisms, and integrate strategies for enhancing panel sensitivity and signal stability under real-world operating conditions.

Ключові слова: фотоперетворювач, ефективність, моделювання

Вступ. Основна функція сонячної панелі базується на фотоелектричному ефекті, коли фотони перетворюються на електричний струм у напівпровідникових матеріалах. Продуктивність цього перетворення не є ідеально лінійною. Огляд існуючої літератури показує, що традиційні моделі продуктивності часто не відповідають очікуванням, оскільки вони розглядають комірку як ідеалізовану систему. Насправді такі фактори, як дефекти в напівпровідникових переходах, домішки в структурі матеріалу та різні джерела внутрішнього електронного шуму, призводять до значних втрат [1,2].

Критична проблема полягає в тому, що ці фактори, зокрема деградація та шум, безпосередньо впливають на загальну чутливість панелі – її здатність ефективно перетворювати світло на стабільний електричний сигнал, особливо в умовах низької освітленості або після років експлуатації. Обмеження звичайних панелей виникають через фундаментальні компроміси між вартістю матеріалу, довговічністю та ефективністю перетворення. Щоб подолати ці обмеження, необхідно визначити та впровадити стратегії, які активно зменшують внутрішній шум та стабілізують електронну реакцію.

Основна частина. За основу у процесі розрахунку використовуємо фізичну модель фотоперетворювача, яка реалізована у вигляді еквівалентної схеми (Рис. 1). Її основною перевагою є простота, що робить

її придатною для швидкої оцінки продуктивності та інтеграції у програмне забезпечення для моделювання більших систем.

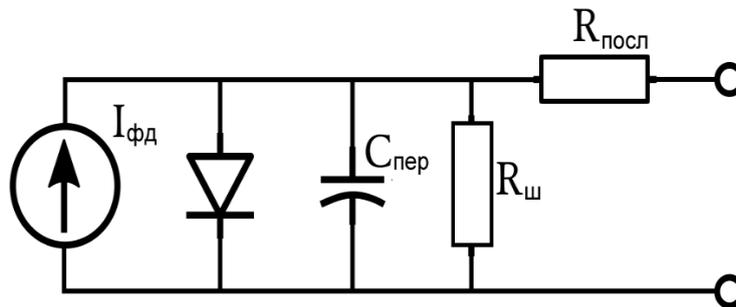


Рисунок 1 – Еквівалентна схема фотоперетворювача

Методологія цього проекту передбачала двосторонній підхід: поглиблений аналітичний огляд матеріалознавства та проектування електронних підсистем, а також розробку комплексної фізичної моделі. Модель була побудована для моделювання складних фізичних процесів усередині фотоелектричного елемента, від поглинання фотона до збору результуючих носіїв заряду. Ключовим аспектом розробки було точне представлення шумових факторів, які можуть суттєво обмежити чутливість детектора. Ці джерела шуму включають тепловий шум та квантовий шум.

Конкретні стратегії підвищення чутливості були інтегровані безпосередньо в модель, зосереджуючись на двох основних областях. Першою областю була оптимізація матеріалів та геометрії, яка включала оцінку того, як зміни товщини напівпровідникового шару, типу переходу та властивостей матеріалу впливають на ефективність збору носіїв та внутрішні втрати. Методики розрахунків поглинальної здатності матеріалів та структур, що використовують у складі фотоперетворювача, представлені у [3,4, 5]. Другою областю були методи зменшення шуму, а саме, використовувались імітаційні методи, спрямовані на мінімізацію впливу електронного та квантового шуму.

Обчислювальна фаза включала виконання різних сценаріїв з використанням розробленої моделі. Моделювання надало детальне уявлення про реакцію фотоприймальної комірки за різних умов опромінення, температури та якості матеріалу. Діаграма розсіювання, що зображена на рисунку 2, демонструє поступове відхилення фактичних результатів продуктивності фотоелектричних панелей від теоретичних (прогнозованих) та свідчить також про наявність систематичних чинників, а не лише випадкових явищ, що впливають на експлуатаційні характеристики досліджуваних приладів.

Ключові результати продемонстрували кількісний зв'язок між конкретними матеріалами та геометричними параметрами

фотоперетворювачів, а також загальною експлуатаційною чутливістю. Наприклад, моделювання показало, що оптимізація якості напівпровідникових переходів [6,7] має непропорційно позитивний вплив на мінімізацію втрат струму та зменшення шкідливого впливу шуму. Це свідчить про те, що у виробництві слід зосередитися на контролі цих нанорозмірних характеристик.

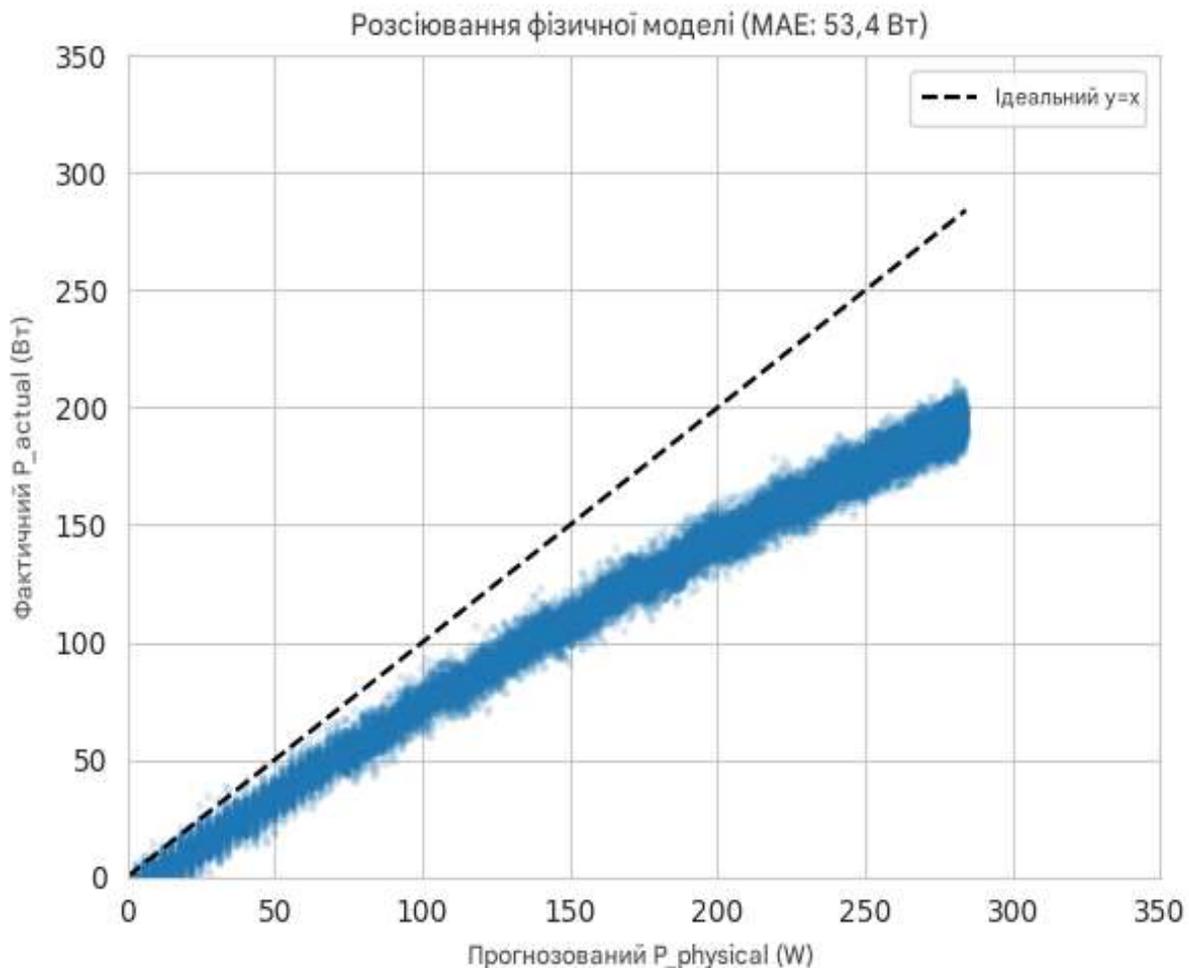


Рисунок 2 – Порівняння фактичних та прогнозованих прогнозованої кривої деградації потужності (розроблена модель) з фактичними довгостроковими польовими даними

Висновки. Аналіз змодельованих кривих реакції показав, як різні стратегії зниження шуму впливають на довгострокову стабільність роботи. Зокрема, модель надала прогнозні криві, які ілюструють компроміс між максимізацією початкової вихідної потужності та мінімізацією швидкості деградації з часом. Результати дають змогу зрозуміти, що панель, розроблена з інтегрованими механізмами зниження шуму, навіть якщо жертвує невеликою часткою пікової початкової ефективності, підтримує

значно вищий рівень продуктивності після двох десятиліть служби.

Підсумовуючи, слід сказати, що успішно розроблено вдосконалену фізичну модель, яка включає критичні фактори матеріалу, геометрії та шуму. Отримані симуляції підтвердили, що стратегічна оптимізація матеріалів та інтегровані методи зниження шуму можуть значно підвищити експлуатаційну чутливість та довгострокову надійність фотоелектричних панелей.

Список використаних джерел.

1. Чертова Д. О. Деградація сонячних панелей / Д. О. Чертова, М. К. Соколов ; наук. керівник М. Є. Алфьоров // 22-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» : зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – С. 152–153..

2. Васюхно К. В. Фізичний принцип роботи сонячних панелей / К. В. Васюхно ; наук. кер. В. М. Ігнатенко // Перший крок у науку : матеріали VIII студент. конф., м. Суми, 11 груд. 2016 р. / відп. за вип. М. Б. Оприско. – Суми : СумДУ, 2016. – С. 238–239.

3. Галат О. Б. Розрахунок поглинальної здатності сонячного фотоперетворювача на основі $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$. Радіотехніка : Всеукр. міжвідом. наук.-техн. зб. 2017. Вип. 190. С. 44–49.

4. Натарова Ю. В. Поглинальна здатність найбільш перспективних матеріалів сонячних фотоперетворювачів / Ю. В. Натарова, А. Б. Галат // Радіоелектроніка та молодь у XXII столітті : зб. тез. доп. XXI Харків. конф. молодих науковців, 17–19 квіт. 2018 р. – Харків, 2018. – С. 45.

5. A. Sliusarenko, L. Sviderska, A. Galat Calculation Of The Absorption Capacity Of Multi-Junction Solar Photoconverters // XII International Scientific Conference “Functional Basis of Nanoelectronics” September, 2021, Kharkiv-Odesa, Ukraine. Collection of scientific works. – P.98-100.

6. S. Babychenko, O. Babychenko , O. Galat Microwave Photomodulation Method for Noninvasive Analysis of Doping Profiles in Inhomogeneous Semiconductor Structures// JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS Vol. 17 No 4, 04006(6pp) (2025) DOI: 10.21272/jnep.17(4).04006

7. Galat A. B. Simulation of an Optimal Design for (P)-a-Si:H/(N)-c-Si Photovoltaic Converters Using the Analytical Model // Telecommunications and Radio Engineering, vol. 74, 2015, N13, PP. 1215-1223.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

студент Нечай Ю.І., студент Мартинюк В.В., професор Свид І.В.
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки
e-mail: yurii.nechai.20@pnu.edu.ua, vitalii.martyniuk.20@pnu.edu.ua

Abstract. The work analyzes methods and means of controlling temperature regimes in computer systems. It is shown that the rapid growth of the volume of processed information requires high performance of computer systems. Which in turn leads to overheating of processor systems and other electronic components of computer systems. Existing cooling systems are analyzed. It is proposed to use "aquarium" immersion cooling for more effective cooling of high-performance computer systems. The proposed system is tested, which shows better results compared to air and water cooling.

Ключові слова: комп'ютерна система, процесор, температурний режим, аналіз, контроль, енергоефективність.

Вступ. Стрімкий розвиток компаній у сфері комп'ютерних технологій та електроніки зумовлює щорічне зростання кількості нових компонентів комп'ютерних систем, які характеризуються підвищеною продуктивністю, проте водночас меншою енергоефективністю, що супроводжується зростанням енергоспоживання і, як наслідок, надмірним тепловиділенням. Перегрів апаратних елементів може призвести до їх передчасного виходу з ладу, зниження працездатності всієї системи, а також до значних часових і фінансових втрат як для бізнесу, так і для звичайних користувачів [1-3].

Основна частина. Для підтримання допустимих температурних режимів створено різноманітні технічні рішення: від простих пасивних систем відведення тепла (радіатори), до комбінованих (радіатор із вентилятором) та високоефективних рідинних систем охолодження із застосуванням pomp і циркуляції робочої рідини по трубках, підключених безпосередньо до ключових елементів. Незважаючи на широкий спектр таких технологій, питання дослідження методів і засобів контролю та регулювання температурних режимів комп'ютерних систем залишається актуальним і в майбутньому.

У ході виконання роботи проведено аналіз та оцінку методів і засобів терморегулювання комп'ютерних систем, також визначено більш оптимальні наявні рішення щодо терморегулювання систем при інтенсивній та тривалій обробці інформації. До недоліків таких методів можна віднести високу вартість, громіздкість, подекуди недостатню ефективність.

За результатами аналізу, запропоновано для охолодження

високопродуктивних комп'ютерних систем використовувати «акваріумне» імерсійне охолодження. В цій системі охолодження всі компоненти комп'ютерної системи занурюються в «акваріум» з діелектричною рідиною, що не проводить електричний струм, але добре проводить тепло. Такий метод дозволяє одночасно відводити тепло від усіх елементів системи, включаючи ті, які раніше отримували повітряне охолодження.

Щоб продемонструвати ефективність запропонованого методу охолодження комп'ютерних систем за допомогою «акваріумного» рідинного охолодження з імерсійною рідиною, було проведено серію тестів. У цих експериментах комп'ютер працював при повному навантаженні, опрацьовуючи різні типи інформації. Результати тестів дозволили порівняти температуру та стабільність роботи системи при різних типах охолодження.

Аналіз даних показує, що при високому тепловиділенні комп'ютерної системи та її компонентів, запропонована система охолодження демонструє значно кращі показники стабільності температури. Також можна зазначити, що температурні коливання у випадку використання «акваріумної» системи залишаються мінімальними, що забезпечує надійну роботу процесора, відеокарти та інших компонентів навіть при пікових навантаженнях. Такий ефект досягається завдяки безпосередньому зануренню всіх елементів у імерсійну рідину, яка забезпечує рівномірний та ефективний відвід тепла з усіх частин комп'ютерної системи. Також система охолодження «акваріумного» типу має ще кілька значних переваг. По-перше, вона є практично безшумною, оскільки відсутні вентилятори. По-друге, така система споживає менше електроенергії, що робить її більш енергоефективною.

Запропонована «акваріумна» імерсійна система охолодження не лише підтримує оптимальні температурні умови для комп'ютерних компонентів, а й забезпечує комфортні умови експлуатації, знижуючи рівень шуму та енергоспоживання. Це робить її особливо перспективною для використання в серверних стійках, робочих станціях та високопродуктивних ігрових системах, де стабільність та надійність мають вирішальне значення.

Висновки. Результати цих досліджень наочно демонструють, що запропонована система охолодження забезпечує рівномірне та ефективне відведення тепла, запобігає перегріванню компонентів і підтримує стабільну роботу комп'ютерної системи навіть під високим навантаженням. Такий підхід дозволяє оцінити переваги «акваріумної» системи не лише з точки зору температурного режиму, але й у контексті енергоефективності та безшумності роботи.

Список використаних джерел.

1. Основи комп'ютерної техніки навчальний посібник / Яремчук Ю. Є., Катаєв В. С., Сінюгін В. В. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2017. 129 с.
2. Коман Б. П. Функціональні елементи інформаційних систем на базі напівпровідникової електроніки : навч.посіб. Львів : ЛНУ ім. Ів. Франка, 2018. 794 с.
3. Леонт'єв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навч. посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 122 с.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХІД

студент Мартинюк В.В., студент Нечай Ю.І., професор Свид І.В.
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки
e-mail: vitalii.martyniuk.20@pnu.edu.ua, yurii.nechai.20@pnu.edu.ua

Abstract. The present work is devoted to the analysis of contemporary trends in the development of microprocessor technology. Key aspects include the evolution of microarchitectures, integration of system-on-chip solutions, and the implementation of advanced low-power and high-performance designs. The research highlights the impact of emerging fabrication technologies, multi-core architectures, and artificial intelligence integration on the efficiency and scalability of microprocessor systems. This study aims to provide a comprehensive overview of current innovations and future directions in the field.

Ключові слова: мікропроцесор, мікроконтролер, інновації, архітектура, система-на-кристалі, енергоефективність.

Вступ. Розвиток мікропроцесорної техніки є фундаментальним фактором прогресу в сучасній електроніці та інформаційних технологіях [1-3]. Протягом останніх десятиліть спостерігається значне прискорення інновацій у сфері проектування та виробництва мікропроцесорів, що зумовлено як вимогами до підвищення продуктивності, так і потребою в зниженні енергоспоживання [4-6]. Сучасні тенденції включають впровадження багатоядерних архітектур, інтеграцію штучного інтелекту, розвиток систем-на-чипі та вдосконалення технологій напівпровідникового виробництва, що дозволяє досягти високої продуктивності та масштабованості електронних систем [7-10].

Основна частина. Сучасна мікропроцесорна техніка характеризується низкою важливих тенденцій, що визначають розвиток електронних систем високого рівня продуктивності та енергоефективності [1-3]. По-перше, активно розвиваються багатоядерні та гетерогенні архітектури, які дозволяють значно підвищити обчислювальну потужність без пропорційного збільшення енергоспоживання. Використання багатоядерних рішень сприяє ефективному розподілу задач між ядрами процесора, що забезпечує паралельну обробку великих обсягів даних та оптимізацію часу виконання складних обчислювальних алгоритмів. Гетерогенні архітектури, у свою чергу, дозволяють поєднувати ядра з різними характеристиками продуктивності та енергоспоживанням, адаптуючи обробку даних до конкретних завдань і тим самим підвищуючи загальну ефективність системи.

По-друге, інтеграція систем-на-чипі (SoC) забезпечує компактність та

функціональну завершеність сучасних електронних пристроїв. Завдяки об'єднанню процесорних ядер, графічних та спеціалізованих блоків на єдиному кристалі, SoC дозволяють зменшити затримки між компонентами, підвищити енергоефективність та скоротити розміри електронних систем. Крім того, SoC спрощують проектування складних систем, оскільки забезпечують готову платформу для інтеграції різноманітних периферійних модулів та апаратних прискорювачів обчислень, таких як блоки обробки сигналів або нейронних мереж. Залежність продуктивності процесора від ядер показано на рис. 1.

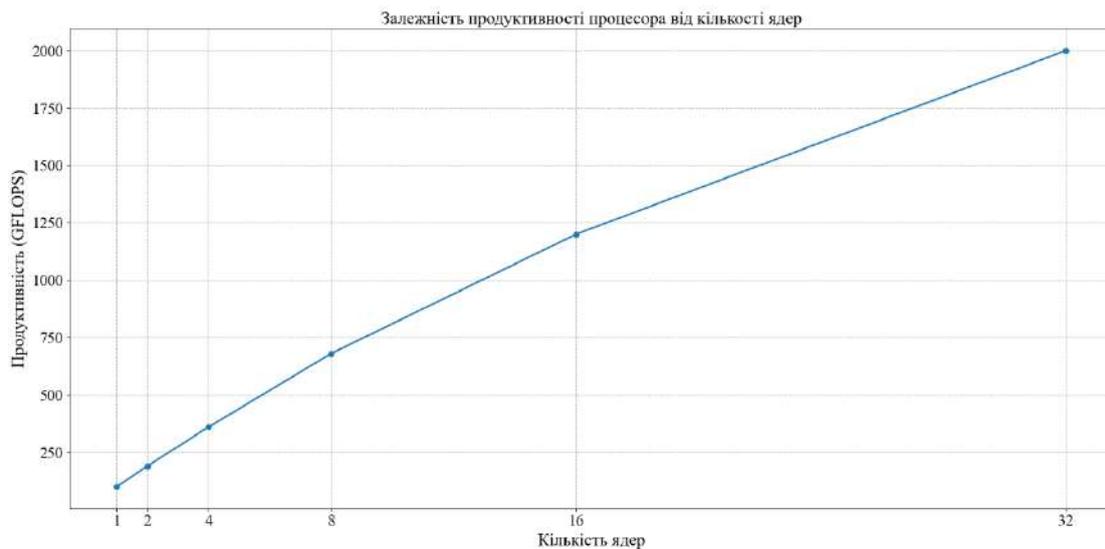


Рисунок 1 – Графік залежностей продуктивності процесора від кількості ядер

По-третє, сучасні процесори активно використовують новітні технології напівпровідникового виробництва, такі як транзистори FinFET та екстремальна ультрафіолетова (EUV) літографія. Ці технології дозволяють суттєво зменшити розміри транзисторів і підвищити щільність їх інтеграції на кристалі, що, в свою чергу, сприяє зростанню продуктивності та зниженню енергоспоживання. Розвиток напівпровідникових технологій також відкриває шлях до виготовлення процесорів із меншою тепловою втратою та більш стабільною роботою на високих частотах, що особливо важливо для серверних та мобільних платформ.

Нарешті, впровадження алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання безпосередньо в архітектуру процесорів відкриває нові перспективи для високопродуктивних обчислень у реальному часі, автономних систем та розумних пристроїв Інтернету речей. Спеціалізовані апаратні прискорювачі для нейронних мереж, інтегровані в сучасні процесори, дозволяють ефективно виконувати завдання комп'ютерного зору, обробки природної мови та прогнозного аналізу даних без значного

навантаження на центральне ядро. Це забезпечує підвищення швидкодії та енергоефективності складних систем штучного інтелекту, що особливо актуально для мобільних та автономних платформ.

Загалом, сучасні тенденції розвитку мікропроцесорної техніки спрямовані на поєднання високої продуктивності, масштабованості, енергоефективності та інтеграції інтелектуальних функцій, що відкриває нові можливості для створення інноваційних електронних систем наступного покоління.

Висновки. Аналіз сучасних тенденцій розвитку мікропроцесорної техніки показує, що ключовими напрямками є багатоядерні та гетерогенні архітектури, інтеграція систем-на-чипі, вдосконалення технологій виробництва та впровадження штучного інтелекту. Ці фактори забезпечують підвищення продуктивності, енергоефективності та функціональних можливостей сучасних електронних систем. Подальші дослідження у цій сфері сприятимуть створенню інноваційних рішень для різноманітних галузей промисловості та науки.

Список використаних джерел.

1. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах: Навч. посіб. / О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 144 с.
2. Програмування мікроконтролерів. Лабораторний практикум: Навч. посіб. / Б. С. Дзундза, І. В. Свид. Івано-Франківськ : ЛІРА ЛТД, 2025. 100 с.
3. Проєктування вбудованих систем. Лабораторний практикум: Навч. посіб. / Б. С. Дзундза, І. В. Свид. Івано-Франківськ : ЛІРА ЛТД, 2025. 84 с
4. Терещенко Т. О., Тодоренко В.А., Батрак Л.М., Ямненко Ю. С. Мікропроцесорні пристрої. Навчальний посібник для студентів спеціальності «Електроніка». К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 244с.
5. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Мікропроцесорні системи контролю та керування: Навч. посібник для студентів ЗВО. Харків: ХНУРЕ. 2020. 244 с.
6. Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи : підручник. У 2 ч. Ч. 1. Мікропроцесорні системи [Електронний ресурс] / А.О. Новацький. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2020. 361с.
7. Мікропроцесорна техніка. / Ю.І. Якименко, Т.О. Терещенко, Є.І. Сокол, В.Я. Жуйков, Ю.С. Петергеря. За ред. Т.О. Терещенко. – Київ, 2018. 440 с
8. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В.І., Лисенко В.П., Юрченко О.М., Лукін В.Є., Руденський А.А. К. : «Агроосвіта», 2015. 676 с.

9. Мікропроцесорна техніка : підручник / В. Я. Жуйков, Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко. 3-тє вид., перероб. і допов. Київ: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2015. 440с.

Огородник, К. В. Мікропроцесорна техніка : навч. посібник / К. В. Огородник, Б. П. Книш. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 106 с.

АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ДАТЧИКІВ ВИЯВЛЕННЯ ВІБРАЦІЙ ВІД РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

студент Сербський Г.О., доцент, к.т.н. Зубков О.В.,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м.Харків, Україна
e-mail: hlib.serbskyi@nure.ua, oleh.zubkov@nure.ua

Abstract. The relevance of vibration level assessment when detecting the movement of moving objects, such as humans, is demonstrated. A model for calculating vibration attenuation over distance is presented. Calculations are performed for different wave types and attenuation values. The human motion detection range is calculated for existing sensor types.

Ключові слова: акселерометр, вібрації, виявлення, геофон, згасання, сферичні хвилі, циліндричні хвилі.

Вступ. Виявлення та аналіз вібрацій, що поширюються у поверхневих шарах ґрунту внаслідок руху об'єктів, є важливою науково-прикладною задачею в галузях технічної безпеки, геофізичного моніторингу, охоронних систем та інтелектуальних сенсорних мереж [1,2]. Рухомі об'єкти, такі як люди, транспортні засоби або технічні механізми, генерують характерні механічні коливання, які поширюються у вигляді пружних хвиль у ґрунті та можуть бути зафіксовані спеціалізованими датчиками. Аналіз таких сигналів дозволяє здійснювати виявлення, класифікацію та оцінку параметрів руху об'єктів без прямого візуального контакту.

Сучасний розвиток сенсорних технологій сприяв появі широкого спектра датчиків, здатних реєструвати вібраційні впливи з високою чутливістю та часовою роздільною здатністю. До них належать геофони, п'єзоелектричні датчики, MEMS-акселерометри, а також спеціалізовані сейсмічні сенсори [2,3]. Кожен із зазначених типів має власні конструктивні особливості, частотні характеристики, рівень шумів та вимоги до умов встановлення, що суттєво впливає на ефективність їх застосування для виявлення слабких вібрацій від рухомих об'єктів.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених сейсмічним і вібраційним вимірюванням, питання вибору оптимального типу датчика для задач поверхневого виявлення руху залишається актуальним. Це зумовлено необхідністю компромісу між чутливістю, енергоспоживанням, вартістю, габаритами та можливістю інтеграції в автономні або вбудовані системи. Особливої уваги потребує аналіз роботи датчиків у реальних ґрунтових умовах, де параметри сигналу значною мірою залежать від типу ґрунту, глибини встановлення сенсора та зовнішніх завад.

Метою даного дослідження є аналіз та порівняння основних типів датчиків, що застосовуються для виявлення вібрацій від рухомих об'єктів

у поверхні землі, з точки зору їх фізичних принципів роботи, частотних характеристик та практичної придатності до використання в автономних системах моніторингу. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем вібраційного контролю та охоронно-сигнальних комплексів.

Основна частина.

Вібрації, що виникають унаслідок руху об'єктів по поверхні землі, зумовлюють поширення пружних хвиль у ґрунті. Основний внесок у формування вимірюваного сигналу в поверхневому шарі роблять поверхневі хвилі типу Релея, а також, у меншій мірі, об'ємні поздовжні та поперечні хвилі. Для задач виявлення рухомих об'єктів найбільший практичний інтерес становлять саме хвилі Релея, оскільки вони поширюються вздовж поверхні та мають найбільшу амплітуду в приповерхневих шарах ґрунту.

Амплітуда коливань при поширенні хвиль у ґрунті зменшується внаслідок геометричного розходження та внутрішнього загасання середовища. Для поверхневих хвиль залежність амплітуди від відстані r може бути апроксимована виразом [1]:

$$A(r) = \left(\frac{1}{r}\right)^n A_0 \cdot e^{-\alpha r} \tag{1}$$

A_0 — амплітуда коливань поблизу джерела,
 α — коефіцієнт загасання, що залежить від механічних властивостей ґрунту та частоти сигналу,
 n – коефіцієнт, що описує тип хвилі. При циліндричних хвилях $n=0.5$, а при сферичних хвилях $n=1$.

Таким чином, дальність виявлення вібрацій істотно залежить від типу ґрунту (піщаний, глинистий, кам'янистий), його вологості та ущільненості, а також від спектрального складу збуджених коливань.

У таблиці 1 наведено результати обчислень амплітуди хвиль для сферичних та циліндричних хвиль від відстані для випадків мінімального згасання (демпфування) $\alpha=0,02$ та сильного згасання $\alpha=0,2$.

Сучасні акселерометри середнього цінового діапазону, такі, як ADXL355, мають чутливість порядку $25\mu\text{g}/\text{Гц}^{0.5}$. У сучасних геофонів чутливість на частоті 5Гц буде порядку $96\mu\text{g}/\text{Гц}^{0.5}$.

Таблиця 1 – Результати розрахунків рівня вібрацій на різних відстанях

r, м	A _{циліндрич} , mg		A _{сферич} , mg	
	слабке	сильне	слабке	сильне
Демпфування				
1	5,1	5,1	5,1	5,1

5	2,08	1,03	2,5	2,08
10	1,33	0,3	0,93	0,46
20	0,79	0,058	0,19	0,014
50	0,25	0,0017	0,051	0,0003

Зазвичай вважається, що якісне виявлення та обробка вібраційних сигналів можлива при відношеннях сигнал/шум від 10 та вище. Отже порівнюючи розрахунки значень вібрацій на різних відстанях для випадків двох типів хвиль та слабого і сильного демпфування можемо зробити висновки:

- при слабкому демпфуванні виявлення руху людини може бути реалізовано до 50м з урахуванням чутливих акселерометрів;
- при сильному демпфуванні дальність виявлення руху людини суттєво знижується до 10-20м.

Висновки. Проведений аналіз розповсюдження вібраційних хвиль у ґрунті показав, що менше загасання мають циліндричні хвилі. Тип ґрунту суттєво впливає на величину загасання і величина цього впливу може досягати 170 разів. Порівнюючи характеристики сучасних чутливих акселерометрів та геофонів можна зробити висновок при їх приблизно однакову чутливість, хоча чутливість акселерометрів дещо вища. На основі розрахунку рівня вібрацій на різних відстанях при русі людини можна зробити висновок, що при слабкому загасанні відстань її виявлення може досягати 50м, а при сильному зменшується до 10м.

Список використаних джерел

3. Xing K., Wang N., Wang W. A Ground Moving Target Detection Method for Seismic and Sound Sensor Based on Evolutionary Neural Networks. 2022. Appl. Sci., Vol.12, Iss.18. P. 1-12
4. Chang C., Kong L., Han L., Li J., Pan S., Wei Y. Vibration Analysis and Vehicle Detection by MEMS Acceleration Sensors Embedded in PCC Pavement. 2025. Sensors, Vol.25. P.1-21
5. Valero M., Li F., Zhao L., Zhang C., Garrido J., Han Z. Vibration sensing-based human and infrastructure safety/health monitoring: A survey. 2021. Digital Signal Processing. Vol. 114. P.1-15

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕНЬ НА СУЧАСНИХ АПАРАТНИХ ПЛАТФОРМАХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

студент Оніщенко А.В., доцент, к.т.н. Зубков О.В.,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м.Харків, Україна
e-mail: andrii.onishchenko@nure.ua, oleh.zubkov@nure.ua

Abstract. This article examines the application of the wavelet transform mathematical method to extracting time-frequency features of acoustic signals. The most effective wavelet functions for analyzing various signal types are discussed. The execution times of wavelet transforms were determined experimentally. The feasibility of implementing real-time signal processing using the considered wavelet functions was assessed.

Ключові слова: Вейвлет перетворення, час обчислення, акустичний сигнал, librosa.

Вступ. Вейвлет-перетворення на сьогодні є одним із найбільш ефективних інструментів аналізу нестационарних сигналів у часово-частотній області [1-3]. На відміну від класичних методів спектрального аналізу, зокрема перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз забезпечує змінну роздільну здатність за часом і частотою, що робить його особливо придатним для обробки сигналів зі швидкоплинними або локалізованими у часі особливостями. Завдяки цьому вейвлет-перетворення широко застосовуються в задачах обробки акустичних, сейсмічних, біомедичних сигналів, у системах технічної діагностики, розпізнавання образів та моніторингу стану об'єктів.

Разом із зростанням обсягів даних та підвищенням вимог до швидкодії сучасних вимірювальних і керуючих систем, особливої актуальності набуває проблема реалізації вейвлет-перетворень у реальному часі [2]. Реальний час обробки є критичним для вбудованих систем, автономних сенсорних вузлів, систем раннього попередження та кіберфізичних систем, де затримки обробки сигналів можуть призводити до втрати інформації або зниження ефективності прийняття рішень.

Сучасні апаратні платформи, зокрема мікроконтролери, цифрові сигнальні процесори (DSP), програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA) та системи на кристалі (SoC), відкривають нові можливості для апаратної або апаратно-програмної реалізації складних алгоритмів цифрової обробки сигналів. Водночас вейвлет-перетворення характеризуються значною обчислювальною складністю, потребують ефективного управління пам'яттю та оптимізації паралельних обчислень, що ускладнює їх впровадження в системах з обмеженими ресурсами.

У зв'язку з цим актуальним є аналіз можливостей реалізації вейвлет-перетворень на сучасних апаратних платформах із урахуванням вимог реального часу. Такий аналіз дозволяє визначити доцільність застосування конкретних типів вейвлетів, обрати оптимальні архітектурні рішення, а також оцінити компроміси між точністю аналізу, швидкодією та апаратними витратами.

Метою даної роботи є аналіз обчислювальних особливостей вейвлет-перетворень та дослідження можливостей їх ефективної реалізації у режимі реального часу.

Основна частина.

Вейвлет-перетворення є методом аналізу сигналів, що забезпечує одночасне представлення інформації у часовій та частотній областях. Основною ідеєю вейвлет-аналізу є розкладання досліджуваного сигналу на набір елементарних функцій — вейвлетів, які є локалізованими як у часі, так і у частоті. Це дозволяє ефективно аналізувати нестационарні сигнали, характеристики яких змінюються з часом. Математичний опис такого перетворення наведено нижче [1]

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

де a – параметр масштабу, що задає частотні характеристики аналізу;

b – параметр зсуву у часі;

$\psi^*(t)$ – комплексно-спряжена материнська вейвлет-функція;

Базовою функцією вейвлет-аналізу є так званий материнський вейвлет, з якого шляхом масштабування та зсуву формуються всі інші вейвлети. На відміну від гармонічних функцій, що використовуються у перетворенні Фур'є і мають нескінченну часову протяжність, вейвлети мають скінченну або швидко спадну підтримку, що забезпечує високу часову локалізацію.

Загалом, вейвлет-перетворення дозволяє подати сигнал у вигляді сукупності коефіцієнтів, кожен з яких відображає вклад певної частотно-часової компоненти. Такий підхід є особливо ефективним для аналізу імпульсних, періодично змінних або зашумлених сигналів. Серед різноманіття Вейвлет функцій можна виділити наступні: Morlet, cmor1, Frequency B-Spline, гаусові та комплексні гаусові, Mexican Hat. Вейвлет Морле є комплексним гармонічним сигналом, модульованим гаусовою огибаючою. Він забезпечує високу частотну роздільну здатність і добре підходить для аналізу квазіперіодичних процесів. Завдяки комплексній формі дозволяє визначати не лише амплітуду, а й фазу локальних спектральних компонент. Широко застосовується для аналізу акустичних, біомедичних та сейсмічних сигналів. Вейвлет FBSP є комплексним вейвлетом із гнучко налаштовуваною формою спектра. Його основною перевагою є можливість незалежного керування шириною частотної смуги

та центральною частотою. Це робить FBSP ефективним для аналізу вузькосмугових процесів і сигналів зі змінною частотною структурою, зокрема у задачах виявлення та класифікації подій. Вейвлет «Мексиканський капелюх» є другою похідною від гаусової функції і є дійсним симетричним вейвлетом. Він добре підходить для виявлення піків, екстремумів та локальних аномалій у сигналі. Завдяки простій формі та добрій часовій локалізації часто застосовується в сейсміці, аналізі вібрацій і задачах виявлення подій. Вейвлет Шеннона має ідеально обмежений спектр і забезпечує високу частотну селективність. Це робить його зручним для теоретичного аналізу та дослідження спектральних властивостей сигналів. Водночас він має нескінченну часову підтримку, що ускладнює практичну реалізацію та обмежує застосування в системах реального часу.

Загалом, вейвлети Morlet, c-Morlet та FBSP є найбільш придатними для детального часово-частотного аналізу, cgau та Mexican hat — для виявлення короткочасних подій і особливостей сигналу, тоді як вейвлет Шеннона переважно використовується в теоретичних дослідженнях.

Результати експериментів. Дослідження проводились з використанням різних типів звуків: міські звуки, птахи, голоси людей. Для досліджень було використано аудіозаписи, що проводились з використанням USB звукової карти U-Phoria UM2. Усі аудіозаписи були виконані з частотою дискретизації 44100Гц.

У якості апаратної платформи використовувався ПК на базі процесора і7 одинадцятого покоління з 16 логічними ядрами. Програмна реалізація обчислень виконувалась з використанням мови Python та бібліотеки librosa. Обчислення проводились з аудіо фрагментами тривалістю 372мс, що відповідає 16384 відлікам. При розрахунках Вейвлет перетворень обчислювалось 128 часових компонент, тобто розмір результуючої матриці був 128x16384. Результати вимірювання часу обчислень наведені у таблиці 1

Таблиця 1 – Результати вимірювань часу обчислень вейвлет перетворень

Фейвлет	Morlet	c-Morlet	FBSP	cgau	Mexican hat	Shennon
Час, мс	80	86	33	27	29	103

Висновки. Проведений аналіз областей використання Вейвлет перетворень та їх математичного опису дозволив сформулювати проблему реалізації таких перетворень у реальному часі. Для практичних досліджень була відібрана група Вейвлетів та проведено вимірювання часу обчислень на сучасній апаратній платформі. З отриманих даних можна зробити висновки, що найшвидше перетворення реалізується для Вейвлетів: cgau, Mexican hat, FBSP, а для Morlet, c-Morlet та Shennon час більший ніж в 3 рази. Хоча це не є критичним показником при загальному часі в 372 мс, але треба враховувати, що існує алгоритм подальшої підготовки отриманої

матриці перед подальшим розпізнаванням і необхідно витратити час на подальше розпізнавання результату Вейвлет перетворення. Отже тільки Вейвлети cgau, Mexican hat, FBSP відповідають вимогам реального часу обробки акустичних сигналів.

Список використаних джерел

1. Tiantian G., Tongpo Z., Enggee L., LÓPEZ-BENÍTEZ M., MA F., Limin Y. A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities. 2022. IEEE Access, Vol.10, P. 58869-58903
 2. Pacheco J., Benitez V.H., Pérez G., Brau A. Wavelet-Based Computational Intelligence for Real-Time Anomaly Detection and Fault Isolation in Embedded Systems. Machines. 2024. Vol.12, Iss.9. P. 664-670
- Rani M. Wavelets in artificial intelligence – a review. 2025 International Journal of Scientific Research. Vol.14, Iss.6. P.36-39

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ВБУДОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ АПАРАТОМ.

Старший викладач Галкін П.В., студент Кострикін І.А
Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
проективання та експлуатації електронних апаратів

e-mail: galkinletter@ukr.net, illia.kostrikin@nure.ua

Abstract. The rapid development of unmanned aerial vehicles has led to their widespread application in the fields of aerial photography, environmental monitoring, industrial inspection, telecommunications, and defense technologies. One of the key limiting factors in the effective use of unmanned aerial platforms remains the limited energy capacity of onboard batteries. Therefore, an is the design and investigation of an energy-efficient embedded control system for an unmanned aerial vehicle that ensures stable real-time operation, reduced power consumption, and improved overall efficiency of the flight platform. This article presents an approach to the development of such a system, analyzes its hardware–software architecture, and provides the results of an experimental evaluation of its energy performance indicators.

Ключові слова: Автономність польоту, безпілотний літальний апарат, вбудована система, керування рухом, оптимізація ресурсів.

Вступ. В епоху стрімкого розвитку вбудованих обчислювальних платформ та цифровізації інженерних рішень, одноплатні комп'ютери та мікроконтролерні системи стають ключовою основою для побудови IoT та PoT-орієнтованих систем керування [1]. Актуальним напрямом є також інтеграція апаратно-програмних стендів на базі FPGA та мікроконтролерів у навчальні лабораторії, що відповідають концепції Industry 4.0 та забезпечують підготовку фахівців до роботи з сучасними кіберфізичними системами [2]. Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено автономним вбудованим пристроям моніторингу та сповіщення з використанням бездротових технологій зв'язку, що дозволяє реалізовувати системи безпеки та контролю доступу в умовах обмежених енергетичних ресурсів [3]. Основою таких рішень є вузли бездротових сенсорних мереж, архітектура яких визначає надійність, масштабованість та енергоефективність розподілених систем збору даних [4].

Окремий клас досліджень присвячений розробці вбудованих систем керування безпілотними літальними апаратами, де особливу роль відіграють бортові обчислювальні модулі та алгоритми стабілізації і навігації автономних квадрокоптерів [5]. Для підвищення надійності таких систем широко застосовуються методи апаратно-інформаційного моделювання та hardware-in-the-loop тестування, що дозволяє перевіряти поведінку вбудованих контролерів у режимі, наближеному до реального польоту [6]. Сучасні алгоритми керування, зокрема методи ковзного режиму та їхні модифікації, демонструють можливість реалізації високоточних систем керування в реальному часі навіть на обмежених за

ресурсами вбудованих платформах [7].

Паралельно з промисловими та авіаційними застосуваннями активно розвиваються навчальні лабораторні комплекси з вбудованих систем та автоматизації, які поєднують реальне апаратне забезпечення з елементами віддаленого доступу та цифрових освітніх середовищ [8]. Практична реалізація складних алгоритмів керування на мікроконтролерах підтверджує доцільність використання таких платформ як у дослідницьких, так і в освітніх цілях. Перспективним напрямом також є створення хмарних та змішаних навчальних лабораторій для вивчення промислових контролерів і вбудованих систем, що забезпечує масштабованість, доступність та інтеграцію з сучасними інформаційними технологіями.

Основна частина. Сучасні вбудовані системи керування безпілотними апаратами являють собою складні апаратно-програмні комплекси, що поєднують мікроконтролерні платформи, сенсорні модулі, виконавчі механізми та алгоритми керування реального часу. Зростання обчислювальної складності алгоритмів стабілізації, навігації та адаптивного керування призводить до підвищення енергоспоживання бортової електроніки, що робить задачу енергоефективності однією з пріоритетних при проектуванні таких систем. Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розробка та дослідження енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним апаратом.

Архітектура енергоефективної вбудованої системи керування БПЛА

Базовим елементом архітектури є бортовий обчислювальний модуль, побудований на основі енергоефективного мікроконтролера або однокристальної системи, що підтримує апаратні засоби прискорення обчислень, багаторівневу систему переривань та режими зниженого енергоспоживання. Важливу роль у структурі системи відіграє сенсорний рівень, який включає інерціальні вимірювальні модулі, датчики висоти, навігаційні приймачі та інші допоміжні сенсори. Архітектура передбачає оптимізовану схему збору та попередньої обробки сенсорних даних з мінімізацією кількості обчислювальних операцій та передач даних між модулями. Для зниження енергоспоживання застосовуються адаптивні режими опитування сенсорів, за яких частота вимірювань змінюється залежно від режиму польоту та динаміки руху безпілотного апарата.

Підсистема керування виконавчими механізмами інтегрована в загальну архітектуру таким чином, щоб забезпечити мінімальні затримки формування керуючих сигналів. Архітектурні рішення передбачають апаратну підтримку генерації сигналів керування та розподіл обчислювальних задач між ядрами або периферійними модулями, що дозволяє зменшити навантаження на центральний процесор. Це, у свою чергу, створює умови для переходу обчислювального модуля в

енергозберігаючі режими між циклами керування.

У цілому запропонована архітектура (рис. 1.1) базується на принципах ієрархічної організації, модульності та адаптивного керування ресурсами. Поєднання оптимізованих апаратних рішень і енергоорієнтованих програмних механізмів створює передумови для підвищення автономності безпілотного апарата без зниження якості керування та надійності функціонування системи.



Рисунок 1.1 – Блок-схема архітектури енергоефективної вбудованої системи керування БПЛА

Алгоритми керування та методи зниження енергоспоживання

Алгоритмічне забезпечення енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним літальним апаратом орієнтоване на забезпечення стабільності польоту та точності керування за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів. Зниження енергоспоживання досягається шляхом комплексного застосування програмних і апаратних методів енергоменеджменту. У програмному забезпеченні реалізуються механізми пріоритетного планування задач та подієво-орієнтованої обробки даних, що дозволяє переводити обчислювальні та периферійні модулі в режими зниженого споживання між циклами активної роботи. Додатково застосовується адаптивне керування живленням сенсорів і комунікаційних інтерфейсів, за якого їх активація здійснюється лише за необхідності. Поєднання оптимізованих алгоритмів керування з динамічним керуванням енергетичними режимами забезпечує зменшення сумарного енергоспоживання системи та підвищення автономності безпілотного апарата при збереженні стабільності й надійності його функціонування.

Висновки. У статті розглянуто підхід до побудови енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним літальним апаратом, орієнтований на роботу в реальному часі за умов обмежених енергетичних ресурсів. Запропонована апаратно-програмна архітектура та алгоритмічні

рішення забезпечують зниження енергоспоживання без погіршення стабільності й якості керування. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних режимів роботи та механізмів енергоменеджменту для підвищення автономності та ефективності експлуатації БПЛА.

Список використаних джерел.

1. Galkin P., Golovkina L., Klyuchnyk I. Analysis of single-board computers for IoT and IIoT solutions in embedded control systems //2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2018. – С. 297-302.

2. Galkin P., Umiarov R., Grigorieva O. Design embedded system testbench based on FPGA and microcontrollers for TATU smart lab as education component of industry 4.0 //2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – С. 628-633.

3. Феденко В. В. Автономний GSM-пристрій сповіщень для моніторингу з функцією виявлення несанкціонованого доступу : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 171 – електроніка / наук. кер. І. А. Кулик. Суми : Сумський державний університет, 2025. 40 с.

4 Ivan Buhrym, Oleksandr Vynokurov, Pavlo Galkin. Approaches to Designing a Wireless Sensor Network Node // First International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2019, Kharkiv, Ukraine, July 26-27, 2019. – Kharkiv: NURE, MC&FPGA, 2019. – P. 21-24. DOI: 10.35598/mcfpga.2019.007

5. S. Madruga, A. Tavares, A. Brito and T. Nascimento, "A Project of an Embedded Control System for Autonomous Quadrotor UAVs," 2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE), João Pessoa, Brazil, 2018, pp. 483-489, doi: 10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00091.

6. L. Kis, G. Regula and B. Lantos, "Design and hardware-in-the-loop test of the embedded control system of an indoor quadrotor helicopter," 2008 International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, Regensburg, Germany, 2008, pp. 1-10, doi: 10.1109/WISES.2008.4623300.

7. A. R. Firdaus and M. O. Tokhi, "Real-time embedded system of super twisting-based integral sliding mode control for quadcopter UAV," 2019 2nd International Conference on Applied Engineering (ICAE), Batam, Indonesia, 2019, pp. 1-7.

8. Галкін П. В. Розробка лабораторного комплексу по вивченню вбудованих систем управління і промислової автоматизації // Матеріали 21-го Міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті", 25-27 квітня 2017 р. [Текст] : [збірник] / П.В. Галкін //: Т. 2.- Харків: ХНУРЕ.- С.94-95.

ІНТЕГРАЦІЯ FANET З ПРОМИСЛОВИМИ ІОТ-МЕРЕЖАМИ

Старший викладач Галкін П.В., студент Скребцов В.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
проектування та експлуатації електронних апаратів

e-mail: galkinletter@ukr.net, vadym.skrebtsov@nure.ua

Abstract. The object of the research is the process of integrating flying ad-hoc sensor networks with industrial IoT networks for monitoring tasks and the creation of a digital twin of the production environment. The subject of the research includes data collection, routing, and processing methods in hybrid FANET–IoT networks, as well as their impact on digital twin accuracy and quality of service indicators. The aim of the work is to improve the efficiency of industrial environment monitoring by developing and investigating models for integrating FANET with industrial IoT networks, as well as reducing the digital twin error through the selection and optimization of routing and data collection algorithms.

Ключові слова: FANET, IoT, IIoT, , бездротова сенсорна мережа, маршрутизація, кластеризація, цифровий двійник

Вступ. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості для побудови інтелектуальних систем моніторингу у промисловості. Традиційні стаціонарні сенсорні мережі, що широко застосовуються на підприємствах, мають низку обмежень, пов'язаних із необхідністю фізичної інфраструктури, складністю обслуговування та недостатнім охопленням важкодоступних або небезпечних зон. У свою чергу, використання групи кооперативних БПЛА як мобільних сенсорних вузлів формує нову парадигму збору даних — літаючі сенсорні мережі (FANET), здатні забезпечити гнучкість, адаптивність та високу просторову роздільну здатність моніторингу.

FANET – це основна мережева парадигма для підключення кількох БПЛА в повітрі. Протокол маршрутизації для FANET [1] повинен бути стійким до збільшення динаміки вузлів, щоб він міг досягати хорошої продуктивності навіть у високошвидкісних середовищах.

У технічній документації Nordic Semiconductor на трансивер nRF24L01+ [2] наведено основні параметри радіомодуля, зокрема режими енергоспоживання, швидкості передавання та особливості роботи у діапазоні 2,4 ГГц, що дозволяє обґрунтувати вибір апаратної платформи сенсорного вузла та коректно оцінювати енергетичні витрати при моделюванні бездротового каналу.

У статті [3] досліджено швидкісні характеристики промислових мереж RS-485 і PROFIBUS, що дозволяє враховувати обмеження каналу зв'язку при розробці протоколу передачі в енергообмежених умовах. Публікація [4] присвячена методам обробки інформаційних потоків у системах ППО, що виявляє паралелі з багатопоточним збором даних у

сенсорних мережах з кластерною структурою. У роботі [5] розглянуто програмну реалізацію систем керування в авіоніці, де важливе місце займають питання обмеженого ресурсу енергії, аналогічно задачам у WSN.

Дослідження [6] висвітлює підходи до побудови вбудованих систем управління авіоніки, що формує базу для розробки енергоефективних вузлів сенсорних мереж. У роботі наведено моделі систем управління, які можуть бути адаптовані для задач керування інформаційними потоками та маршрутизації у розподілених бездротових мережах з обмеженим енергоресурсом.

У публікації запропоновано багатокритеріальний підхід до вибору проектних рішень, що може бути використаний для кластерного вибору головного вузла або маршруту передавання з урахуванням залишкової енергії, якості каналу та навантаження. Робота присвячена математичним методам відновлення даних, які можуть застосовуватись у бездротових мережах при передачі інформації в умовах завад з метою зменшення кількості повторних передач і відповідного зниження енергоспоживання.

В останні роки, зі зростанням популярності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), системи на базі БПЛА стали популярними як у військових, так і в цивільних застосуваннях.

Інтеграція FANET з промисловими IoT-мережами створює можливість формування єдиного інформаційного середовища підприємства, де дані від мобільних і стаціонарних сенсорів об'єднуються для підтримки процесів автоматизації, діагностики та прогнозного обслуговування.

Основна частина. Наукова новизна полягає у формуванні узагальненої архітектури інтеграції FANET з промисловими IoT-мережами, що забезпечує зниження затримок, підвищення надійності передачі даних та узгодження інформаційних потоків для цифрових двійників. Запропонований метод маршрутизації враховує мобільність UAV, обмежені енергетичні ресурси та вимоги до QoS у промислових застосуваннях.

Практичне значення результатів роботи визначається можливістю застосування отриманих рішень для побудови гнучких систем моніторингу на промислових підприємствах, у сфері енергетики, логістики, охорони критичної інфраструктури та автоматизації виробничих процесів. Реалізація інтеграції FANET та IIoT дає змогу значно розширити функціональні можливості цифрових двійників та підвищити рівень безпеки та ефективності роботи підприємства.

Модель даних FANET-вузла

Модель даних FANET-вузла (рис. 1.1) являє собою багаторівневу структуру, побудовану таким чином, щоб відобразити усі аспекти функціонування мобільного сенсорного елемента у динамічній промисловій мережі. Вона повинна поєднувати кількісні вимірювання з

бортових датчиків, інформацію про положення та рух безпілотного апарата, характеристики стану мережевих інтерфейсів, семантичний опис отриманих даних та енергетичні параметри, що визначають можливість подальшого використання вузла у складі FANET. Такий підхід дозволяє забезпечити повноцінну взаємодію між мобільними сенсорними платформами та промисловими IoT-системами, зокрема цифровими двійниками виробничих процесів.

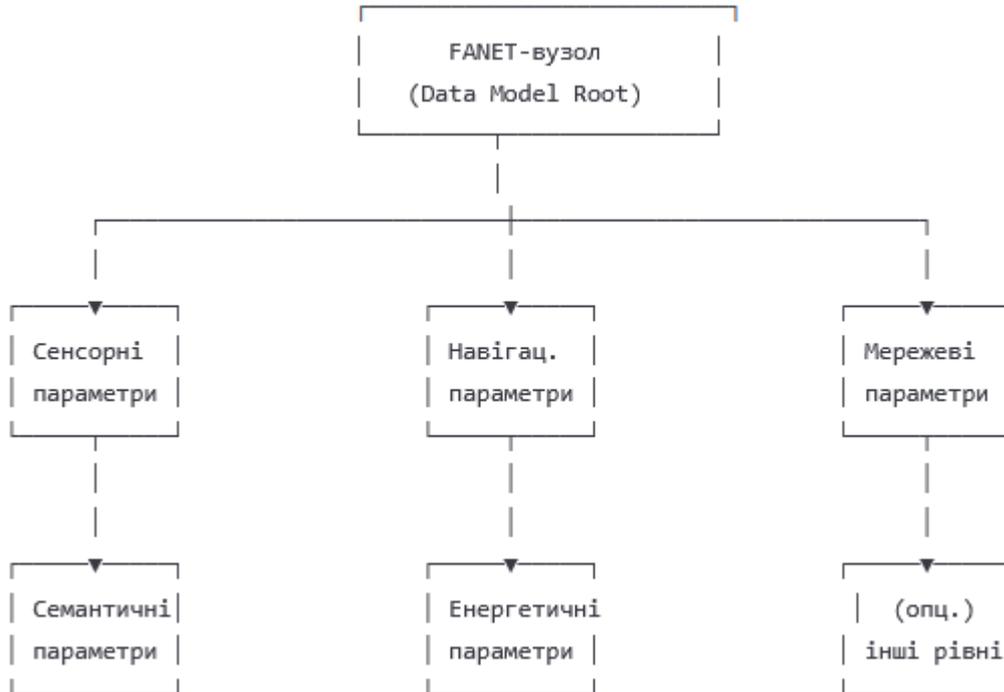


Рисунок 1.1 – Модель даних FANET-вузла

Модифікований алгоритм енергоефективної маршрутизації для FANET

Енергоефективність є одним із ключових критеріїв побудови маршрутів у FANET. Традиційні алгоритми маршрутизації, такі як AODV, DSR чи GPSR, не враховують критичний вплив запасу енергії UAV та динамічні зміни топології, що може призводити до створення маршрутів через вузли, які мають низький заряд акумулятора або швидко змінюють позицію. Це знижує загальну живучість FANET та збільшує кількість переналаштувань маршрутів. Тому виникає потреба у модифікованому алгоритмі, здатному одночасно враховувати енергетичні параметри, якість каналу та прогноз мобільності вузлів.

Запропонований алгоритм ґрунтується на поєднанні ідей позиційної маршрутизації та енергоадаптивної метрики:

$$LEP = w_1 \cdot \frac{E}{E_{\max}} + w_2 \cdot \frac{Q}{Q_{\max}} + w_3 \cdot (1 - M_r) \quad (1.1)$$

У рамках алгоритму використовується адаптивна метрика LEP (Link Energy Probability) (1.1), що оцінює ймовірність збереження працездатності каналу впродовж часу маршруту. Метрика включає в себе нормалізоване

значення енергії вузла, швидкість його переміщення відносно попереднього хопу та якість сигналу. Якщо хоча б один із параметрів виходить за межі порогу, лінк вважається нестабільним і виключається з набору кандидатів. Таким чином, FANET уникає використання «енергетично слабких» вузлів.

Висновки. У цілому результати роботи підтверджують, що інтеграція літаючих сенсорних мереж з промисловими IoT-інфраструктурами є перспективним напрямом розвитку систем моніторингу та цифрових двійників. Запропоновані моделі та алгоритми можуть бути використані при проектуванні інтелектуальних виробничих систем, а також слугувати основою для подальших наукових досліджень у галузі FANET, ПоТ та кіберфізичних систем

Список використаних джерел.

1. W. J. Lau, J. M. -Y. Lim, C. Y. Chong, H. N. Shen and T. W. Min Ooi, "AQR-FANET: An Anticipatory Q-Learning-based Routing Protocol for FANETs," 2023 IEEE 16th Malaysia International Conference on Communication (MICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 6-11, doi: 10.1109/MICC59384.2023.10419483.

2. Datasheet: nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver // Nordic Semiconductor. Rev. 1.0. 2022. [Electronic resource]. Available: <https://www.nordicsemi.com>

3. Galkin P. V., Gavrilenko V. V., Monko A. I. Issledovanie dalnosti i skorosti peredachi dannyih po vitoy pare v promyshlennyih setyah RS-485 i PROFIBUS [Investigation of the range and speed of data transmission over twisted pair in industrial networks RS-485 and PROFIBUS] // Problemyi telekommunikatsiy [Problems of telecommunications]. – 2016. – №. 2. – С. 94-110.

4. Галкін П. В., Коваленко С. П., Леушин С. Г. Метод автоматизованої обробки інформації на пунктах управління ппо св при паралельних і послідовних потоках інформації //-Збірник наук. - Товариство з обмеженою відповідальністю "Науковий світ", 2007. - Т. 4. - №. 4. - С. 71-72.

5. Галкін П. В. Розробка прогманого забезпечення систем управління авіоніки / П. В. Галкін // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 24 Міжнар. молодіж. форуму, 7-9 кв. 2020р. - Харків: ХНУРЕ, 2020. - Т. 2. - С. 132-133.

6. Галкін П. В. Вбудовані системи управління авіоніки / П. В. Галкін // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 23 Міжнар. молодіж. форуму, 16–18 квітня 2019р. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – Т. 2. – С. 78–79.

РОЗРОБКА ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ВУЗЛІВ-ЗБИРАЧІВ ДАНИХ В ЛІТАЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Старший викладач Галкін П.В., студент Харитюк М.А
Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
проектування та експлуатації електронних апаратів
e-mail: galkinletter@ukr.net, mykyta.kharytiuk@nure.ua

Abstract. The rapid development of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks has led to the emergence of flying sensor networks, where mobile data collection nodes play a key role in data acquisition and transmission. The scientific novelty of this work lies in the development of a routing approach for FANET that accounts for dynamic topology changes, node mobility, and limited energy resources, enabling adaptive route selection based on node position and trajectory to improve data delivery reliability.

The practical significance of the work is demonstrated by the applicability of the proposed routing protocols to the design of flying sensor network-based data collection systems for monitoring, inspection, and telecommunications applications, with implementation on modern embedded UAV platforms and integration into existing IoT/IIoT infrastructures, as well as use in educational and research laboratories.

Ключові слова: FANET, IoT, IIoT, бездротова сенсорна мережа, вузли-збирачі, літаюча сенсорна мережа

Вступ. Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів та бездротових сенсорних мереж зумовив формування нового класу розподілених систем – літаючих сенсорних мереж, у яких мобільні вузли-збирачі даних відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного збору та передачі інформації. На відміну від класичних стаціонарних сенсорних мереж, такі системи характеризуються високою динамічністю топології, обмеженими енергетичними ресурсами та змінними умовами радіозв'язку, що істотно ускладнює процес маршрутизації даних. У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є розробка спеціалізованих протоколів маршрутизації, адаптованих до мобільності вузлів-збирачів, які забезпечують надійність передачі, енергоефективність та масштабованість літаючих сенсорних мереж.

FANET є базовою мережевою парадигмою для організації взаємодії кількох безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі, що забезпечує мобільний та гнучкий збір і передачу даних у розподілених системах моніторингу. Методи збору даних у бездротових сенсорних мережах із використанням літаючих ad hoc мереж [1] демонструють необхідність застосування спеціалізованих протоколів маршрутизації, здатних адаптуватися до швидких змін топології та високої мобільності вузлів. Моделі взаємодії літаючих бездротових сенсорних мереж із системами авіоніки [2] підтверджують доцільність інтеграції FANET із

бортовими обчислювальними та навігаційними підсистемами БПЛА, що накладає додаткові вимоги до надійності та затримок передачі даних. Просторова організація та визначення координат вузлів у бездротових сенсорних мережах [3] відіграють ключову роль у побудові ефективних маршрутів передачі інформації, особливо в умовах рухомих вузлів-збирачів даних.

Апаратна реалізація протоколів маршрутизації в FANET значною мірою залежить від обчислювальних можливостей і енергоспоживання бортових платформ, що обґрунтовується результатами аналізу одноплатних комп'ютерів для IoT та IIoT-застосувань [4]. Точність сенсорів і процеси злиття даних безпосередньо впливають на якість локалізації у FANET, що підтверджується дослідженнями похибок сенсорних систем у літаючих мережах [5].

Огляд сучасних архітектур, сценаріїв застосування та засобів моделювання FANET свідчить про актуальність задачі розробки адаптивних протоколів маршрутизації для мобільних вузлів. Методи керування потужністю та планування траєкторії БПЛА з урахуванням завад у бездротових сенсорних мережах додатково підкреслюють взаємозв'язок між енергетичною ефективністю, мобільністю вузлів і продуктивністю протоколів маршрутизації.

Висока динамічність топології, обмежені енергетичні ресурси та змінні умови радіозв'язку істотно ускладнюють процес передачі даних у таких мережах. У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є розробка протоколів маршрутизації, адаптованих до мобільності вузлів-збирачів, які забезпечують надійність, енергоефективність та масштабованість літаючих сенсорних мереж.

Основна частина. Наукова новизна роботи полягає у розробці підходу до маршрутизації даних у літаючих сенсорних мережах з використанням мобільних вузлів-збирачів, що враховує динамічну зміну топології, мобільність безпілотних платформ та обмежені енергетичні ресурси вузлів. Запропоновано принципи адаптації маршрутів передачі даних залежно від просторового розташування та траєкторії руху мобільних вузлів, що дозволяє підвищити надійність доставки інформації. Отримано нові результати щодо впливу мобільності вузлів-збирачів на ефективність маршрутизації в FANET.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованих протоколів маршрутизації при проектуванні систем збору даних на основі літаючих сенсорних мереж для задач моніторингу, інспекції та телекомунікацій. Розроблені рішення можуть бути реалізовані на сучасних вбудованих платформах безпілотних апаратів та інтегровані з існуючими IoT/IIoT-інфраструктурами. Отримані результати можуть бути використані у навчальних і дослідницьких лабораторіях, а також при створенні прототипів систем із мобільними вузлами-збирачами даних.

Модель літаючої сенсорної мережі та особливості мобільних вузлів-збирачів даних. Літаюча сенсорна мережа є різновидом бездротової сенсорної мережі, у якій функції вузлів зв'язку та збору даних частково або повністю виконуються безпілотними літальними апаратами. Така мережа характеризується динамічною топологією, що постійно змінюється внаслідок руху повітряних платформ, а також значною залежністю якості зв'язку від просторового розташування вузлів і умов поширення радіосигналів. Мобільні вузли-збирачі даних відіграють ключову роль у підвищенні ефективності збору інформації в літаючих сенсорних мережах, оскільки вони дозволяють зменшити кількість багатохопових передач і скоротити енергетичні витрати стаціонарних сенсорних вузлів. Переміщення таких вузлів може бути задане наперед визначеними маршрутами або адаптивно змінюватися залежно від розподілу сенсорних вузлів і поточного стану мережі. Важливою особливістю мобільних вузлів-збирачів є жорсткі обмеження за енергоспоживанням, обчислювальними ресурсами та масо-габаритними характеристиками бортового обладнання. Таким чином, модель літаючої сенсорної мережі з мобільними вузлами-збирачами (рис. 1.1) даних повинна враховувати просторово-часові характеристики руху безпілотних апаратів, обмеження радіоканалу та енергетичні можливості вузлів. Комплексний облік цих факторів є необхідною передумовою для розробки ефективних протоколів маршрутизації, здатних забезпечити надійний та енергоефективний збір даних у динамічних умовах функціонування літаючих сенсорних мереж.

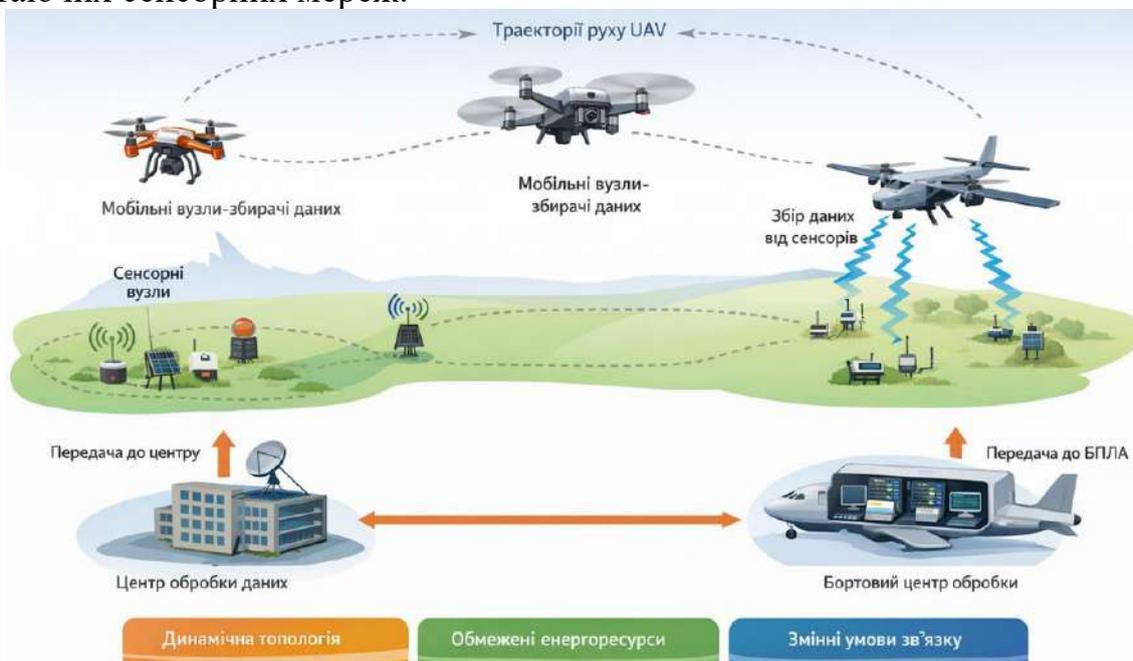


Рисунок 1.1 – Модель літаючої сенсорної мережі з мобільними вузлами-збирачами

Проектування та оцінка ефективності протоколів маршрутизації для FANET. Проектування протоколів маршрутизації для FANET з

мобільними вузлами-збирачами даних ґрунтується на врахуванні високої динамічності топології, обмеженого часу існування радіолінків та енергетичних обмежень як сенсорних вузлів, так і бортових платформ. У межах розробки визначаються критерії вибору маршрутів з урахуванням просторового розташування вузлів, прогнозованої траєкторії руху БПЛА, якості каналу (RSSI/SNR), рівня залишкової енергії та очікуваних затримок доставки. Оцінка ефективності запропонованих рішень виконується шляхом моделювання або експериментальних випробувань із розрахунком показників надійності доставки (PDR), середньої затримки, пропускну здатності та енергетичних витрат на пакет, що дозволяє обґрунтувати переваги протоколу в різних сценаріях мобільності та щільності мережі.

Висновки. У роботі розроблено підхід до проектування протоколів маршрутизації для літаючих сенсорних мереж з мобільними вузлами-збирачами даних, який враховує динамічну зміну топології та енергетичні обмеження вузлів. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень за показниками надійності доставки даних та енергоефективності в умовах високої мобільності FANET.

Список використаних джерел.

1. V. Tkachov, V. Tokariev, Y. Dukh and V. Volotka, "Method of Data Collection in Wireless Sensor Networks Using Flying Ad Hoc Network," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 197-201, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632048.

2. Галкін П. В., Головкіна Л. В. Моделі взаємодії літаючих бездротових сенсорних мереж з системами авіоніки //Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези. – 2016. – С. 78.

3. Галкін П. В. Модель визначення координат вузлів бездротової сенсорної мережі для реалізації концепції інтернету речей // зб. матер. фор. / П.В. Галкін // 20-й Ювілейний Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті.- Т. 3.- Харків: ХНУРЕ.- С.118-119.

4. P. Galkin, L. Golovkina and I. Klyuchnyk, "Analysis of Single-Board Computers for IoT and IIoT Solutions in Embedded Control Systems," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 297-302, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632069.

5. L. Chaibi, B. El Graini, M. Sebgui and S. Bah, "An accuracy Review of Sensors used in Data Fusion process for Flying Ad Hoc Networks (FANETs) Localization," 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), Kenitra, Morocco, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314576.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

В	
Bondarenko I.	
Boykov D.	
Г	
Goseva M.	
К	
Karnaushenko V.	
М	
Mihaylov M.	
Р	
Rashchenko O.	
С	
Sierikov A.	
У	
Vorgul O.	
В	
Волох А.В.	
Воргуль О.В.	
Г	
Галат О.Б.	
Галкін П.В.	
Головатенко С.В.	
Грицунов О.В.	
Д	
Дмитрук С.С.	
З	
Зубков О.В.	

К	
Кавецький В.В.	
Кострикін І.А.	
Л	
Лашко Е.І.	
М	
Мартинюк В.В.	
Н	
Нечай Ю.І.	
О	
Оніщенко А.В.	
П	
Павленко Т.І.	
Патров Д.О.	
Певцова М.О.	
Пятайкіна М.І.	
С	
Свид І.В.	
Сербський Г.О.	
Скребцов В.В.	
Стаднік Д.В.	
Стрілкова Т. О.	
Т	
Ткачов Д.В.	
Х	
Харитюк М.А.	

Ш	
Шевченко М.С.	
Шутєєв Н. В.	

ЗМІСТ

Воргуль О.В., Оніщенко А. <i>Технологія OFDM: від теоретичних основ до серця 5G</i>	4
Воргуль О.В., Сербський Г. <i>Динамічна часткова реконфігурація в сучасних ПЛІС: технології та застосування</i>	7
Vorgul O., Sierikov A. <i>Comparative analysis of fpga and microcontroller architectures for real-time filtering in airspace surveillance systems</i>	10
Волох А.В. <i>дослідження методів поліпшення енергоефективності роботи мікроконтролерів</i>	13
Ткачов Д.В., Зубков О.В. <i>Дослідження ефективності реалізації обчислення MFCC коефіцієнтів на апаратній платформі STM32</i>	17
Bondarenko I., Karнаushenko V., Shcherban I. <i>Hardware assist verification</i>	21
Bondarenko I., Karнаushenko V., Pashchenko O. <i>Artificial intelligence and digital twins</i>	25
Boykov D. <i>Project management as a strategic instrument for organizational performance and innovation</i>	29
Goceva M. <i>AI-enhanced communication management in the educational process</i>	33
Mihaylov M. <i>Cloud technologies as a tool for optimizing business processes</i>	37
Boykov V. <i>Manipulative communication in personal relationships: psychological mechanisms, ethical implications and strategies for resistance</i>	41
Павленко Т.І. <i>Адаптивні НМІ для інклюзивного виробничого середовища (INDUSTRY 4.0 ТА ІІоТ)</i>	45

Головатенко С.В., Стрілкова Т. О. <i>Моделювання реєстрації оптичного випромінювання в системах оптичної локації з урахуванням умов спостереження</i>	50
Стрілкова Т.О., Грицунов О.В., Кавецький В.В., Шевченко М.С. <i>Розробка автоматизованої інформаційної системи контролю якості життя</i>	54
Стрілкова Т.О., Пятайкіна М.І., Дмитрук С.С., Певцова М.О. <i>Інформаційна система моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання</i>	58
Стрілкова Т.О., Пятайкіна М.І., Патров Д.О., Селіванов С.І. <i>Розробка методів контролю якості металевих поверхонь для систем технічного зору</i>	62
Галат О.Б., Стаднік Д.В., Лашко Е.І. <i>Адаптивний оптичний сенсор на планарному хвилеводі для системи екологічного моніторингу</i>	66
Шутєєв Н. В., Галат О.Б. <i>Розширене фізичне моделювання фотоелектричних панелей для підвищення їх тривалої продуктивності</i>	70
Нечай Ю.І., Мартинюк В.В., Свид І.В. <i>Аналіз методів і засобів контролю температурних режимів у комп'ютерних системах</i>	74
Мартинюк В.В., Нечай Ю.І., Свид І.В. <i>Сучасні тенденції розвитку мікропроцесорної техніки: перспективи та інноваційні підхід</i>	77
Сербський Г.О., Зубков О.В. <i>Аналіз вимог до датчиків виявлення вібрацій від рухомих об'єктів у поверхні землі</i>	81
Онiщенко А.В., Зубков О.В. <i>Аналіз можливості реалізації вейвлет перетворень на сучасних апаратних платформах у реальному часі</i>	84
Кострикін І.А. Галкін П.В. <i>Енергоєфективна вбудована система керування безпілотним апаратом.</i>	88
Скребцов В.В. Галкін П.В. <i>Інтеграція FANET з промисловими ІоТ-мережами</i>	92

Харитюк М.А. Галкін П.В Розробка протоколів маршрутизації для мобільних вузлів-збирачів даних в літаючих сенсорних мережа 96

МАТЕРІАЛИ

VII ФОРУМУ

«Автоматизація, електроніка та робототехніка.
Стратегії розвитку та інноваційні технології»
AERT-2025

Відповідальний за випуск:

Зубков О.В.

Комп'ютерна верстка

Зубков О.В.

Матеріали збірника публікуються в авторському варіанті
без редагування

ХНУРЕ 61166, Харків, просп. Науки, 14

Тел. +38 (057) 755 0220, e-mail: zubkov.oleh@nure.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ХНУРЕ : Серія ДК № 7529 від 03.12.2021 р.
