**ІНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ
МНО АЗЕРБАЙДЖАНСЬКОЇ РЕСПУБЛІКИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ"**

УНІВЕРСИТЕТ МІСТА ЖИЛІНА

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ

Тези доповідей шістнадцятої міжнародної

науково-технічної конференції

29 – 30 квітня 2026 року

Том 1: секції 1, 5

Баку – Харків – Жиліна – 2026

УДК 004/681.3 doi: https://doi.org/10.32620/ICT.26.t1

У збірнику подано тези доповідей шістнадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління". Розглянуті питання за такими напрямами: теоретичні та прикладні аспекти систем прийняття рішень, оптимізації та управління системами і процесами; комп'ютерні методи та засоби інформаційно-комунікаційних технологій та управління; безпека функціонування комп'ютерних систем та мереж; інформаційні технології у цивільній безпеці; сучасні інформаційно-вимірювальні системи; інформаційні технології у цивільній безпеці.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Співголови оргкомітету

ГАШИМОВ Ельшан Гіяс огли (*д.н.б.&в.н., проф., ІМ АР, Баку, Азербайджан*);
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович (*д.т.н., проф., ХНУРЕ, Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович (*д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Україна*);
ЛЕВАШЕНКО Віталій (*к.т.н., проф., Ун-т міста Жиліна, Жиліна, Словаччина*);
ФЕДОРОВИЧ Олег Євгенович (*д.т.н., проф., НАУ «ХАІ», Харків, Україна*).

Члени оргкомітету

ГЛАВЧЕВ Максим Ігорович (*к.е.н., доц., НТУ «ХПІ», Харків, Україна*);
ГЛИВА Валентин Анатолійович (*д.т.н., проф., КНУБА, Київ, Україна*);
ДОРОНІН Євген Володимирович (*к.т.н., доц., НУ «КАІ», Київ, Україна*);
ЗАЙЦЕВА Єлєна (*к.т.н., проф., Ун-т міста Жиліна, Жиліна, Словаччина*);
КАЛІНІН Євгеній Іванович (*д.т.н., проф., НУ БрПкУ, Київ, Україна*);
КАРПІНСЬКІ Міколай (*д.н., проф., Університет Бельсько-Бяла, Польща*);
КОЛОМІЙЦЕВ Олексій Володимирович (*д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Україна*);
КОСЕНКО Віктор Васильович (*д.т.н., проф., НУ «ПП», Полтава, Україна*);
ЛЕВЧЕНКО Лариса Олексіївна (*д.т.н., проф., НТУУ «КПІ», Київ, Україна*);
ЛЕЩЕНКО Олександр Борисович (*к.т.н., проф., НАУ «ХАІ». Харків, Україна*);
МОЖАЄВ Олександр Олександрович (*д.т.н., проф., ХНУВС, Харків, Україна*);
ПОДОРОЖНЯК Андрій Олексійович (*к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Харків, Україна*);
РОМАНЕНКОВ Юрій Олександрович (*д.т.н., проф., ХНУРЕ, Харків, Україна*);
РУБАН Ігор Вікторович (*д.т.н., проф., ХНУРЕ, Харків, Україна*);
СЄВЄРІНОВ Олександр Васильович (*к.т.н., доц., ХНУРЕ, Харків, Україна*);
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович (*д.т.н., проф.,УКНО, Краків, Польща*);
СМІРНОВ Олександр Анатолйович (*д.т.н., проф., ЦНТУ, Кропивницький, Україна*);
ТРЕТЬЯКОВ Олег Вальтерович (*д.т.н., проф., НУ «КАІ», Київ, Україна*);
ШЕФЕР Олександр Віталійович (*д.т.н., проф., НУ «ПП», Полтава, Україна*).

Секретаріат оргкомітету

КУЧУК Ніна Георгіївна (*д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Україна*);
ЛЯШЕНКО Олексій Сергійович (*к.т.н., доц., ХНУРЕ, Харків, Україна*).

© ІМ АР, НТУ "ХПІ", ХНУРЕ, НАУ «ХАІ», УмЖ, 2026

INSTITUTE OF MATHEMATICS
OF THE MINISTRY OF SCIENCE AND EDUCATION
OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE

KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY
OF RADIO ELECTRONICS

NATIONAL AEROSPACE UNIVERSITY
KHARKIV AVIATION INSTITUTE

UNIVERSITY OF ŽILINA

CURRENT DIRECTIONS IN THE DEVELOPMENT OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND CONTROL TOOLS

Proceedings of 16-th International

Scientific and Technical Conference

April 29 – 30, 2026

Volume 1: sections 1, 5

Baku – Kharkiv – Žilina – 2026

UDC 004/681.3 doi: https://doi.org/10.32620/ICT.26.t1

Abstracts of reports of the 16-th international scientific and technical conference "Current directions of development of information and communication technologies and control tools" are presented in the collection. Considered issues in the following directions: theoretical and applied aspects of decision-making systems, optimization and control of systems and processes; computer methods and means of information and communication technologies and management; security of functioning of computer systems and networks; information technologies in civil security; modern information and measurement systems; information technologies in civil security.

ORGANIZING COMMITTEE

Co-chairs of the organizing committee:

Elshan Giyas oglu HASHIMOV (Dr. Nat. security and mil. sc., Baku, Azerbaijan);
Andriy KOVALENKO (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Heorhii KUCHUK (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Vitaly LEVASHENKO (Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia);
Oleg FEDOROVICH (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine).

Members of the organizing committee:

Maksym HLAVCHEV (PhD (Усоп.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine);
Valentyn GLYVA (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine)
Yevhen DORONIN (*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Elena ZAITSEVA (Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia);
Yevhen KALININ (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine);
Mikolay KARPINSKI (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biala, Poland);
Oleksii KOLOMIITSEV (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Viktor KOSENKO (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine)
Larysa LEVCHENKO (Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine);
Oleksandr LESHCHENKO (PhD (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Oleksandr MOZHAIEV (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Andrii PODOROZHNIAK (PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine);
Yuri ROMANENKOV (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Igor RUBAN (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Oleksandr SIEVIERINOV (PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine);
Serhii SEMENOV (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Krakow, Poland);
Oleksii SMIRNOV (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine);
Oleg TRETYAKOV (*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Oleksandr SHEFER (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine).

Secretariat of the organizing committee:

Nina KUCHUK (Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine);
Oleksii LIASHENKO (PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine).

Шістнадцята міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління” проводиться 29 та 30 квітня 2026 року в режимі ONLINE. Тези доповідей доступні в INTERNET.

Том 1 (Volume 1)

Секція 1. Теоретичні та прикладні аспекти прийняття рішень, оптимізації та управління системами і процесами

Section 1. Theoretical and Applied Aspects of Decision-Making, Optimization, and Systems and Process Management

Секція 5. Сучасні інформаційно-вимірювальні системи

Section 5. Modern Information and Measurement Systems

Том 2 (Volume 2)

Секція 2. Комп’ютерні методи і засоби інформаційно-комунікаційних технологій та управління

Section 2. Computer Methods and Tools of Information and Communication Technologies and Management

Том 3 (Volume 3)

Секція 3. Методи швидкої та достовірної обробки даних в комп’ютерних системах та мережах

Section 3. Methods for Rapid and Reliable Data Processing in Computer Systems and Networks

Секція 4. Безпека функціонування комп’ютерних систем та мереж

Section 4. Security of Computer Systems and Networks Operation

Том 4 (Volume 4)

Секція 6. Інформаційні технології у цивільній безпеці

Section 6. Information Technologies in Civil Security

СЕКЦІЯ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ОПТИМІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ І ПРОЦЕСАМИ

Керівниця секції: д.т.н., проф. Н. Г. Кучук, НТУ «ХПІ», Харків
Секретар секції: к.т.н., доц. С. С. Бульба, НТУ «ХПІ», Харків

A COMPONENT-BASED ARCHITECTURAL MODEL OF THE DESIGN PROCESS FOR HIGH-TECH PRODUCTS

Fedorovich O., Lutai L.
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

In modern approaches to the creation of complex technical systems, there is a trend towards shortening product development times [1] and, consequently, towards shortening the product lifecycle. This situation is particularly relevant for high-tech military products [2]. The design stage of the life cycle is one of the most important components of product creation [3]. The design task involves resolving a multitude of conflicting requirements and is aimed at creating the architecture of a new complex product [4, 5]. When creating new models of technology-intensive equipment, many developers intuitively draw on the experience of past projects as tried-and-tested design solutions. Drawing on positive experience reduces financial costs and shortens design times. However, new products present new functional requirements that cannot always be met using off-the-shelf solutions. The completion time of the entire project largely depends on the implementation times of new components.

This paper demonstrates the need to utilise formalised experience from past developments in the early stages of creating a new technical system. Through decomposition, a complex object is broken down into smaller parts in order to obtain the architecture of the new product. Experience from past developments may be represented by successful projects that have already been implemented, information on which is available to the project organisation. Completed projects are also subject to decomposition to obtain ready-made reusable components (RCs). Given that the process under consideration involves the creation of high-tech products, the architecture of which has a hierarchical structure, RC options must be selected at specific levels of product detail.

The aim of this paper is to develop an optimisation-based, component-oriented model for the design of knowledge-intensive product architecture.

The report outlines the stages of the proposed optimisation-based, component-oriented model for the development of high-tech product architecture [6]. Within the framework of the developed model, an approach is presented for the optimal selection of key components at various levels of decomposition. Complex ‘old’ and ‘new’

components, as well as their subcomponents located at a lower level of decomposition, can be used as RCs. The selection of CPVs that can be used when creating a new complex product is carried out at various levels of the product architecture, from the top to the bottom level. Accordingly, a set of alternative RCs is formed for each level of the architecture of the product being created. The selected RCs may be subject to further adaptation if it is deemed appropriate to implement such design solutions. The model takes into account the following indicators: the duration of adapting the RCs to the requirements imposed on the component of the technical product under development; the costs of adaptation; the quality of the resulting component after adaptation; its competitiveness; its innovativeness; the risk of carrying out design work on adapting the RCs; and others.

This report presents the results of multi-criteria optimisation aimed at ensuring the optimal selection of a key component whilst reducing the design phase for a new complex product. If a key component cannot be identified, it becomes necessary to develop a new component, which may lead to increased risk, as well as longer project duration and additional financial costs. When creating a new component, a full cycle of design work must be carried out. Component development involves research and development (R&D), during which the component concept is developed, and experimental design work (EDW). The planning stage for component implementation allows the deadlines for its completion, testing and handover of the product element to be determined. Thus, the number and degree of complexity, as well as the availability of qualified personnel for new components that do not currently exist and are to be developed, influence the duration of the project and, overall, its feasibility.

References

1. Grijota, C. G., Acero, R., Yagüe-Fabra, J. A. Product development methodology "scalability". *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 100, pp. 571–576. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.125.

2. Den Boer, J., Lambrechts, W., Krikke, H. Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 257. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120301.

3. Mio, A., Fermeglia M. Multiscale modelling techniques in Life Cycle Assessment: application to product design. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 105, pp. 688–693. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.115.

4. Stief, P., Dantan, J.-Yv., Etienne, A., Siadat, A. Contribution to the design of reconfigurable multi-product assembly systems by architecture solutions generation through a new locating-driven approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. Vol. 41, pp. 108–123. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.003.

5. Breimann, R., Fett, M., Küchenhof, J., Gomberg, I., Kirchner, E., Krause, D., Trieu, H. K. A method for optimizing product architectures for the management of disturbance factors. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 119, pp. 1041–1046. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.179.

6. Fedorovich, O., Lutai, L., Kompanets, V., Bahaiev I. The Creation of an Optimisation Component-Oriented Model for the Formation of the Architecture of Science-Based Products. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. Vol. 996, pp. 415–426. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_31.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПЛИННОСТІ КАДРІВ В КОМПАНІЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Лещенко О.Б., Лещенко Ю.О., Дідечкін О.А.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

На сьогоднішній день, через обставини, що склалися в світі, плинність кадрів особливо негативного впливає на роботу компаній в цілому [1]. IT-галузь відома своєю високою конкуренцією за кваліфікованих фахівців, а їх догляд пов'язаний з навчанням нових співробітників, що є дорогим і часом витратним процесом, водночас постійна плинність кадрів негативно позначається на ефективності роботи команди. Проблема полягає в тому, що плинність кадрів виникає через неефективне використання наявних даних про співробітників. Більшість аналітичних рішень ґрунтуються на стандартних звітах та інтуїції співробітників, а також ухваленні цих рішень, коли проблема вже з'явилась, а не до її виникнення. Це може негативно позначатися на точності прогнозування та можливостях утримання співробітників.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю розробки моделі, що забезпечує ефективне використання даних про співробітників для підтримки ухвалення ефективних та своєчасних управлінських рішень.

Метою доповіді є представлення результатів дослідження щодо розробки моделей і алгоритмів прогнозування плинності кадрів в IT-компанії, що забезпечують підвищення ефективності прийнятих рішень з управління персоналом.

Проаналізовано стан IT-ринку праці в Україні та проблема плинності кадрів. Було з'ясовано, що зі втратою ключового співробітника загострюються ризики, пов'язані з кадровою безпекою, а також внутрішні та зовнішні. Прогнозування ж дає можливість взяти під контроль дані ризики, що сприятиме тому, що у компанії з'явиться впевненість у завтрашньому дні, що дозволить їй вкладатися у співробітника, не боячись ризику його швидкого звільнення, передиктивна аналітика, яка використовує технологію ML, що спрямована на вирішення цього завдання [2, 3].

Ґрунтуючись на отриманих даних, були виділені алгоритми машинного навчання. Наведено методологію роботи з технологією ML, що представляє собою чотири етапи: вибір інструментарію, підготовка даних, навчання та тестування моделі, оцінка моделі, що дозволило систематизувати процес розробки моделі та забезпечити її якість. Підсумковим результатом вибору стали алгоритми ML. Оцінка моделі здійснюється за такими метриками: accuracy, precision, recall, f1-score, AUC. Використання кількох метрик надає більш повну картину якості моделі. Застосування цієї методології дозволяє розробити якісну модель машинного навчання.

Проведено аналіз даних із платформи Kaggle [4], що містив набір з 10 ознак. Використані дані виявилися надійними та не містили нульових значень

або аномалій. Нормалізація включала бінаризацію категоріальних значень та масштабування, що стандартизувало дані перед навчанням моделі. Аналіз даних дозволив дійти висновку про важливість кар'єрного зростання та винагороди для утримання співробітників.

Завдяки проведеному аналізу наукових праць було відібрано ті алгоритми, які найкраще зарекомендували себе в прогнозуванні плинності кадрів, а саме випадковий ліс [5], дерево рішень, градієнтний бустинг, логістична регресія та нейронні мережі.

Надалі дані алгоритми були реалізовані та порівняні між собою за такими метриками, як accuracy, precision, recall, f1-score, AUC, внаслідок чого було визначено найбільш підходящий для передбачення плинності кадрів алгоритм – випадковий ліс. Для даного алгоритму також було наведено важливість ознак, що можна використовувати поліпшення стратегій утримання персоналу.

Розроблена модель була успішно апробована та оцінена з використанням різних метрик та матриці помилок, що підтвердило її надійність та ефективність. Порівняння з аналогічними моделями підтвердило високу точність та застосовність даної моделі для реальних бізнес-завдань.

В доповіді наводяться результати проведених досліджень, які можуть бути застосовані в будь-яких компаніях, де є потреба у передбаченні плинності кадрів, особливо в IT-компаніях, де рівень зарплати кваліфікованого співробітника може бути досить високий, а найм нового співробітника може коштувати компанії дорожче. Отримані результати можна використовувати для поліпшення умов праці за рахунок аналізу важливості ознак.

Гіпотеза про те, що ефективність прийняття управлінських рішень можна підвищити, якщо використовувати таку технологію, як машинне навчання для прогнозування звільнення працівників, було підтверджено.

Список літератури

1. Kumar P, Gaikwad SB, Ramya ST, Tiwari T, Tiwari M, Kumar B. Predicting Employee Turnover: A Systematic Machine Learning Approach for Resource Conservation and Workforce Stability. *Engineering Proceedings*. 2023; 59(1): 117. https://doi.org/10.3390/engproc2023059117

2. Marín Díaz G, Galán Hernández JJ, Galdón Salvador JL. Analyzing Employee Attrition Using Explainable AI for Strategic HR Decision-Making. *Mathematics*. 2023; 11(22): 4677. https://doi.org/10.3390/math11224677

3. Guerranti F, Dimitri GM. A Comparison of Machine Learning Approaches for Predicting Employee Attrition. *Applied Sciences*. 2023; 13(1):267. https://doi.org/10.3390/app13010267

4. Kaggle. URL: https://www.kaggle.com/datasets/kuniowu/human-resource.

5. Liu M, Yang B, Song Y. Research on Predicting the Turnover of Graduates Using an Enhanced Random Forest Model. *Behavioral Sciences*. 2024; 14(7):562. https://doi.org/10.3390/bs14070562.

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СТВОРЕННЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКОГО МАСОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

Федорович О.Є., Малєєв Л.В., Ульянцев А.М.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Сучасний стан країни потребує швидкого створення та виробництва військової техніки й озброєння, у потрібній кількості, для підвищення обороноздатності держави [1]. Але, існуючі підходи до проєктування та налагодження виробництва не дозволяють прискорити процес розробки актуальної техніки. Тому, актуальна тема доповіді, в якій розглядаються результати дослідження щодо пошуку можливостей для прискорення розробки високотехнологічних виробів, з використанням життєвого циклу (ЖЦ) створення продукції [2].

Метою доповіді є розробка комплексу моделей, які дозволяють оптимізувати ЖЦ створення актуальних високотехнологічних виробів, в умовах обмеженості ресурсів. Проведено системний аналіз етапів ЖЦ для пошуку можливостей швидкої реалізації. На початковому етапі формуються множина прогресивних технологій, з використанням інноваційних, що забезпечує конкурентоспроможність нового виробу. Проведено пошук компромісу щодо існуючих та новітніх технологій, в умовах обмеженості ресурсів. Використано компонентний метод швидкого створення архітектури у вигляді існуючих та інноваційних компонент. За допомогою 3-D моделювання та існуючих інформаційних платформ, проводиться створення дослідного зразка нового виробу. Створена оптимізаційна модель для забезпечення прискорення підготовки виробництва, з використанням цілочисельного булевого програмування. Розроблена оптимізаційна модель щодо пошуку раціональних рішень на кожному етапі ЖЦ, в умовах обмеженості ресурсів, з використанням показників часу, витрат та ризиків проєкту. **В доповіді** наводяться результати досліджень щодо скорочення ЖЦ створення високотехнологічних виробів, що дозволяє масштабувати серійне виробництво високотехнологічної техніки, з використанням інновацій та прискоренням її виготовлення, в умовах особливого стану країни.

Список літератури

1. Rusinski, E., Czmochowski, J., Moczko, P., & Pietrusiak, D. Challenges and Strategies of Long-life Operation and Maintenance of Technical Objects. *FME Transactions*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 219-228. DOI: 10.5937/fmet1603219R.

2. O. Fedorovich, L. Malieiev (2025) Matrix model of stratified representation of the high-tech products modernization project based on component and risk-oriented approaches. Control, Navigation and Communication Systems. Vol. 1 No. 79, pp. 55-61 https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.55-61

АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБРОБКИ РЕЗЮМЕ ДЛЯ РЕКРУТЕРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Фурманюк В.О., Лещенко Ю.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Ринок праці швидко цифровізується, а обсяги резюме та вакансій зростають на платформах і в корпоративних системах рекрутингу Applicant Tracking System (ATS). Первинний відбір кандидатів залишається трудомістким і суб'єктивним, особливо за умов багатомовних текстів, нестандартизованих форматів і різної якості даних [1]. Сучасні методи NLP та машинного навчання (від лексичних до семантичних моделей) створюють передумови для автоматизації класифікації резюме, вилучення ключових характеристик та суміщення «кандидат–вакансія» [2]. Водночас потреба у прозорості, керованих порогах ухвалення рішень і перевірюваній якості (калібруванні ймовірностей, оцінюванні надійності) робить дослідження й розробку прикладних рішень у цій сфері актуальними для бізнесу та служб зайнятості.

Метою доповіді є представлення результатів дослідження щодо розробки методів автоматизованої обробки та класифікації резюме з використанням технологій машинного навчання для підвищення ефективності процесу рекрутингу.

В роботі були: проаналізовані сучасні підходи до автоматизації процесів рекрутингу та обробки резюме; досліджені методи обробки природної мови для вилучення ключових характеристик кандидатів із текстів резюме; розглянуті існуючі архітектури моделей машинного навчання для класифікації текстових документів; сформовані та підготовлені набори даних за резюме; розроблена та навчена модель класифікації за резюме; проведений порівняльний аналіз точності різних алгоритмів машинного навчання; розроблено прототип програмного модуля для автоматичної обробки резюме з можливістю інтеграції у систему управління кандидатами.

В доповіді наводяться результати проведених досліджень та тестування прототипу, що дозволяють говорити про зменшення часу первинного скринінгу, підвищення узгодженості рішень, формування шорт-листів і політики «abstain» для невпевнених випадків, що підвищує довіру користувачів.

Список літератури

1. Dhouioui, Z., Djebali, N., Mbarek, M., & Ghédira, K. (2025). A comparative evaluation of sequential neural networks and integrated networks for effective job-candidate matching. *Applied Sciences*, 15(10), 4869. https://doi.org/10.3390/app15104869.

2. El-Deeb, R. H., Abdelmoez, W., & El-Bendary, N. (2025). Enhancing e-recruitment recommendations through text summarization techniques. *Information*, 16(4), 333. https://doi.org/10.3390/info16040333.

МАРШРУТИЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ GOOGLE OR-TOOLS

Яхненко О.В., Лещенко Ю.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

У сучасних умовах воєнного стану логістичні системи України перебувають під безпрецедентним навантаженням. Руйнування транспортної інфраструктури, блокування окремих напрямків, необхідність оперативного переміщення вантажів та забезпечення критичних потреб населення і військових створюють складні виклики для планування маршрутів та управління транспортними потоками. Від ефективності логістичних рішень у значній мірі залежить стійкість економіки, безперервність постачання гуманітарних та промислових вантажів, а також функціонування оборонного сектора [1].

Оптимізація маршрутів доставки набуває особливої ваги в ситуації, коли ресурси обмежені, а оперативність виконання перевезень стає критичним фактором. У цих умовах традиційні підходи до планування маршрутів виявляються недостатньо ефективними, оскільки вони не враховують динамічність середовища, нерівномірність попиту, зміни у доступності доріг та необхідність мінімізувати зайві пробіги транспортних засобів [2]. Тому застосування сучасних оптимізаційних алгоритмів є стратегічно важливим для підвищення ефективності логістичних процесів.

Задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP) та їх розширення – VRPTW, CVRP, MDVRP – давно відомі у науковій літературі, але саме їх застосування у поєднанні з методами імітаційного моделювання створює нові можливості для аналізу та прийняття рішень в умовах високої невизначеності. Імітаційне середовище дозволяє не лише отримати оптимальні маршрути, але й оцінити їхню працездатність у реальних географічних, часових та ризикових умовах, а також моделювати поведінку транспортних систем у випадку непередбачуваних змін.

Отже, актуальність роботи визначається об’єктивною потребою у впровадженні сучасних оптимізаційних методів для підтримки прийняття рішень у сфері логістики в умовах воєнних ризиків, нестабільності та обмеженості ресурсів [3], що робить тему дослідження соціально значущою та практично важливою.

Метою доповіді є представлення результатів розробки, моделювання та дослідження методів оптимізації маршрутів транспортних засобів із використанням бібліотеки Google OR-Tools та імітаційного середовища AnyLogic.

Розробка інтегрованого підходу, що поєднує оптимізаційні моделі на основі Google OR-Tools із геопросторовою симуляцією в AnyLogic, є актуальною науковою та практичною задачею. Такий підхід дозволяє

формувати ефективні маршрути з урахуванням обмежень транспортних ресурсів, часових вікон, місткості та багатодепової структури логістичної мережі, а також досліджувати їх вплив на стійкість та ефективність логістичних операцій під час воєнного стану.

Під час роботи: проведений аналіз сучасних підходів до вирішення задач маршрутизації транспортних засобів та їхніх різновидів; розглянуті алгоритмічні основи оптимізації маршрутів, зокрема методи пошуку з обмеженнями, евристичними та метаевристичними алгоритмами, що реалізовані в Google OR-Tools; обґрунтовано вибір математичної постановки задачі маршрутизації; реалізовано модель оптимізації маршрутів у Google OR-Tools та протестовано її на типових логістичних сценаріях; розроблено імітаційну модель транспортної системи в середовищі AnyLogic, що відтворює процес виконання оптимізованих маршрутів у динамічних умовах; проведено серію експериментів для оцінки ефективності розробленої моделі за різних умов навантаження, кількості клієнтів та транспортних засобів.

В доповіді представлено розроблену імітаційну модель у середовищі AnyLogic, що дозволяє проводити вирішення різних завдань оптимізації маршрутів та візуалізувати процес руху транспортних засобів, перевіряти стійкість оптимальних рішень до змін у динамічних умовах.

Виконана робота довела ефективність використання Google OR-Tools у поєднанні з AnyLogic для вирішення широкого спектра транспортно-логістичних задач. Транспортна логістика в умовах воєнного стану має підвищені вимоги до ефективності, стійкості та адаптивності. Логістичні ланцюги одночасно обслуговують як цивільні, так і військові потреби, що зумовлює необхідність швидкого прийняття рішень, оптимального використання транспортного фонду та мінімізації ризиків. Створена програмна система може бути розширена для підтримки стохастичних сценаріїв, більш складних моделей попиту, багатопродуктних доставок або адаптивного перерахунку маршрутів у реальному часі. Отримані результати можуть бути використані як у наукових дослідженнях, так і в практичних проєктах із планування логістичних мереж, оптимізації маршрутів та управління транспортними потоками.

Список літератури

1. Merkurjeva, G., Bolsakovs, V., Merkurjevs, J., Romanovs, A., & Faes, W. (2025). Data-Driven Modeling and Simulation in Forestry and Agricultural Product Transportation Management by Small Businesses: A case study. Data, 10(7), 98. https://doi.org/10.3390/data10070098

2. Almutairi, A., et al. (2025). Reliable vehicle routing problem using traffic sensors and deep learning techniques. Sensors, 25(7), 2262. https://doi.org/10.3390/sensors25072262

3. Moreno, R. P. R., Lopes, R. B., Ramos, A. L., Ferreira, J. V., Correia, D., & Melo, I. E. S. d. (2025). An agent-based simulation and optimization approach for sustainable urban logistics: A case study in Lisbon. Applied System Innovation, 8(3), 66. https://doi.org/10.3390/asi8030066

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО УПРАВЛІННЯ НАВЧАЛЬНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ КОРИСТУВАЧА У AR/VR СЕРЕДОВИЩАХ

Заярний О.В., Попов А.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Стрімкий розвиток імерсивних технологій відкриває принципово нові можливості для організації освітнього процесу, де межа між навчальним контентом і реальним досвідом стає дедалі умовнішою. Впровадження AR/VR середовищ у навчальну практику вимагає не лише технологічного забезпечення, але й теоретично обґрунтованих моделей управління пізнавальною діяльністю користувача [1]. Зокрема, одним із ключових викликів є динамічне коригування навчальної траєкторії відповідно до поточного рівня знань, когнітивного стану та індивідуальних особливостей того, хто навчається. Традиційні підходи до побудови навчальних сценаріїв, засновані на лінійній або розгалуженій схемі, не відповідають вимогам персоналізованої освіти в умовах імерсивного середовища, де кожна взаємодія генерує унікальний потік поведінкових і фізіологічних даних.

Метою доповіді є побудова моделі динамічного управління навчальною траєкторією, яка базується на принципах адаптивного навчання та використовує багаторівневу архітектуру обробки даних у реальному часі. Центральним елементом моделі є модуль моніторингу стану користувача (ММСК), який інтегрує 3 основні канали збору інформації:

– поведінкові дані (тривалість виконання завдань, кількість помилок, послідовність дій, використання підказок);

– просторово-фізичні дані (напрям погляду, переміщення у просторі, рухи тіла та рук);

– психолого-когнітивні показники (рівень уваги, темп засвоєння матеріалу, особливості сприйняття).

Сукупність цих даних дозволяє формувати актуальний профіль користувача для подальшої адаптації навчального процесу [2].

Математична основа модулю спирається на апарат прихованих марківських моделей та байєсівського оновлення ймовірностей. Стан знань користувача описується як прихована змінна S(t), що набуває значень із скінченної множини рівнів компетентності $\{S_1, S_2, ..., S_m\}$.

Перехід між станами визначається матрицею ймовірностей переходу P, елементи якої коригуються на основі накопичених спостережень. Таким чином, після кожної навчальної взаємодії система переобчислює апостеріорний розподіл імовірностей по всіх станах і визначає найбільш вірогідний поточний рівень знань. Попереднє порівняльне тестування показало, що точність моделі становить 0,91 відносно результатів опитування.

Механізм перебудови сценаріїв у реальному часі реалізується через модуль адаптивної генерації контенту, який взаємодіє безпосередньо з рушієм VR-середовища. Коли ММСК фіксує відхилення поточного стану від

цільового на величину, що перевищує встановлений, ініціюється процедура реконфігурації сценарію. Ця процедура передбачає 4 можливі типи адаптацій: зміну рівня складності завдань, перемикання між режимами підказок, реструктуризацію послідовності навчальних об'єктів та зміну рівня залученості користувача через варіювання інтенсивності та характеру його взаємодії з навчальним середовищем. Структурно сценарій навчання представлений як зважений орієнтований граф G = (V, E, W), де вершини V відповідають навчальним модулям, ребра E – можливим переходам між ними, а ваги W визначаються поточним профілем компетентності користувача. Алгоритм пошуку оптимального шляху в графі реалізований на основі модифікованого методу Дейкстри з динамічним оновленням ваг.

Таким чином, запропонована модель динамічного управління навчальною траєкторією у AR/VR середовищах є комплексним рішенням, що об'єднує методи машинного навчання, психологічні теорії мотивації та принципи педагогічного дизайну в єдину архітектуру реального часу. Перспективи подальших досліджень пов’язані з поглибленим вивченням і валідацією моделі динамічного управління навчальною траєкторією в різних AR/VR-сценаріях. Важливим напрямом є удосконалення модуля моніторингу стану користувача для підвищення точності оцінювання та розширення спектра аналізованих показників. Окрему увагу доцільно приділити розвитку модуля адаптивної генерації контенту, забезпечивши його більш тісну узгодженість із результатами моніторингу та підвищення ефективності персоналізації навчального процесу.

Список літератури

1. Рашевська Н. В. Імерсивне навчання як педагогічна проблема. *Наукові записки*. Серія: Педагогічні науки. 2025. № 217. С. 168–174. DOI: https://doi.org/10.36550/2415-7988-2025-1-217-168-174.

2. Заярний О. В., Попов А. В. Інтелектуальні системи автоматизованої генерації AR/VR 3D об'єктів у навчанні. *Проблеми інформатизації*: тези доп. XIII міжнар. НТК, 2025. Т. 1. С. 35. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96182.

SEMI-NATURAL CONTROL MODEL FOR A MULTI-MODE ROBOT

Sokol D.V.
National Aerospace University
“Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

The development of hybrid robotic platforms capable of operating in both air and ground environments is one of the current challenges of modern control theory, avionics, and mechatronics. Multi-mode robots provide extended functionality due to the ability to transform and change movement modes [1]. They are most effectively used in missions like search and rescue operations in remote areas or limited space, infrastructure inspection, environmental monitoring, and reconnaissance and survey of restricted areas. The ability to transition from flight to

ground movement allows for a significant reduction in energy consumption and an increase in mission duration by using the ground mode while maintaining the ability to overcome obstacles by briefly switching to the flight mode. Meanwhile, one of the key problems is ensuring stable control and correct coordination of modes, including the processes of transition between them and decision-making algorithms for movement of the robot [2, 3]. Control models and algorithms proposed in this paper provide a basis for the development (design, improvement, and verification) of robotic systems with enhanced operational efficiency in conditions of uncertainty and changing external environments.

This paper presents results of the development of a semi-natural control model for the multi-mode robot, which includes nonlinear flight and ground movement dynamics, as well as decision-making algorithms for transitions between modes based on environment conditions. **The paper considers** the multi-mode robot capable of operating in unmanned aerial system (UAS) and unmanned ground vehicle (UGV) modes. The robot dynamics are described by a system of nonlinear differential equations obtained with the help of the Euler–Lagrange equation. The multi-mode robot is considered not a regular 6 DoF object but a complex with additional generalized coordinates in the form of extension and rotation of its limbs [3]. Finalized non-linear differential equations:

– for the UAS mode:

$$\begin{cases} \ddot{x}_0 = \dfrac{F_B}{m}\left(sin\varphi sin\psi - cos\varphi sin\vartheta cos\psi\right); \\ \ddot{y}_0 = \dfrac{F_B}{m}\left(-sin\varphi cos\psi - cos\varphi sin\vartheta sin\psi\right); \\ \ddot{z}_0 = \dfrac{F_B}{m} cos\varphi\, cos\vartheta - g; \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x - \left(I_{yy} - I_{zz}\right)\omega_y\omega_z = \dfrac{d}{2}k_F\left(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2\right) + J_{rot}\omega_y\left(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4\right); \\ I_{yy}\dot{\omega}_y - \left(I_{zz} - I_{xx}\right)\omega_z\omega_x = \dfrac{d}{2}k_F\left(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2\right) + J_{rot}\omega_x\left(\omega_2 - \omega_1 + \omega_4 - \omega_3\right); \\ I_{zz}\dot{\omega}_z - \left(I_{xx} - I_{yy}\right)\omega_x\omega_y = k_m\left(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2\right); \end{cases} \tag{2}$$

– for the UGV mode:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_0 + \sum\limits_{i=1}^{4}\left[m_i\dfrac{d^2}{dt^2}\left(R\left(\varphi,\vartheta,\psi\right)\left(r_i^b + r_i^{limb}\right)\right)_x\right] = \sum\limits_{i=1}^{4}F_{i,x}; \\ m\ddot{y}_0 + \sum\limits_{i=1}^{4}\left[m_i\dfrac{d^2}{dt^2}\left(R\left(\varphi,\vartheta,\psi\right)\left(r_i^b + r_i^{limb}\right)\right)_y\right] = \sum\limits_{i=1}^{4}F_{i,y}; \\ m\ddot{z}_0 + \sum\limits_{i=1}^{4}\left[m_i\dfrac{d^2}{dt^2}\left(R\left(\varphi,\vartheta,\psi\right)\left(r_i^b + r_i^{limb}\right)\right)_z\right] + mg = \sum\limits_{i=1}^{4}\left(F_{i,z} + N_i\right); \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} I_{xx}\ddot{\varphi} + \sum_{i=1}^{4} m_i \left(y_i \ddot{z}_i - z_i \ddot{y}_i \right) = \sum_{i=1}^{4} \left(y_i F_{i,z} - z_i F_{i,y} \right); \\ I_{yy}\ddot{\vartheta} + \sum_{i=1}^{4} m_i \left(z_i \ddot{x}_i - x_i \ddot{z}_i \right) = \sum_{i=1}^{4} \left(z_i F_{i,x} - x_i F_{i,z} \right); \\ I_{zz}\ddot{\psi} + \sum_{i=1}^{4} m_i \left(x_i \ddot{y}_i - y_i \ddot{x}_i \right) = \sum_{i=1}^{4} \left(x_i F_{i,y} - y_i F_{i,x} \right); \end{cases} \quad (4)$$

$$m_i L^2 \ddot{\alpha}_i + m_i L \left(\sigma_i \ddot{x}_i sin\alpha_i - \ddot{z}_i cos\alpha_i \right) + \sigma_i m_i g L sin\alpha_i = M_{servo,\alpha} - M_{st.servo,\alpha} - M_{react_w}. \quad (5)$$

Special attention is paid to models of measuring devices (IMU, rangefinders, and optical flow) as well as algorithms of primary and secondary signal processing. A model of the automatic robot control system is presented, which includes stabilization and positioning channels, as well as the decision-making level responsible for choosing the corresponding operating mode. The decision-making algorithm is based on the analysis of the multi-mode robot state parameters and external influences and implements the switching logic between the “flight” and “ground movement” modes [2].

The practical implementation of the proposed approach is based on the use of semi-natural modeling. Nonlinear dynamic models are implemented in Simulink, 3D motion visualization is carried out using a physical modeling tool Simulink Simscape Multibody, and the digital part of the control system is in the STM32F407 microcontroller. This architecture ensures the coordinated functioning of the mathematical model and the real control algorithm.

The scientific novelty lies in the development of a single approach to describing the multi-mode robot as a semi-natural model, which combines mathematical models for different movement modes, transition processes between the modes, and decision-making algorithms on the control structure. Unlike existing approaches, the work proposes an integrated model that provides for real-time communication of the computer model and the controller, as well as 3D simulation of the multi-mode robot.

The obtained results demonstrate the spectrum of use of the semi-natural model as a tool for implementing and researching various models, methods, or algorithms and solving navigation and cartography problems (SLAM, A*); digital signal processing (EKF, FIR, IIR); optimal (fault-tolerant, robust, rational) control [4–6].

References

1. Sihite, E., Kalantari, A., Nemovi, R. et al. Multi-Modal Mobility Morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. Nat Commun 14, 3323 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-39018-y

2. G. Zhan, K. Zhang, K. Li and H. Piao, "UAV Maneuvering Decision-Making Algorithm Based on Deep Reinforcement Learning Under the Guidance of Expert Experience," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 35, no. 3, pp. 644-665, June 2024, doi: 10.23919/JSEE.2024.000022.

3. Mandralis, I., Nemovi, R., Ramezani, A. et al. ATMO: an aerially transforming morphobot for dynamic ground-aerial transition. Commun Eng 4, 74 (2025). https://doi.org/10.1038/s44172-025-00413-6

4. Hurtovyi, O., Dergachov, K., Yaremenko, A. (2025). Visual Positioning of the UAV in Conditions of Impossibility of Using External Navigation Signals. In: Ostroumov, I., Marais, K., Zaliskyi, M. (eds) Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1418. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91992-3_36.

5. Y. Wen, J. Lai, S. Xie, Z. Fu, and H. Zhan, "Intelligent UAV Based Anaerobic Tank Inspection using LiDAR-IMU SLAM and Camera Imagery," in Optica Laser Congress Congress 2025, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2025), paper LsTu4C.2. https://doi.org/10.1364/LSC.2025.LsTu4C.2

6. E. Sihite, F. Slezak, I. Mandralis, A. Salagame, M. Ramezani, A. Kalantari, A. Ramezani, and M. Gharib, “Demonstrating autonomous 3d path planning on a novel scalable ugv-uav morphing robot,” in 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023, pp. 3064–3069.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ АГРЕГАЦІЇ ПОЯСНЕНЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ІНТЕРПРЕТАЦІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Хміль О.С., Феоктистова О.І.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Методики поясненого штучного інтелекту націлені на забезпечення впевненості та довіри до роботи великих мовних моделей. Однак ступінь довіри до таких пояснень буває дуже низькою [1, 2]. Нещодавно проведені дослідження показали, що агрегування пояснень кількох моделей машинного навчання може підвищити їх достовірність порівняно з підходами, що базуються на одній моделі [3]. Однак, у ході цих досліджень було використане лише просте арифметичне усереднення, що свідчить про те, що тема потребує подальшого опрацювання. У доповіді розглянуто найбільш поширені підходи до агрегації пояснень моделей задля підвищення стійкості методів пояснювального ШІ. Метою є усунення проблеми розбіжностей між поясненнями, отриманими різними методами, шляхом аналізу можливостей агрегації. Перевірка достовірності агрегованих пояснень проведена на трьох моделях різного типу: k-найближчих сусідів, випадкового лісу та штучних нейронних мереж.

Розглянуто наступні методи агрегації: середнє арифметичне як базове значення для порівняння; агрегування за медіаною; агрегування, зважене за рівнем впевненості; агрегування, зважене за стійкістю; агрегування за врізаним середнім; мажоритарне агрегування за знаками; агрегування на основі рангів. Для досліду було взято п'ять відкритих наборів даних для задачі класифікації: перепис доходу, маркетинг португальської банківської установи, рак молочної залози, кредитна лінія під заставу житла, якість вина. Попередня обробка даних включала стандартизацію числових змінних, кодування категоріальних, а також видалення ознак із високою кореляцією. Кожен набір даних було розділено на тренувальну, валідаційну та тестову вибірки.

Порядок аналізу методів агрегації: 1) навчити моделі на кожному наборі даних; 2) згенерувати 100 збурень на кожен тестовий екземпляр за допомогою інтерполяції до сусідів; 3) відфільтрувати збурення, де всі моделі зберігають прогнози (утримання: 91-99%); 4) обчислити стійкість кожного методу агрегації; 5) обчислити прогноз узгодженості, використовуючи показники стійкості для кожного методу агрегації. Для оцінки стійкості використовувалась кореляція Спірмена між вектором важливостей ознак вихідного екземпляра та збурених копій. Значення кореляції усереднювались по всіх збуреннях, що збереглись після фільтрації. Прогноз узгодженості обчислювався як площа під ROC-кривою (AUC), де стійкість виступала предиктором бінарної змінної — чи збігаються прогнози всіх трьох моделей.

Стійкість визначається як стабільність пояснень за локальних збурень, виміряна за допомогою кореляції Спірмена між вихідними та збуреними поясненнями. Вища стійкість вказує на більш надійні пояснення.

Прогноз узгодженості (AUC) показує наскільки добре показники стійкості передбачають, чи моделі узгоджуються з прогнозами. Це підтверджує, чи збігаються стійкі пояснення з консенсусом моделі. Значення 1.0 означає ідеальне передбачення, 0.5 - випадкове. Результати показують, що оптимальна стратегія агрегації залежить від рівня узгодженості моделі: медіана досягає найкращих результатів, коли узгодженість >90% (AUC 0,673), тоді як метод мажоритарне агрегування за знаками та метод зважування за рівнем впевненості показують найкращі результати при узгодженості 85-90% (AUC 0,559-0,707). Агрегація, зважена за стійкістю, стабільно досягає найвищої стабільності (середня стійкість 92,1%), але демонструє компроміс з виявленням узгодженості. Пояснення, що отримані на основі штучних нейронних мереж демонструють вищу стійкість (95,3%) порівняно з методами на основі дерев випадкового лісу (87,1%) та на основі екземплярів (89,3%). У наборах даних з коефіцієнтом узгодженості від 74 до 90% визначається компроміс між стабільністю пояснення та виявленням розбіжностей: ультрастабільні методи (зважені за стійкістю: 92,1% ± 6,6%) жертвують чутливістю (AUC 0,567), тоді як збалансовані підходи (зважені за впевненістю: 91,2% ± 8,9%) досягають кращого прогнозування узгодженості (AUC 0,578). Отримані результати свідчать про те, що вибір методу агрегації слід здійснювати з урахуванням характеристик конкретного набору даних та рівня узгодженості моделей. У сценаріях з високою узгодженістю пріоритет надається стабільності пояснень, тоді як у неоднозначних випадках доцільніше застосовувати методи, чутливі до розбіжностей.

Список літератури

1. Robustness of interpretability methods, 2018. 10.48550/arXiv.1806.08049.

2. Slack, Dylan & Hilgard, Sophie & Jia, Emily & Singh, Sameer & Lakkaraju, Hima. (2020). Fooling LIME and SHAP: Adversarial Attacks on Post hoc Explanation Methods. 180-186. 10.1145/3375627.3375830.

3.Vascotto, Ilaria & Rodriguez, Alex & Bonaita, Alessandro & Bortolussi, Luca. (2025). Beyond single-model XAI: aggregating multi-model explanations for enhanced trustworthiness. 10.48550/arXiv.2510.11164.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АУТСОРСИНГОВИХ ІТ-ПРОЄКТІВ ШЛЯХОМ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ АКТУАЛІЗАЦІЇ ТЕСТ-КЕЙСІВ

Череватенко О.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Згідно статистики Upwork, Україна посідає перше місце у Європі та четверте на світовому ринку суб'єктів аутсорсингу.

Не дивлячись на склад-ні умови, тільки у січні 2026 року експорт послуг українських ІТ-компаній склав $509 млн., що на 3.9% більше, ніж у січні 2025 року [1].

Сучасні компанії найрізноманітніших напрямків діяльності, в умовах повсюдної цифрової трансформації та обмежених внутрішніх ресурсів, все частіше прибігають до аутсорсингу своїх ІТ-проєктів. При цьому багато замовників не володіють профільною технічною компетенцією, а найняті команди виконавця проєкту розподілені за локацією розробників, межами робочого дня і менталітетом.

Така зв'язка – непрофільний замовник + аутсорсинг + розподілені команди породжує цілий ряд проблем, які не охоплюються стандартними моделями управління ІТ-проєктами [2, 3]. Однією з проблем є висока динаміка зміни вимог до кінцевого продукту безпосередньо у процесі розроблення проєкту. Одним із проявів цієї проблеми є істотне зниження ефективності та якості процесів тестування у наслідок швидкого старіння тестової бази і накопичення технічного боргу.

У доповіді обговорюється підхід до усунення цих проявів шляхом інтелектуалізації процесу актуалізації тест-кейсів.

Цей підхід передбачає аналіз і моделювання процесу актуалізації, виявлення рутинних інтелектуальних функцій, які виконуються людиною, розроблення модульної архітектури інтелектуальної системи для автоматизації процесу актуалізації та обґрунтування для потенційного замовника необхідності і економічної доцільності впровадження такої системи.

Список літератури

1. Інтернет ресурс: https://delo.ua/news/ukrayinski-it-kompaniyi-zmicnyuyut-poziciyi-na-svitovomu-rinku-eksport-cifrovix-poslug-u-sicni-2026-roku-sklav-508-mln-461453/

2. Camara, R. (2022). Outsourcing with Distributed Teams in Large-Scale Environments. XXV Congresso Ibero-Americano em Engenharia de Software (CIbSE). – Режим доступу: Academia.edu

3. Буняк Н.М. Інноваційний аутсорсинг як інструмент управління підприємством // Економіка та суспільство. – 2021. – № 30. – С. 45–50.

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОННОГО ІНВОЙСИНГУ: ПОДОЛАННЯ АРХІТЕКТУРНИХ ТА СЕМАНТИЧНИХ БАР'ЄРІВ ІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ ДО ЄДИНОГО ЦИФРОВОГО РИНКУ

Цешевський В.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

В останні роки проблема цифровізації фінансово-економічного сектору України набула гостроти через євроінтеграційні процеси та потребу бізнесу в інструментах ліквідності (зокрема, факторингу). Здобуття статусу кандидата на вступ до ЄС вимагає переходу на стандарти електронного інвойсингу європейської мережі PEPPOL.

На даний час в Україні діє система публічних закупівель Prozorro, разом з тим запуск ринку факторингу гальмується відсутністю інфраструктури довіри до традиційних електронних інвойсів.

У доповіді розглядається концептуальна гібридна модель електронного інвойсингу, спрямована на подолання семантичних, архітектурних та криптографічних бар'єрів між національними реєстрами і мережею PEPPOL. Доводиться, що пряма імплементація європейської моделі "чотирьох кутів" призведе до втрати даних для державного моніторингу. Натомість пропонується архітектура Єдиного державного шлюзу на базі моделі безперервного транзакційного контролю. Використання механізму розгалуження даних дозволить шлюзу автоматично трансформувати комерційні UBL-документи в дані для Prozorro та паралельно екстрагувати фіскальні метадані для ЄРПН у режимі реального часу [1].

Впровадження запропонованої архітектури перетворює інвойс на верифікований цифровий актив (Machine-Trust Asset), створюючи "Єдине джерело правди". За оцінками комплексного дослідження EY (Ernst & Young) [2], перехід на структуровані інвойси дозволить відмовитися від 100 млн паперових документів на рік, збереже 23 млн робочих годин та дасть макроекономічний ефект економії від $1 млрд до $10 млрд. Формування алгоритмічної бази довіри критично необхідне для факторингу: через її відсутність частка профінансованих інвойсів в Україні становить лише 0,25% ВВП, тоді як середній показник у ЄС складає 12%, а в Естонії сягає 19,2%. У подальшому планується здійснити математичну та процедурну формалізацію цієї екосистеми.

Список літератури

1. Alishani A., Olesk M., Soe R.-M., Kadak T., Krimmer R. Real-Time Economy: A New Frontier in Business and Economic Growth // Halduskultuur. 2025. Vol. 23. P. 129-155.

2. Древаль О., Мостова Д. Впровадження е-інвойсів в Україні. Комплексне дослідження EY // NV Business. 10 грудня 2025.

ВЕРИФІКАЦІЯ АДАПТИВНИХ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ, ЩО ЗМІНЮЮТЬ ПОВЕДІНКУ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ПОТОЧНОГО ПСИХО-ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ КОРИСТУВАЧА

Шостак І.В., Малюга А.І.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Верифікація адаптивних програмних систем, що змінюють поведінку під час виконання (runtime adaptation) в залежності від стану користувача є важливою задачею, вирішення якої є необхідною умовою для побудови безпечних адаптивних систем навчання, авіаційних та медичних симуляторів, оскільки традиційні методи статичної формальної верифікації алгоритмів до впровадження системи та автономне тестування на еталонних наборах даних виявляються неспроможними перевірити коректність адаптивної логіки вибору конфігурації системи в реальних умовах експлуатації при різноманітності станів, у яких можуть перебувати користувачі.

У доповіді розглянуто методичні засоби верифікації адаптивних програмних систем на основі інтеграції інтелектуального аналізу процесів (process mining), що забезпечує автоматизоване формування фактичних моделей виконання процесів, на основі даних з журналів подій системи у ході її функціонування, а також перевірку ступеня відповідності траєкторій адаптації еталонній моделі процесу, через спеціалізовані метрики якості. Вирішення даної задачі забезпечує автоматизоване виявлення порушень адаптивної логіки із категоризацією за рівнем критичності, для підтримування належного рівню безпеки користувачів та самовдосконалення системи.

Розроблений метод верифікації адаптивних програмних систем послідовно виконує збереження структурованих подій, формалізацію еталонної моделі процесу адаптації, автоматичну побудову фактичної моделі процесу з журналів подій, перевірку відповідності фактичної моделі еталонній специфікації, виявлення порушень адаптивної логіки із категоризацією за критичністю, а також вдосконалення системи шляхом корекції параметрів правил адаптації.

Для оцінки коректності поведінки системи було використано метрики, узгоджене використання яких надало змогу побудувати об’єктивну кількісну оцінку якості адаптивної логіки системи.

Для обох сценаріїв спостерігається помітне зниження частоти порушень еталонної моделі після застосування адаптивної верифікації. Одночасно підвищуються значення метрик придатності та точності.

Це свідчить про те, що після самовдосконалення еталонна модель краще узгоджується з реальною поведінкою системи.

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF THE MACHINE LEARNING METHOD FOR PROACTIVE MONITORING OF FAULTS IN ON-BOARD COMPUTER SYSTEMS OF UAV

Glib Briia
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
Kharkiv, Ukraine

The increasing complexity of on-board hardware and software systems in unmanned aerial vehicles (UAV) requires the development of automated approaches to detect and prevent failures.

Traditional threshold-based monitoring relies on predefined operational limits, requires manual definition of failure modes, and does not take into account gradual degradation or predict failures before they occur. Machine learning (ML) methods can be used as an alternative data-driven approach that models normal system behavior and can detect deviations, providing early signs of future failures without the need for manual definition of failure modes [1].

UAV flight data anomaly detection methods can be divided into three categories [1]. Knowledge-based methods encode expert rules in anomaly identification algorithms.

They are interpretable but do not generalise well to different UAV types and fault modes. Model-based methods create a physical observer and detect anomalies as deviations between the actual and predicted state. They work well when accurate physical models are available, but such models are hard to derive for heterogeneous platforms. Data-based methods learn from historical flight data without physical modelling.

They became the dominant research direction due to deep learning development and increasing dataset availability [1, 2].

The report presents the results of a study of the effectiveness of data-driven machine learning methods for proactive failure monitoring in UAV onboard computing systems.

Future research is planned to investigate the effectiveness of multimodal extensions that combine telemetry with onboard visual data, as well as transfer learning strategies to reduce dependence on labeled examples.

References

1. Yang, L., Li, S., Li, C. et al. A survey of unmanned aerial vehicle flight data anomaly detection: Technologies, applications, and future directions. Sci. China Technol. Sci. 66, 901–919 (2023). https://doi.org/10.1007/s11431-022-2213-8

2. Ghasemi, A., Ghaffari, A., Derakhshanfard, N., İbrahimoğlu, N., Pakmehr, A. Anomaly detection in unmanned aerial vehicles flight data: A survey. Ad Hoc Netw. 178 (2025). https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.103989

МУЛЬТИАГЕНТНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ПОЯСНЮВАНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Данова М.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Сучасні системи підтримки прийняття рішень (СППР) дедалі ширше застосовуються у логістиці, промисловості, медицині та інших галузях, де своєчасність, обґрунтованість і прозорість рішень мають критичне значення. Водночас зростання складності інтелектуальних моделей і поширення непрозорих механізмів формування результатів ускладнюють інтерпретацію та контроль коректності функціонування таких систем. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває використання підходів пояснюваного штучного інтелекту, орієнтованих на підвищення прозорості, довіри та обґрунтованості рішень у системах підтримки прийняття рішень [1].

У доповіді обговорюється мультиагентний підхід до побудови систем підтримки прийняття рішень на основі пояснюваного штучного інтелекту (xAI), у межах якого процеси збору даних, логічного висновку, формування пояснень та контролю коректності рішень реалізуються спеціалізованими автономними агентами. У такій архітектурі пояснення розглядається як формалізоване представлення логіки отримання результату, а онтологічна модель знань забезпечує структуроване подання понять предметної області, зв'язків і правил міркування. Це створює передумови для поєднання інтерпретованості рішень, властивої xAI, із гнучкістю, модульністю та масштабованістю мультиагентних систем.

Поєднання засобів пояснюваного штучного інтелекту з мультиагентною організацією обчислювальних процесів дає змогу будувати СППР, орієнтовані не лише на отримання результату, а й на пояснення логіки його формування та підтримку контролю якості рішень у динамічному середовищі. Такий підхід сприяє підвищенню надійності функціонування системи, спрощує аналіз причин помилок і розширює можливості практичного використання інтелектуальних СППР у критично важливих прикладних сферах. Отже, мультиагентний підхід у поєднанні з концепцією пояснюваного штучного інтелекту є перспективною основою побудови прозорих, адаптивних і масштабованих систем підтримки прийняття рішень.

Список літератури

1. Kostopoulos G., Davrazos G., Kotsiantis S. Explainable Artificial Intelligence-Based Decision Support Systems: A Recent Review / G. Kostopoulos, G. Davrazos, S. Kotsiantis // Electronics. – 2024. – Vol. 13, No. 14. – Article no. 2842. – DOI: 10.3390/electronics13142842.

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Лученко С.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Сучасний етап розвитку технологій розробки програмного забезпечення характеризується стрімким оновленням інструментальних засобів, методів і підходів до створення програмних систем. У сучасних умовах конкурентоспроможність програмного продукту визначається не лише його функціональними можливостями, а й якістю архітектурних рішень, швидкістю розроблення, зручністю супроводу, безперервністю інтеграції та здатністю команди оперативно адаптуватися до змін. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває аналіз сучасних технологій розробки програмного забезпечення та тенденцій їх розвитку. Однією з характерних рис сучасної розробки програмного забезпечення є перехід від ізольованого виконання окремих етапів життєвого циклу до інтегрованого середовища, у межах якого процеси проєктування, розроблення, тестування, розгортання та супроводу програмного забезпечення є взаємопов'язаними.

У доповіді обговорюється сучасний стан і тенденції розвитку технологій розробки програмного забезпечення, пов'язані з упровадженням гнучких методологій, DevOps-практик, хмарних платформ та засобів автоматизації процесів розробки програмного забезпечення. Практика застосування DevOps та споріднених підходів демонструє, що така інтеграція сприяє підвищенню узгодженості командної роботи, скороченню часу постачання програмного продукту та покращенню його якості [1]. Важливою складовою сучасних технологій розробки програмного забезпечення є також активне використання хмарних платформ і сервісів спільної роботи, що забезпечують гнучкість інфраструктури, масштабованість рішень і підтримку розподілених команд. Поєднання Agile, хмарних обчислень і DevOps створює умови для побудови більш ефективних процесів створення програмних систем, орієнтованих на швидке постачання цінності користувачеві, проте одночасно потребує системного бачення повного циклу розроблення програмного забезпечення.

Отже, тенденції розвитку сучасних технологій розробки програмного забезпечення свідчать про посилення ролі автоматизації, гнучкості, інтегрованості процесів і хмарної інфраструктури.

Список літератури

1. Faustino J., Pereira R., da Silva M.M., Oliveira M. DevOps benefits: A systematic literature review / J. Faustino, R. Pereira, M.M. da Silva, M. Oliveira // Software: Practice and Experience. – 2022. – Vol. 52, No. 9. – P. 1905–1926. – DOI: 10.1002/spe.3096.

ОНТОЛОГІЧНО КЕРОВАНИЙ ПІДХІД ДО ВЕРИФІКАЦІЇ РІШЕНЬ У КЛІНІЧНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Даниленко О.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Активне впровадження методів штучного інтелекту у системи підтримки прийняття рішень (СППР) зумовлено складністю формалізації причинно-наслідкових зв'язків у слабкоструктурованих предметних областях. Проте застосування інтелектуальних моделей типу «чорної скриньки» пов'язане з підвищеними ризиками, що зумовлені обмеженою прозорістю механізмів формування рекомендацій. Особливої гостроти ця проблема набуває у сфері медицини, де СППР повинні забезпечувати не лише високу точність, а й гарантовану відповідність клінічним протоколам та нормативним вимогам [1].

Перспективним напрямом розв'язання цієї проблеми є розроблення онтологічно керованих пояснюваних СППР, що дозволяють інтегрувати формалізовані знання медицини у процеси перевірки рішень.

У доповіді обговорюється підхід, який передбачає багаторівневу організацію системи, яка включає рівні даних, інтелектуальної моделі, формування пояснень (xAI) та спеціалізований рівень верифікації [2]. У межах рівня верифікації здійснюється зіставлення результатів моделі та сформованих інтерпретацій із правилами, що містяться в онтологічному ядрі. Це дає можливість перевіряти не лише одиничні значення параметрів, а й семантичні зв'язки: несумісність атрибутів, порушення причинно-наслідкової логіки або конфлікт між рекомендованою дією та дозволеними станами пацієнта. Ключовими функціями верифікаційного рівня є контроль доменних обмежень, виявлення логічних суперечностей та детекція аномальних висновків, що виходять за межі очікуваного контексту.

Впровадження такого підходу дозволяє забезпечити узгодженість між статистичними висновками та формальними знаннями медицини, що є необхідною умовою для масштабування СППР у системах з високим рівнем відповідальності.

Список літератури

1. Adadi A., Berrada M. Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (xAI) / A. Adadi, M. Berrada // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 52138–52160.

2. Даниленко О.О., Данова М.О. Підхід до верифікації рішень у пояснюваних системах підтримки прийняття рішень / О.О. Даниленко, М.О. Данова // Progressive Approaches in Science and Engineering : тези доп. 3 Міжнар. наук.-практ. конф. (Копенгаген, Данія, 4–6 лютого 2026 р.). – Копенгаген, 2026. – С. 180–183.

ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОГО ВИРОБНИЦТВА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Шальнєв В.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Сучасний розвиток промисловості характеризується активним переходом від централізованих до розподілених форм організації виробництва [1], у межах яких створення складної технічної продукції забезпечується кооперацією декількох незалежних учасників [2]. Такий підхід обумовлений зростанням складності технічних систем, необхідністю залучення вузькоспеціалізованих виробничих компетенцій, а також прагненням до підвищення гнучкості, адаптивності та економічної ефективності виробничих процесів. Одним із найбільш показових прикладів такої продукції є безпілотні літальні апарати (БПЛА), що поєднують у собі аеродинамічні, конструкційні, електронні, програмні та комунікаційні компоненти. Проблема організації розподіленого виробництва БПЛА полягає у необхідності формування раціональної конфігурації потенційних учасників виробничої кооперації в умовах багатокритеріальності, невизначеності та динамічності зовнішнього середовища. На практиці це означає необхідність прийняття рішень щодо вибору складу учасників, розподілу між ними функцій, визначення логістичних зв'язків, оцінювання сумісності та стійкості майбутньої виробничої системи.

У доповіді обговорюється підхід що ґрунтується на використанні цифрових двійників учасників виробництва у вигляді інтелектуальних агентів, їх інтеграції в багатоагентну систему та застосуванні показника первісної ризикостійкості для оцінювання альтернатив. Такий підхід дозволяє поєднати засоби формалізації учасників, механізми їхньої взаємодії та інструменти підтримки прийняття рішень у межах єдиного програмного середовища, що відповідає потребам організації розподіленого виробництва БПЛА, крім того підхід дозволяє формалізувати бізнес-процеси підприємств та забезпечити підтримку прийняття рішень у динамічному логістичному середовищі.

Список літератури

1. Bi M., Wang X.V., Wang L. Dynamic distributed decision-making for resilient resource reallocation in disrupted manufacturing systems / M. Bi, X.V. Wang, L. Wang // International Journal of Production Research. – 2024. – Vol. 62. – P. 1737–1757. – DOI: 10.1080/00207543.2023.2200567.

2. Cosa M., Torelli R. Digital transformation and flexible performance management: a systematic literature review of the evolution of performance measurement systems / M. Cosa, R. Torelli // Global Journal of Flexible Systems Management. – 2024. – Vol. 25. – P. 445–466. – DOI: 10.1007/s40171-024-00409-9.

ПІДХІД ДО ПОЯСНЮВАНОЇ СЕМАНТИЧНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ФІНАНСОВИХ ДАНИХ

Баранєй Д.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Активна цифровізація фінансово-економічних процесів, розвиток інтелектуальних інформаційних систем і широке впровадження технологій штучного інтелекту (ШІ) призвели до суттєвої трансформації підходів до обробки даних та підтримки управлінських рішень у фінансовій сфері.

У таких умовах сучасні інформаційні системи дедалі частіше використовують алгоритми машинного навчання для автоматизації аналізу даних, прогнозування ризиків, виявлення аномалій та обґрунтування рішень у задачах фінансового менеджменту, проєктного управління й ресурсного планування [1].

Попри значний прогрес у застосуванні ШІ у фінансовій сфері, на практиці зберігається суперечність між високою прогностичною ефективністю моделей машинного навчання та недостатнім рівнем обґрунтованості їх результатів у критично важливих задачах [2].

У доповіді обговорюється підхід до пояснюваної семантичної верифікації результатів інтелектуального аналізу фінансових даних на основі поєднання методів пояснюваного штучного інтелекту (xAI), онтологічного по-дання знань і процедур формальної перевірки.

Запропонований підхід передбачає послідовну реалізацію етапів формування аналітичного результату, генерації пояснення, семантичного мапінгування, логічної верифікації та оцінювання достовірності.

Це дозволяє перейти від дескриптивного пояснення результату до його змістовно обґрунтованої перевірки в контексті формалізованих знань фінансової предметної області та створює передумови для підвищення прозорості, надійності й алгоритмічної підзвітності фінансових інтелектуальних систем.

Список літератури

1. Kabir S., Hossain M. S., Andersson K. A Review of Explainable Artificial Intelligence from the Perspectives of Challenges and Opportunities. Algorithms. 2025. Vol. 18, no. 9. Article no. 556. DOI: 10.3390/a18090556.

2. Chen X.-Q., Ma C.-Q., Ren Y.-S., Lei Y.-T., Huynh N. Q. A., Narayan S. Explainable artificial intelligence in finance: A bibliometric review / X.-Q. Chen, C.-Q. Ma, Y.-S. Ren, Y.-T. Lei, N. Q. A. Huynh, S. Narayan // Finance Research Letters. – 2023. – Vol. 56. – Article no. 104145. – DOI: 10.1016/j.frl.2023.104145

АНАЛІЗ ОНТОЛОГІЧНО-ОРІЄНТОВАНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИДОБУВАННЯ БІЗНЕС-ІНФОРМАЦІЇ З НЕСТРУКТУРОВАНИХ ВЕБ-ДЖЕРЕЛ

Данов С.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Цифровізація економічних процесів і стрімке зростання обсягів даних у веб-просторі зумовлюють підвищення ролі бізнес-інформації як стратегічного ресурсу управління. У сучасному інформаційному середовищі значущі для підприємств відомості формуються не лише у внутрішніх інформаційних системах, а й у зовнішньому цифровому контурі, який охоплює корпоративні веб-ресурси, новинні платформи, відкриті звіти, галузеві портали, електронні документи та інші джерела ділової комунікації. За таких умов проблема отримання, структурування та інтерпретації бізнес-інформації набуває міждисциплінарного характеру та поєднує задачі інформаційного пошуку, оброблення природної мови, семантичної інтеграції даних і управління знаннями [1, 2].

У цьому контексті особливої актуальності набувають онтологічно-орієнтовані підходи до видобування інформації, які дозволяють перейти від поверхневого синтаксичного виявлення елементів тексту до побудови формалізованих моделей предметної області.

В доповіді обговорюються результати проведеного порівняльного аналізу онтологічно-орієнтованих підходів до видобування бізнес-інформації з неструктурованих веб-джерел. Оцінювання ефективності сучасних підходів здійснювалось за сукупністю характеристик, серед яких ключовими є точність, повнота, складність реалізації, вимоги до вхідних даних, адаптивність та інтерпретованість.

Показано, що найбільш перспективними для систем підтримки прийняття рішень є гібридні підходи, які поєднують високу повноту машинного навчання, структурність лінгвістичного аналізу та семантичну надійність онтологічного узгодження.

Список літератури

1. Hoseini S., Theissen-Lipp J., Quix C. A survey on semantic data management as intersection of ontology-based data access, semantic modeling and data lakes / S. Hoseini, J. Theissen-Lipp, C. Quix // Journal of Web Semantics. – 2024. – Vol. 81. – Article no. 100819. – DOI: 10.1016/j.websem.2024.100819.

2. Zeroual S., Nessah D., Bakhouche A. A systematic literature review on ontology-driven business intelligence components / S. Zeroual, D. Nessah, A. Bakhouche // The Electronic Journal of Knowledge Management. – 2026. – Vol. 24, no. 1. – P. 101–118. – DOI: 10.34190/ejkm.24.1.4277.

МЕТОД БЕЗПЕЧНОГО ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ МЕДИЧНИХ ЗАКЛАДІВ

Кушнарьов М.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Сучасна цифрова трансформація медичної інфраструктури, що проявляється у переході до концепції «розумних шпиталів» (Smart Hospitals), супроводжується глибокою інтеграцією кіберфізичних систем, Інтернету речей (IoT) та алгоритмів штучного інтелекту. У таких системах енергетична підсистема перестає бути допоміжною і набуває статусу критично важливого компонента, від якого безпосередньо залежить безперервність надання медичних послуг.

Існуючі системи управління енергією (BEMS/HEMS), як правило, базуються на статичних правилах або спрощених прогнозних моделях, що не здатні ефективно адаптуватися до швидкозмінних та стохастичних умов експлуатації. Застосування методів глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL) відкриває нові можливості для адаптивного управління, проте супроводжується критичним обмеженням - відсутністю гарантій безпеки під час процесу навчання.

Зокрема, механізм дослідження середовища (exploration), притаманний DRL, передбачає виконання випадкових або субоптимальних дій, що в умовах енергосистем медичних закладів може призвести до порушення фізичних обмежень (наприклад, критичного розряду акумуляторних систем) та виникнення аварійних ситуацій. Це робить пряме застосування класичних DRL-підходів неприйнятним для об’єктів критичної інфраструктури.

Таким чином, виникає науково-прикладна проблема створення інтелектуальних методів управління, які поєднують адаптивність навчання з підкріпленням із строгими математичними гарантіями безпеки. Розв’язання цієї проблеми можливе в межах парадигми Safe Reinforcement Learning, яка дозволяє інтегрувати фізичні обмеження системи безпосередньо у процес прийняття рішень.

Викладений у доповіді підхід спрямований на подолання зазначених обмежень шляхом поєднання методів навчання з підкріпленням, теорії керування та децентралізованих обчислювальних архітектур, що забезпечує створення надійних, автономних та безпечних енергосистем для медичних закладів.

Центральним науковим результатом проведеного дослідження є метод безпечного навчання з підкріпленням (Safe Reinforcement Learning) для управління автономними енергосистемами шпиталів.

АНТРОПОЦЕНТРИЧНИЙ МЕТОД ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ У ЗВО НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА АДАПТИВНОГО НАВЧАННЯ

Ситнік О.О.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Задача складання розкладу навчальних занять у закладах вищої освіти (ЗВО) є NP-складною комбінаторною задачею, що традиційно вирішується методами еволюційної оптимізації.

Однак стандартні генетичні алгоритми (GA) не враховують антропоцентричні фактори — хронотипову відповідність, психологічний комфорт та когнітивну ефективність учасників освітнього процесу на рівні структури генетичних операторів, обмежуючись введенням штрафних доданків до цільової функції.

Це призводить до систематичної деградації антропоцентричної якості розкладу при кожному акті рекомбінації [1, 2].

У доповіді представлено антропоцентричний метод диспетчеризації (АМД) навчального процесу у ЗВО авіакосмічного профілю. В основі методу лежить багатокритеріальна цільова функція $F(x) = w_1 \cdot F_tech(x) + w_2 \cdot F_circ(x) + w_3 \cdot F_psych(x) + w_4 \cdot F_cogn(x)$, що формалізує баланс між технічними обмеженнями, циркадною узгодженістю, психологічним комфортом та когнітивною ефективністю. Метод реалізується гібридним еволюційним алгоритмом із трьома спеціалізованими компонентами: хронотип-зберігаючим оператором схрещування CPC (Chronotype-Preserving Crossover), антропоцентричним оператором мутації AWM (Anthropocentric Weighted Mutation) та механізмом адаптивного навчання SRA (Satisfaction Regression Adaptation) [2].

Наукова новизна результатів полягає у формальному описі інваріантів збереження циркадної узгодженості та когнітивної якості безпосередньо у структурі генетичних операторів, що принципово відрізняє запропонований підхід від методів на основі штрафних доданків [1]; у розробці механізму адаптації вагових коефіцієнтів на основі регресійного аналізу зворотного зв'язку з учасниками; та в експериментальному підтвердженні синергетичного ефекту поєднання доменно-орієнтованих операторів із механізмом адаптивного навчання.

Список літератури

1. Burke E. K. Recent research directions in automated timetabling / E. K. Burke, S. Petrovic // European Journal of Operational Research. – 2002. – Vol. 140, no. 2. – P. 266–280.

2. Eiben A. E. Introduction to Evolutionary Computing / A. E. Eiben, J. E. Smith. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2015. – 302 p.

МЕТОД ТОКЕНІЗАЦІЇ ДОСТУПУ ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ ІТ-КОМПАНІЇ

Єрьоменко А.Д., Феоктистова О.І.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

У доповіді розглянуто проблему забезпечення безпечного та гнучкого контролю доступу до інформаційних ресурсів у корпоративних системах ІТ-компаній. Показано, що традиційні моделі контролю доступу, зокрема рольова (RBAC) та атрибутна (ABAC), мають обмеження в умовах розподілених середовищ, динамічних змін ролей користувачів та зростання внутрішніх і зовнішніх загроз [1].

Запропоновано метод токенізації доступу до інформаційних ресурсів, який базується на використанні блокчейн-технологій та смарт-контрактів. Метод передбачає представлення прав доступу у вигляді цифрових токенів, що містять інформацію про дозволені операції, часові обмеження та контекст використання. Перевірка прав доступу здійснюється шляхом валідації токенів за допомогою смарт-контрактів, що забезпечує автоматизацію процесу прийняття рішень.

Показано, що використання permissioned-блокчейн-мереж дозволяє реалізувати децентралізовану модель управління доступом без єдиної точки відмови. Забезпечується незмінність записів про надання та використання прав доступу, що створює можливість проведення аудиту дій користувачів у режимі реального часу. Визначено, що запропонований метод забезпечує реалізацію принципу мінімально необхідних привілеїв за рахунок динамічного управління токенами доступу. Застосування криптографічних механізмів та розподіленого зберігання ключів підвищує рівень захищеності інформаційних ресурсів.

Метод може бути застосований для організації доступу до внутрішніх корпоративних систем, API, систем електронного документообігу та хмарних сервісів. Його використання сприяє підвищенню рівня довіри між учасниками взаємодії, зниженню ризиків несанкціонованого доступу та покращенню керованості доступом у складних ІТ-інфраструктурах.

Разом із тим, відзначено, що впровадження методу пов’язане з необхідністю інтеграції блокчейн-рішень у існуючі системи, можливими затримками обробки транзакцій та врахуванням нормативних обмежень щодо захисту персональних даних.

Список літератури

1. Ilechukwu Chialuka, Hong Sung-Chul. Financial Document Authentication and Verification Using Hierarchical Tokenization on Permissioned Blockchains // Journal of Risk and Financial Management. – 2026.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ОПЕРАЦІЇ ПОШУКУ В АВЛ ДЕРЕВІ ДО ФОРМИ ДЕРЕВА

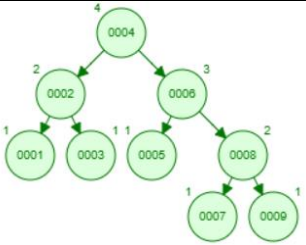
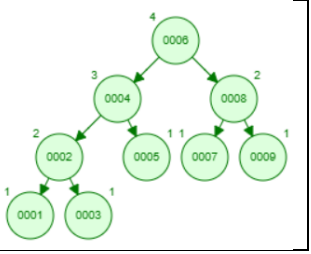
Шостак А.В.
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Контейнер типу АВЛ дерево широко використовується в системах пошуку та обробки даних як структура, що самобалансується, що забезпечує логарифмічну швидкість виконання операцій пошуку, вставки та видалення [1, 2].

У роботі виконується експериментальна оцінка та аналіз впливу форми АВЛ дерева на час виконання операції пошуку. Як показники форми дерева розглядалися висота дерева, середня глибина вузлів дерева та дисперсія глибини. Відомо [2], що при заданій кількості вузлів АВЛ дерева n висота дерева h знаходиться в інтервалі від $h_{min}=\lg(n+1)$ до $h_{max}=1.4404\cdot\lg(n+2)-0.3277$, при цьому при фіксованих n та h середня глибина вузлів дерева та дисперсія глибини також можуть відрізнятися. При цьому для всіх цих різних форм дерева виконується інваріант АВЛ дерева abs(bf)<=1, де bf – різниця висот вузлів дерева. Так, наприклад, при числі вузлів n=1000 можуть бути побудовані дерева АВЛ висоти 9, 10, 11, 12, 13. Висота h=9 для n=1000 вузлів відповідає канонічній формі дерева. Точна висота побудованого АВЛ дерева визначається порядком вставки вузлів у дерево.

У табл. 1 для n=9 представлені два АВЛ дерева на тих самих ключах, форма яких визначається послідовністю вставки ключів.

Таблиця 1 – Приклад залежності візуального подання АВЛ дерева від порядку вставки ключів

Послідовність вставки ключів	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1
АВЛ дерево		

Для побудови дерева заданої висоти h застосовувалася керована онлайн-вставка вузлів із параметром форми α, α∈[0, 1]. Залежність висоти дерева h від параметра монотонна. При α=0 забезпечується вибір медіанних ключів і побудова канонічного дерева висоти $h=h_{min}$, при $\alpha\to1$ забезпечується побудова максимально витягнутого дерева, тобто $h\to h_{max}$.

В роботі досліджувався вплив форми АВЛ дерева на середній час пошуку ключа для двох сценаріїв. Для фіксованого числа вузлів n=10000 та висоти h будувалося АВЛ дерево за допомогою послідовності вставок, що забезпечуються керованими вставками з параметром α. Перший сценарій пошуку реалізує пошук ключів присутніх у дереві, в цьому випадку пошук по дереву може зупинятися раніше. Другий сценарій пошуку передбачає пошук ключів відсутніх у дереві, в цьому випадку завжди виконується прохід по дереву до листа. Для кожної з висот $h_{min} \le h < h_{max}$ для усереднення часу пошуку генерувалося t=20 дерев.

У табл. 2 представлена залежність середнього часу пошуку Tms для двох сценаріїв, середньої глибини вузлів avgD та дисперсії глибини varD від можливих висот h АВЛ дерева для n=10000, k=1000, t=20.

Таблиця 2 – Залежності Tms, avgD та varD від h для операції пошуку в АВЛ дереві

Сценарій	h	Tms	avgD	varD
1	13	0,0929	11,3631	2,2131
2	13	0,0728	11,3631	2,2131
1	14	0,0938	11,4438	2,3834
2	14	0,071	11,445	2,3863
1	15	0,0961	11,726	3,0263
2	15	0,0765	11,6865	2,9536
1	16	0,0944	12,0088	3,6685
2	16	0,0752	12,0324	3,7366
1	17	0,0969	11,8647	3,6661
2	17	0,0782	11,872	3,6811

Дослідження показало (табл. 2), що перший сценарій пошуку повільніший за другий сценарій приблизно до 24 відсотків незалежно від висоти. Зростання часу пошуку для першого сценарію для зазначеного діапазону висот склало трохи більше 4 відсотків, для другого сценарію - трохи більше 7 відсотків.

Середня глибина вузлів дерева та дисперсії глибини зростають із збільшенням висоти дерева, але вплив цих показників форми на час пошуку невідчутно мало на тлі впливу висоти АВЛ дерева з асимптотикою O(h).

Список літератури

1. Brown Russell A. Comparative Performance of the AVL Tree and Three Variants of the Red-Black Tree. Software: Practice and Experience, 2025, Vol. 55(9). P. 1607-1615. https://doi.org/10.1002/spe.3437

2. Knuth D.E. Art of computer programming – V. 3: Sorting and Searching. Second Edition, Massachusetts: Addison-Wesley, 1998, 780pp. ISBN 0-201-89685-0

AGILE MANAGEMENT AND INFORMATION INTEGRATION IN MODERN STRUCTURED ORGANIZATIONS

Dadashov A.S., İsrayilova N.M.
Military İnstitute named after H.Aliyev, Baku Azerbaijan

Modern structured organizations operate in an environment defined by volatility, digital transformation, increasing structural complexity, and the growing need for rapid and evidence-based decision-making. Under such conditions, traditional rigid management models often prove inadequate because they rely on long decision cycles, fragmented communication, and limited adaptability to change. For this reason, agile management has gradually evolved from a software-development approach into a broader organizational philosophy centered on responsiveness, iterative coordination, collaboration, and continuous adjustment. The foundational values of agility, first articulated in the Agile Manifesto, emphasize individuals and interactions, working outcomes, collaboration, and response to change rather than excessive procedural rigidity [1]. Later conceptual work also showed that agility should be understood not simply as speed, but as a structured organizational capability combining responsiveness, learning, flexibility, and value-oriented adaptation [2].

In contemporary management research, agility is increasingly treated as a strategic organizational characteristic rather than a narrowly technical method. Organizations are considered agile when they can sense environmental change, interpret shifting conditions, and respond in a timely and coordinated manner. This view has been strongly developed in the literature on enterprise agility, which describes agility as a multidimensional capacity involving flexibility, integration, responsiveness, and a supportive organizational culture. From this perspective, agile management is not limited to operational techniques such as short cycles or iterative reviews.

It also includes managerial decentralization, cross-functional communication, continuous feedback, and the ability to reorganize priorities in response to evolving conditions.

Therefore, the study of agile management in modern structured organizations requires attention not only to behavioral and procedural issues, but also to the informational foundations on which such adaptability depends [3][4].

The purpose of this abstract is to examine the interdependence between agile management and information integration in modern structured organizations and to explain how this relationship influences decision-making speed, coordination quality, organizational adaptability, and managerial effectiveness. The central argument is that agile management cannot function as a real and sustainable organizational capability unless it is supported by an integrated information environment. In other words, management agility depends not only on leadership behavior and procedural flexibility, but also on the timely availability, consistency, visibility, and interoperability of organizational information [3,5,6]. When these

informational conditions are absent, agile management tends to remain formal or rhetorical rather than operationally effective.

The analysis is based on a systems approach, conceptual synthesis, and interpretation of major contributions from the literature on agility, enterprise integration, strategic information alignment, and digital transformation. A systems approach makes it possible to view the organization as a set of interconnected subsystems including management, operations, information processing, coordination, and feedback. Within such a system, decisions do not emerge solely from managerial authority. They also depend on how information is generated, shared, integrated, interpreted, and transformed into coordinated action. Research on enterprise agility has consistently shown that information technology plays an enabling role in helping organizations sense and respond to change [3]. Related work on strategic information technology alignment further suggests that organizational agility is strengthened when technological resources are aligned with business priorities and when information systems support adaptive coordination rather than isolated departmental routines [5].

The findings indicate that information integration represents one of the principal operational foundations of agile management. Agile structures require short decision cycles, continuous reassessment, and rapid coordination among different units. However, these features are only possible when information flows are synchronized across organizational boundaries. If different departments rely on disconnected platforms, incompatible data formats, or delayed reporting channels, then managerial responsiveness is weakened even when the declared management philosophy is agile. In such cases, iterative planning becomes superficial, feedback loops become slow, and cross-functional collaboration is constrained by informational asymmetry. By contrast, integrated information environments make it possible to create a shared situational picture for decision-makers, reduce informational delays, and support faster adaptation to change [5, 6].

A major practical implication of this relationship is that agile management should be understood as inseparable from informational visibility. In modern structured organizations, leaders are expected to revise priorities quickly, reallocate resources, detect risks early, and coordinate multiple units under changing conditions. These tasks require access to coherent and timely information rather than fragmented departmental reports. Research on enterprise integration and interoperability demonstrates that information systems capable of connecting processes, units, and data sources improve coordination and reduce inconsistencies in organizational action [6]. In this sense, information integration is not merely a technical infrastructure issue. It is also a managerial condition for informed responsiveness, because agility without informational coherence produces unstable decisions and weakens execution quality [3, 6].

The analysis also shows that information integration must not be reduced to software compatibility alone. Many organizations invest in digital platforms but still fail to achieve agility because information remains culturally or institutionally fragmented. Units may protect their data, interpret indicators differently, or resist

transparent information sharing. Under such circumstances, technical integration does not automatically produce managerial integration. This point is consistent with broader reviews of enterprise agility, which stress that organizational culture, human resources, management commitment, and integrative structures are as important as formal systems [4]. Therefore, the relationship between agile management and information integration must be viewed at two levels simultaneously: the technological level of interoperability and visibility, and the organizational level of trust, collaboration, and shared interpretation.

Another important result concerns the link between agile management, information integration, and digital transformation. Recent reviews of digital transformation show that digital change is not simply about adopting new technologies, but about reconfiguring organizational processes, structures, and decision logics around digitally enabled information flows [7, 8]. This means that digital transformation becomes effective only when integrated information architectures support coordination, visibility, and adaptation. Agile management benefits from digital transformation because digital tools can shorten feedback cycles, expand analytical transparency, and facilitate cross-functional collaboration. At the same time, digital transformation needs agile management because technological change requires iterative implementation, rapid learning, and adaptive governance [7-16]. Thus, information integration functions as the bridge that connects the managerial side of agility with the technological side of transformation.

The combined application of agile management and information integration creates several concrete advantages for modern structured organizations. First, it increases the speed of decision-making by reducing the time needed to collect and reconcile information. Second, it improves coordination quality because different organizational units operate on the basis of more consistent data. Third, it strengthens adaptability by enabling faster recognition of change and more iterative adjustment of plans. Fourth, it supports transparency in resource allocation and performance monitoring. Fifth, it improves organizational learning by making feedback more visible and actionable [3,5,7]. However, the same analysis also reveals several constraints, including fragmented legacy systems, low data quality, cybersecurity concerns, excessive centralization of authority, and staff resistance to new patterns of information sharing [6-8]. These barriers show that agility and integration are not automatic outcomes of technology adoption, but the result of deliberate managerial and institutional design.

In conclusion, agile management and information integration should be treated as two strategically interdependent components of a unified organizational system. Agile management provides the logic of adaptive action, short coordination cycles, and continuous adjustment. Information integration provides the informational basis that makes such action possible in practice. Without integrated information, agility loses precision and becomes unstable; without agile management, information integration remains underused and fails to produce strategic value. Therefore, organizations seeking resilience, adaptability, and managerial effectiveness should combine agile principles with interoperable information systems, transparent data

flows, cross-functional coordination, and continuous feedback mechanisms. Only under these conditions can agility move beyond a managerial slogan and become a real source of organizational advantage [3,5-7].

References

1. Beck, K., et al. (2001). *Manifesto for Agile Software Development*.
2. Conboy, K. (2009). Agility from first principles: Reconstructing the concept of agility in information systems development. *Information Systems Research, 20*(3), 329-354. https://doi.org/10.1287/isre.1090.0236.
3. Overby, E., et al. (2006). Enterprise agility and the enabling role of information technology. *European Journal of Information Systems, 15*(2), 120-131. https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000600.
4. Sherehiy, B., et al. (2007). A review of enterprise agility: Concepts, frameworks, and attributes. *International Journal of Industrial Ergonomics, 37*(5), 445-460. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.01.007.
5. Tallon, P. P., & Pinsonneault, A. (2011). Competing perspectives on the link between strategic information technology alignment and organizational agility: Insights from a mediation model. *MIS Quarterly, 35*(2), 463-486.
6. Panetto, H., & Cecil, J. (2013). Information systems for enterprise integration, interoperability and networking: Theory and applications. *Enterprise Information Systems, 7*(1), 1-6. https://doi.org/10.1080/17517575.2012.684802.
7. Plekhanov, D., et al. (2023). Digital transformation: A review and research agenda. *European Management Journal, 41*(6), 821-844. https://doi.org/10.1016/j.emj.2022.09.007.
8. Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems, 28*(2), 118-144. https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003
9. Dadashov A. (2023). Designing military engineering training based on the model of didactic justification. Journal of Defense Resources Management. 2023. 14:2 (281), p.87-96
10. Dadashov A. S. Integration of new technologies into the teaching methods of engineering education in military institutions //Modern directions of development of information and communication technologies and management tools. 14th International Scientific and Technical Conference. – 2024. – T. 2. – C. 3-6.
11. Dadashov A. Applying didactic teaching principles to professional engineering education in military higher education institutions //Journal of Defense Resources Management (JoDRM). – 2024. – T. 15. – №. 2. – C. 152-163.
12. Agayev, S.O., et al. (2016). Modern pedagogical technologies in military education. Textbook. Part I. *Baku: Military Publishing House*.
13. Piriyev, H.K., et al. (2014). Some issues of pedagogical staff training for special-purpose higher education institutions. *Military knowledge*, (4), 3-9.
14. Piriyev, H.K., et al. (2016). Provide interactive training methods. Methodological materials. *Baku: Military publishing house*.
15. İbrahimov R.İ. Artificial intelligence applications in higher education: prospects for personalized learning and governance efficiency / Grail of science. 2025, N55. Pp.601-614. DOI 10.36074/grail-of-science.22.08.2025.071
16. Piriyev H.K. et al. Some aspects of optimization of control / Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Proceedings of 14-th International Scientific and Technical Conference. Volume 1. 2024. -pp.18-19.

ANALYSIS OF THE OPERATION 5G MOBILE CELLULAR NETWORKS

Nabiyeva A.N., Hamidova A.A.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan

In wireless networked control systems, ensuring timely and reliable state updates from distributed devices to remote controllers is essential for robust control performance [1, 2].

Development of sixth-generation networks entails a paradigm shift towards intelligent wireless networks capable of supporting emerging applications such as autonomous vehicles [1] and smart factories [3].

These applications will strain the capacity of the current networks 5G, primarily due to the high-dimensional nature of transmitted data, such as images and video frames. This comes in tandem with the rapid advancement in artificial intelligence and its remarkable impact on communication and control systems, driving the need for AI-native and control-aware network design [4, 5-9].

Hence, the convergence of control and AI is becoming essential for future wireless networks. The issue of optimizing wireless networks for remote control of distributed devices has gained significant attention in the literature.

Typically, sensors transmit their raw states to remote controllers, which then compute and transmit control actions to satisfy control tasks. Recent approaches employ deep learning to improve communication efficiency through extractingand transmitting low-dimensional representations instead of raw device states [3].

Now let's look at the analysis of the operation of the 5G Wireless Communication System. We consider a sparse clutter and a high base stationIndoor Factory scenario, where the devices are randomly distributed within the coverage area of base station (BS) [1, 3].

The controllers are assumed to be located on a distant cloud server with negligible communication delay between the cloud server and BS. The devices and BS communicate through wireless channels. The channel between the device and BS follows a standard path loss and Rayleigh block fading [1,5], where the channel gain remains constant over the time interval of τ_0 but varies independently across different time intervals. The received signal-to-noise ratio (SNR) at time $t = k \cdot \tau_0$ is given as:

$$SNR(P, N_c) = (10)^{-\frac{PL_{dB}^{Los}}{10}} \cdot \frac{P\left|H_{i,k}\right|^2}{N_c}, \quad (1)$$

where P denotes the fixed transmission power, Hi,k , represents the Rayleigh flat-fading channel between the device i and BS at time k, PL_{dB}^{Los} represents the nonlineof-sight path loss, and N_c denotes the additive white Gaussian noise power.

The uplink channel capacity for device i at time k is given as [1]:

$$C_{\max}(P, \Delta F_i) = \Delta F_i \cdot \ell og_2[1 + SNR(P, N_c)] \ , \quad i = \overline{1, n} \ , \tag{2}$$

where ΔF_i denotes the allocated transmission bandwidth and equal:

$$\Delta F_i = F_n - F_{n-1} .$$

A transmission outage occurs when $R_{i,k}$ falls below a predefined threshold $E(R)$. Then, the transmission outage probability is given as

$$P_{i,k} = P[C_{\max}(P, \Delta F_i) < E(R)] \ , \tag{3}$$

From formulas (1), (2) and (3) it is clear that the performance indicators of a 5G mobile communication network depend on the channel condition, transmission power and allocated bandwidth.

Hence, efficient utilization of wireless resources is fundamental to minimizing transmission failures and ensuring reliable uplink transmission for maintaining robust control performance.

References

1.Ibrahimov, B. G., et al. (2023, June). Research and analysis criterion quality of service and experience multifractal traffic using fuzzy logic. In *Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications.2022, Baku, Azerbaijan, Vol. I* (pp. 387-397).

2.Abanoub M. Girgis, Ibtissam Labriji and Mehdi Bennis. Hierarchical JEPA Meets Predictive Remote Control in Beyond 5G Networks. arXiv preprint arXiv:2101.11647, no 1, 2026.pp.1-6.

3.Ibrahimov, B., Nabieva, A., & Hamidova, A. (2024). Research Efficiency Functioning Wireless Cellular Networks Taking into Account Modern Energy Saving Technologies. *Engineering Headway*, *7*, 149-155.

4.İbrahimov B.G. Special purpose machine learning and data mining methods. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 2: sections 2. p.90

5.Ibrahimov B.G. Information security research special-purpose telecommunication systems using machine learning technology. *In* Problems of informatization. 2024. Vol 1: sections 1, 2, 3. p.87-88.

6.Hasanov A.H. et al. Research monitoring methods of information systems and networks special purpose. *In* Problems of informatization. 2024. Vol. 1. p.85-86.

7.İbrahimov B.G. et al. Research and analysis mathematical model of the demodulator for assessing the indicators noise immunity telecommunication systems // - Kharkov: Advanced İnformation Systems. – 2024, vol.8, N4. – pp.20-25.

8.İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. - Харків: -2023, Том 2: - pp.4-5

9.Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

ANALYSIS OF AN INFORMATION SECURITY MODEL IN MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Ibrahimov B.G.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan
Javadova M.M.
Azerbaijan Construction and Architecture University

According to research, the use of social engineering methods is the most effective way to breach information security (IS) [1]. Every year, along with the development of information technology, techniques for bypassing information security systems are refined, and new vulnerabilities are discovered in software products that can be exploited by attackers through the human factor [1, 2].

An information security violator (attacker or intruder) in the context of this article is a person - or group of persons planning to use social engineering methods to commit actions that result in a violation of information security when it is processed by technical means in multi-service communication networks [3, 4].

This paper describes a model of an information security intruder in multi-service communication networks using social engineering methods, as well as the characteristics of a person susceptible to a social engineering attack that may influence the outcome of the attack [2].

Based on the above, it can be argued that despite the organizational and software-technical measures taken to counter threats emanating from social engineering, existing measures demonstrate insufficient effectiveness.

The set-theoretical models presented in this article, created based on practical experience in combating threats emanating from social engineering, allow us to understand the causes that serve as the initial stage of a social engineering attack, develop methods for detecting the initial stage of attacks, and formulate the responsibilities assigned to information security departments to prevent these types of threats [1, 2, 4-11].

A comprehensive model of protection against an SI attack can be represented as follows [1, 3]:

$$(SI)_{\text{mod.}} = W\{I, U, A, E, M, P\}, \quad (1)$$

where each element of the model corresponds to a set of: I – attacker parameters;U – attackee parameters; A – attack characteristics; E – transmission medium characteristics; M – countermeasures; D – information security tools.

An attacker is an information security violator using social engineering methods and possessing the following characteristics: potential, access to the environment, and location. An attacker's potential provides insight into the following concepts: qualifications, knowledge of information security tools (necessary to develop methods to bypass them), and resources to carry out an attack. Attacker parameters are described as follows:

$$I = \{I_p, I_e, I_C\} \quad , \quad (2)$$

where I_p is the potential, I_e is access to the environment, and I_c is the location in the country (determines the feasibility of applying physical and organizational protective measures).

Here, the I_p parameter takes the values high, medium, and low. In this case, if the attacker is located abroad, access to the environment is determined by the (3):

$$I_e \subseteq E_{ed}, \tag{3}$$

where E_{ed} is a subset of software and hardware (remote) communication channels.

Thus, the proposed model examines information security processes in multiservice communication networks under various attacks, which allows for the creation of a methodological basis for improving the information security system, based on the study and analysis of attacker capabilities.

References

1.Ibrahimov, B. G., Hashimov, E. G., & Akhundov, R. G. (2025). Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats.

2.Gasimov V.A., Mammadzada N.F., Mammadov J.I. Method of hidden transmission of information based on fractals and its software. Tomsk State University Journal of Control and Computer Science, № 65, 2023, pp. 95-104.

3.Ibrahimov, B. G., & Tahirova, K. M. (2022). Method for calculation maximum throughput hidden channels in systems of steganographic communications. *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*, *16*(9), 40-45.

4.Yusifbayli, N., Guliyev, H. Intellectual voltage management in electrical networks. Isgt Innovative smart grid technologies europa 2011, IEEE, PES, Manchester UK, 05-07 December 2011.pp.235-246.

5.Abbasov, V., Amirov, F., Amirli, S., Hasanli, S., Frana, K. Formation of Shaft Accuracy during Mechanical Processing on CNC Machines. Advances in Science and Technology, 2024, 148, pp. 81–86

6.İbrahimov B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2. p.4-5

7.Ibrahimov B.G. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

8.Ibrahimov B.G. et al. Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.10-11

9.Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30

10. Hashimov E.G. (2026). Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*, *10*(1), 66–71. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.08

11. Ibrahimov B.G. Research quality of functioning of the efficiency optical telecommunication systems using spectral technologies. *In* Проблеми інформатизації. 2023. Т.1. – С. 29-30.

RESEARCH INTO CONTROL OF RECEPTION, PROCESSING AND TRANSMISSION MESSAGES USING UAVs

Ibrahimov B.G., Nadirov U.M., Namazov M.B., Mehdiyev A.A., Humbatov R.M.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan

This paper examines the challenges researching methods for collecting, processing, and delivering data from devices wireless wearable sensor networks using UAVs via a repeater using network coding. This method increases the coverage area of the data collection network and reduces the number of transmitted packets during active interaction between devices, collection nodes, and the data center, leading to reduced data delivery latency in an electronic warfare environment [1, 2]. In this case, the principles of network coding in the end and intermediate nodes of UAVs for receiving and transmitting packets represent linear transformations data packets using mathematical operations to reduce the volume of traffic transmitted over the network for message security and to reduce data transmission delays [2]. The center of the network for collecting, processing and transmitting messages from UAV sensors, in particular communication networks (wireless body sensor networks,WBS), is the data collection center (DC), which manages the procedure for receiving, collecting, transmitting, storing and processing the received data. When using a WNS in areas not covered by a radio access network, it is necessary to deploy a dedicated wireless network to collect data from the WNS using UAVs. To increase network deployment speed and eliminate the need for buildings or utility poles in the area, collection nodes can conveniently be implemented using an unmanned aerial platform (UAP) using a switch and optical signal transmission controllers [1, 2].

This method allows the collection node to be placed at an optimal location and altitude for the area being covered, and, if necessary, to be relocated during operation in the presence of an electronic warfare environment. The proposed structure for organizing the UAV-based data collection, transmission, and reception system is shown in Fig. 1. This structural diagram (Fig. 1) is of a UAV, which consists of the following important control aircraft devices using the principles of wireless networks: Stationary Unmanned Aerial Platform - SUAP, Data Collection Center – DCC, Mobile UAP - MUAP, Wireless Body Sensor Network –WBSN.

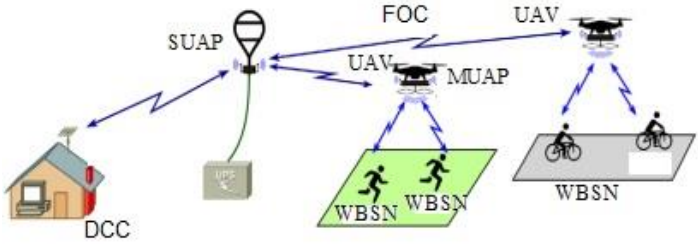


Figure 1. Block diagram for a system for collecting, transmitting and receiving data using optical UAVs

The structural diagram is designed for a system for collecting, transmitting, and receiving data using optical UAVs in an electronic warfare environment. The center of the network for collecting, receiving, processing, and transmitting information from UAV sensors, particularly UAV networks, is the data collection center. It manages the collection process, stores, transmits, and processes received optical messages.

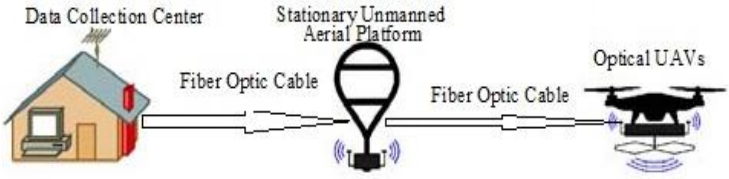


Figure 2. Structural and functional diagram of a UAV using FOC

The structural and functional diagram (Fig. 2) consists of the following modules: Optical UAVs, Stationary UAVs and Data collection center, system Fiber Optic Cable (FOC).

References

1. Abanoub M. Girgis, Ibtissam Labriji and Mehdi Bennis. Hierarchical JEPA Meets Predictive Remote Control in Beyond 5G Networks. arXiv preprint arXiv:2101.11647, no 1, 2026.pp.1-6.

2. Ibrahimov, B., Nabieva, A., & Hamidova, A. (2024). Research Efficiency Functioning Wireless Cellular Networks Taking into Account Modern Energy Saving Technologies. *Engineering Headway*, *7*, 149-155.

3. Hashimov E.G. et al. About some aspects of using a flock of UAVs. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023. Т. 1. С. 4-5.

4. İbrahimov B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. In Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Т.2. 4-5.

OPTIMIZATION METHODS FOR VELOCITY-SELECTIVE FILTERS

Huseynov A.G.[1,2], Mirzazade N.B.[2], Suleymanov İ.İ.[1], Kishiev H.T.[1]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

The article proposes many different methods for optimization. However, only the most well-known approaches that are more widely used in practice are briefly reviewed here. The method used for optimizing frequency-selective filters is chosen depending on the filter structure, application area, and design objective. In practice, these filters are mainly divided into two major groups: **FIR (Finite Impulse Response)** and **IIR (Infinite Impulse Response)** filters.

FIR filters are filters with a finite impulse response. One of the most widely used methods for designing these filters is the Remez, or equiripple, method [1], [2].

The main objective of this method is to minimize the maximum error between the desired frequency response and the actual obtained response. The term "equiripple" refers to the error being distributed at approximately the same level across different frequency bands. For this reason, this method is considered very efficient when the requirements for the passband and stopband are specified precisely. It is especially preferred when controlling the maximum error is important.

Another important approach for FIR filters is the least-squares method [1, 2]. In this method, the goal is not to reduce the maximum error, but rather to minimize the sum of the squared errors over the entire frequency range. In other words, this approach does not aim to improve the worst-case result at individual points, but instead seeks to improve the overall fit. Therefore, the least-squares method is considered more suitable in cases where average accuracy and overall approximation in the frequency domain are more important. Convex optimization methods are also widely used in the design of FIR filters with more complex requirements [3]. In this approach, the problem is formulated mathematically in such a way that the solution becomes more stable, reliable, and controllable. One of the main methods used in this area is **SOCP (Second-Order Cone Programming)**. The advantage of such methods is that passband ripple, stopband attenuation, and other technical requirements can be incorporated directly into the optimization problem. This makes them especially relevant in FIR design problems that are difficult to solve using classical methods.

IIR filters are filters with an infinite impulse response. The optimization process for these filters is more complex compared to FIR filters. The reason is that it is not enough to achieve only the required frequency response; the stability of the filter must also be strictly preserved [4]. For this reason, one of the most practical and modern approaches for IIR filters is constrained nonlinear optimization. Here, the term "nonlinear" means that the relationship between the parameters and the result is not expressed in a simple linear form. "Constrained" means that the solution must not only improve the objective function, but also satisfy stability and other technical requirements. One of the widely used methods in IIR design is **SQP (Sequential Quadratic Programming)**. This method does not solve the complex nonlinear problem directly. Instead, at each iteration, it constructs and solves a simpler quadratic subproblem that approximates the original one. This feature allows the SQP method to take into account both the objective function and the given constraints at the same time. Therefore, this approach is considered highly useful in practical applications. Another important class of methods is trust-region methods. In this approach, the algorithm relies on a model constructed only in the neighborhood of the current point and selects the step within that region. As a result, the iteration process becomes more stable and reliable, which is a significant advantage in complex optimization problems.

The **BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno)** and **L-BFGS (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno)** methods are quasi-Newton type approaches [4]. Instead of computing second derivatives exactly, these methods approximate them. As a result, the computational burden is reduced while maintaining a satisfactory convergence rate.

These methods are particularly practical for large-scale and complex optimization problems. When frequency-selective filters operate with time-varying signals, adaptive filtering methods are applied. In this case, the filter coefficients are not fixed in advance; instead, they are updated during operation according to the current characteristics of the signal. This feature makes adaptive filters more suitable for dynamic environments. One of the most widely used methods in adaptive filtering is **LMS (Least Mean Squares)** [5,6]. This method calculates the error in the output signal and updates the coefficients step by step in a direction that reduces this error. The main advantage of the LMS method is its simple structure and low computational requirements, which makes it widely used in real-time systems.

NLMS (Normalized Least Mean Squares) is an improved version of the LMS method [6]. In this approach, the update step is normalized according to the power of the input signal. As a result, the method operates more stably and provides more reliable results even when the signal level changes. This makes NLMS more practical for real-world applications.

RLS (Recursive Least Squares), compared to LMS, converges faster and typically yields a smaller error [5,6]. However, this advantage comes at the cost of higher computational complexity. Therefore, the RLS method is more suitable in cases where fast adaptation and high accuracy are required.

One of the more powerful approaches in adaptive filtering is the Kalman filter family [5-9]. In this approach, the system is treated as a time-varying model. At the same time, both measurement error and model uncertainty are taken into account.

The objective is not only to reduce the current error, but also to estimate the internal state of the system as accurately as possible. For this reason, the Kalman approach is of particular importance in signal-processing tasks involving tracking, estimation, and prediction in dynamic environments.

Thus, in modern practice, the Remez/equiripple, least-squares, and convex optimization methods are more commonly used for FIR filters. For IIR filters, constrained nonlinear optimization, especially SQP, trust-region, and BFGS/L-BFGS approaches, is considered more practical and effective. In the field of adaptive filtering, LMS, NLMS, RLS, and the Kalman family are among the main methods used [10–19]. These methods differ from one another in terms of their objectives. Some methods are aimed at reducing the maximum error. Others attempt to minimize the overall error. Still others make it possible to adapt to changing signal conditions. Therefore, in the optimization of frequency-selective filters, the choice of method should always be made in accordance with the specific technical requirements and application objectives.

References

1. Jiang, L., Weiss, S., & Tafaroji, S. R. (2020). An overview of FIR filter design in future multicarrier communication systems. Electronics, 9(4), 599. https://doi.org/10.3390/electronics9040599

2. Saber, M., Ghoneim, M. E., & Kumar, S. (2022). Survey on design of digital FIR filters using optimization models. Journal of Artificial Intelligence and Metaheuristics, 2(1), 16–26. https://doi.org/10.54216/JAIM.020102

3. Yan, S., Lu, Y., & Ma, J. (2004). A unified framework for designing FIR filters with arbitrary magnitude and phase responses using second-order cone programming. Digital Signal Processing, 14(6), 510–537. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2004.03.001

4. Agrawal, N., Kumar, A., Bajaj, V., & Singh, G. K. (2021). Design of digital IIR filter: A research survey. Applied Acoustics, 172, 107669. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107669

5. Nishiyama, K., Fukumoto, M., & Kobayashi, K. (2014). A unified view of adaptive algorithms for finite impulse response systems. Signal Processing, 99, 111–122. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.12.019

6. Nagal, D., & Kumar, A. (2017). A survey with emphasis on adaptive filter structure, LMS and NLMS adaptive algorithm for adaptive noise cancellation system. Journal of Engineering Science and Technology Review, 10(2), 183–192. https://www.jestr.org/downloads/Volume10Issue2/fulltext181022017.pdf

7. Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system // Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

8. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

9. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

10. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Пьезоэлектрических композиты для разработки на их основе приемно-передающих акустических антенн //Евразийский Союз Ученых. – 2015. – №. 5-3 (14). – С. 38-40.

11. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

12. Hashimov E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-132.

13. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

14. Muradov S. et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.

15. Bayramov A.A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

16. Hashimov E.G., et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. Advanced Information Systems. 2026. Vol. 10, No. 1.p. 66-71. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.08

17. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *İn* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». 2026. P.107-116

18. Rustamov A. et al. System technical solution of electromagnetic adaptation //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 1. – С. 86-90.

19. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DECISION SUPPORT IN MULTIDOMAIN MILITARY COMMAND AND CONTROL

Marko Radovanović
Military Academy, University of Defence in Belgrade, Belgrade, Serbia
Akhundov R.G.,
National Defense University, Baku, Azerbaijan
Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The growing complexity of the modern battlespace has fundamentally changed the requirements for military command and control. Contemporary operations unfold simultaneously across land, air, sea, cyber, and space domains, while decision-makers must process large volumes of heterogeneous and rapidly changing information under severe time constraints. In such conditions, traditional decision-support mechanisms often prove insufficient because they are limited by human cognitive capacity, fragmented situational awareness, and delayed analytical cycles. Against this background, artificial intelligence has emerged as a promising technological instrument for improving the speed, accuracy, and adaptability of military decision-making.

The relevance of this study is determined by the need to develop scientifically grounded approaches to the use of AI in multidomain command and control systems. The central objective of the research is to analyze the functional role of AI in decision support, identify its operational advantages and limitations, and substantiate the conditions under which its integration can increase the effectiveness of military command processes without reducing reliability, accountability, or human control.

Methodology

The study is based on a systems approach combined with structural-functional analysis of multidomain command and control processes. The research methodology includes conceptual modeling of the decision cycle, comparative analysis of traditional and AI-assisted command procedures, and logical synthesis of key technological and operational requirements for AI-enabled decision support systems. The analytical framework is built around several interrelated stages of the command process: data acquisition, information fusion, threat identification, option generation, risk assessment, and decision recommendation. Within this framework, AI is examined not as a substitute for command authority, but as a decision-support layer capable of enhancing information processing and forecasting under uncertainty. The study also applies elements of scenario-based reasoning in order to assess how AI tools may perform under conditions of incomplete information, dynamic threat evolution, adversarial deception, and limited decision time.

The first key argument of the study is that the main contribution of AI to multidomain command and control lies in its ability to reduce the gap between information availability and actionable understanding. In modern operations, commanders receive data from numerous sources, including reconnaissance

systems, sensors, communication networks, satellite assets, cyber monitoring tools, and battlefield reports. The practical problem is no longer the absence of information, but rather the difficulty of integrating it into a coherent operational picture. AI-based tools can significantly improve this process by detecting patterns, classifying events, identifying anomalies, and correlating signals from different domains faster than conventional rule-based systems.

The second argument is that AI can improve the quality of operational forecasting and alternative generation. In complex military environments, commanders rarely choose between clearly defined options. More often, they must evaluate multiple partial courses of action under uncertainty, while accounting for time, geography, force disposition, logistics, enemy intent, and possible escalation dynamics. Machine learning and probabilistic reasoning methods can support this task by identifying non-obvious dependencies, estimating likely threat trajectories, and ranking decision alternatives according to predefined operational criteria. This creates the basis for a more informed and adaptive decision cycle. The third argument concerns the importance of human-machine interaction. Despite the analytical advantages of AI, the study emphasizes that command decisions in the military sphere cannot be fully delegated to autonomous computational systems. The operational environment is shaped not only by measurable parameters, but also by strategic judgment, ethical constraints, legal responsibility, and political implications. Therefore, the most viable model is a human-centered architecture in which AI supports the commander by improving situational awareness and analytical depth, while final authority remains with the human decision-maker. In this context, explainability, traceability of recommendations, and the possibility of human override become essential design requirements.

The analysis also highlights several critical constraints. First, AI systems depend heavily on the quality, representativeness, and security of input data. In military conditions, data may be incomplete, distorted, delayed, or intentionally manipulated by an adversary. Second, algorithmic models trained in controlled environments may degrade in performance when exposed to novel combat situations. Third, excessive reliance on automated recommendations may create new vulnerabilities, including cognitive overtrust, reduced operator vigilance, and susceptibility to adversarial attacks on data pipelines or model behavior. For these reasons, the integration of AI into command and control must be accompanied by rigorous validation, resilience testing, and doctrinal adaptation. From an organizational perspective, the study shows that the effectiveness of AI-assisted decision support depends not only on software capability, but also on force structure, communication architecture, interoperability, and personnel training. AI tools can provide substantial value only when embedded in a broader command ecosystem capable of rapid data exchange, joint coordination, and disciplined decision execution. Thus, the military utility of AI is not purely technical, but systemic.

Results and Conclusions

The study confirms the hypothesis that artificial intelligence can significantly enhance decision support in multidomain military command and control by

accelerating information processing, improving threat assessment, and expanding the analytical basis for operational choices. At the same time, the research demonstrates that AI does not eliminate the need for human judgment and cannot be treated as an autonomous substitute for military command responsibility. The main conclusion is that the practical value of AI in this field is highest when it is implemented as a controlled, explainable, and resilient support instrument within a human-centered command framework. Its successful use requires not only algorithmic sophistication, but also secure data infrastructures, doctrinal clarity, validation under realistic operational scenarios, and proper operator training. The practical significance of the work lies in its applicability to the design of next-generation military command systems, staff decision-support platforms, and doctrinal approaches to multidomain operations. The results may be used as a conceptual basis for further research on trusted military AI, adaptive command architectures, and the integration of intelligent technologies into defense management processes.

References

1. Hashimov, E. et al. (2026). Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*, *10*(1), 66-71.

2. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

3. Piriyev, H. et al. (2025). Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро), 246-256.

4. Huseynov, M. et al. (2025). Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference (Vol. 2, pp. 114-115).

5. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

6. Bakhshali, V. I. et al. (2025). Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference (Vol. 4, pp. 94-96).

7. Sadiqli, A. B. et al. (2025). Gis-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference (Vol. 4, pp. 101-104).

8. Petrovski, A. A. et al. (2025). A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference (Vol. 4, pp. 97-100).

9. Rustamov, A. R. et al. (2025). A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference* (Vol. 4, pp. 80-82).

10. Sakov, A. A. et al. (2025). Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization: Proc. of the 13th International Scientific and Technical Conference* (Vol. 4, pp. 52-54).

11. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

12. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

13. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

14. Marko Radovanovich, et al. Application of the new hybrid model LMAW-GEDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army. Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing, -2024. Vol. 4 issue 1. p.16-31.

15. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

DIGITAL TWINS OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT FOR FAILURE PREDICTION AND SUSTAINMENT OPTIMIZATION

Amirov F.G., Ibrahimov B.G., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
Akhundov R.G.,
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The increasing technical complexity of modern weapons and military equipment has made lifecycle support, readiness management, and predictive sustainment central issues of defense capability. Recent U.S. defense and Army materials treat digital twins as a practical instrument for predictive maintenance, efficient repair operations, and lifecycle management rather than as a purely experimental concept. The Defense Business Board's 2024 report on the digital ecosystem explicitly states that digital twin systems should use detailed information from product lifecycle management and design systems to support predictive maintenance and enhanced AI/ML capabilities, while Army digital engineering assessments likewise connect digital twins with predictive maintenance and efficient repair operations for maintainers and sustainers. The objective of this study is to determine how digital twins can improve failure prediction, maintenance planning, and overall operational readiness of military systems.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based modeling of the sustainment cycle for weapons and military platforms. A digital twin is interpreted as a dynamically updated digital representation of a physical system that combines design data, operational parameters, maintenance history, and sensor-derived condition information. The analytical framework includes four interconnected functions: state monitoring, degradation assessment, failure prediction, and maintenance decision support. The study compares traditional scheduled maintenance with condition-informed and model-supported sustainment. The working hypothesis states that failure prediction

and sustainment efficiency improve when a digital twin integrates engineering data, operational observations, and lifecycle feedback into a single decision environment. This interpretation is consistent with current defense guidance that treats digital twins as part of a broader digital engineering and lifecycle ecosystem.

The first argument of the study is that the principal value of a military digital twin lies in its ability to connect engineering design with operational reality. In conventional support systems, maintenance decisions are often based on fixed intervals, generic assumptions, or fragmented technical records. Such an approach does not fully account for mission intensity, environmental stress, subsystem interaction, or cumulative degradation. By contrast, current U.S. defense materials describe the digital twin as being integrated into requirements, development, manufacture, engineering, test, and lifecycle management, and after fielding reflecting actual product performance. This means that the twin can function as a continuously refined representation of the system rather than as a static engineering model.

The second argument is that digital twins create the analytical basis for predictive rather than reactive sustainment. Army and AMCOM materials explicitly connect digital twins with predictive maintenance for aircraft and with improved readiness. In operational terms, this means that maintenance can be triggered not only by elapsed time or visible failure, but also by model-based indications of abnormal wear, performance drift, or elevated risk of subsystem malfunction. Such an approach is especially relevant for aircraft, armored vehicles, missile systems, and other platforms whose mission availability depends on early recognition of degradation patterns that may not yet have produced overt failure. The transition from scheduled intervention to prediction-supported intervention allows maintenance resources to be concentrated where they produce the greatest readiness effect.

The third argument is that the military usefulness of digital twins depends on data integration quality. A twin cannot support reliable prediction if it is disconnected from authoritative engineering baselines, incomplete sensor streams, repair records, or actual operating conditions. The Defense Business Board emphasizes a joint product lifecycle management environment as an authoritative source of truth, while NATO technical work on digital twin interoperability highlights the importance of connected digital representations and interoperability across defense systems. Therefore, the twin should be understood not merely as a model, but as a data-governed operational architecture. Without consistent digital thread continuity, prediction accuracy degrades and the twin risks becoming only a visualization tool rather than a sustainment instrument.

The fourth argument concerns decision support. A military digital twin has value not only when it detects degradation, but when it supports action. If the model can estimate probable failure windows, compare alternative maintenance timings, or identify components whose degradation most strongly affects mission readiness, commanders and sustainment personnel gain a more rational basis for intervention. Army digital engineering assessments specifically tie digital models to repair efficiency and sustainment planning, while broader defense digital ecosystem materials associate digital twins with AI-enabled lifecycle optimization. In this sense, the twin becomes a decision-

support layer connecting engineering insight with logistics and readiness management. At the same time, the study identifies important limitations. Prediction quality depends on sensor coverage, model fidelity, data governance, cybersecurity, and interoperability between technical and sustainment systems. NATO publications on digital twin interoperability and defense modeling indicate that interoperability remains a practical challenge, and defense budget materials show that digital twin applications are also being explored for operational technology cybersecurity contexts. This implies that a poorly integrated or poorly protected twin may introduce new vulnerabilities even while promising better maintenance efficiency. For military use, digital twins must therefore be tested not only for engineering accuracy, but also for resilience, security, and usability in real sustainment workflows.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that digital twins can significantly improve failure prediction and sustainment optimization for weapons and military equipment when they function as integrated lifecycle representations rather than isolated simulation models. Their practical value lies in linking design knowledge, real operational data, and maintenance history into a single analytical environment capable of supporting condition assessment, degradation forecasting, and maintenance prioritization. The main conclusion is that digital twins should be treated as a strategic sustainment capability for modern defense systems. Their effectiveness is highest when they are embedded in a broader digital engineering architecture with authoritative data, predictive analytics, secure interoperability, and direct connection to readiness management. The practical significance of the study lies in its applicability to aircraft, armored platforms, missile systems, naval assets, and other military equipment for which readiness, maintenance timing, and lifecycle cost are critical performance factors.

References

1. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

2. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

3. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

4. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

5. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

6. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

7. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

8. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

9. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

10. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

11. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

12. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

13. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

14. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

15. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

16. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

17. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

18. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

19. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

20. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69

21. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

22. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

23. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

24. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

25. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

26. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

HUMAN-MACHINE INTERACTION IN MODERN COMMAND SYSTEMS: DISTRIBUTION OF FUNCTIONS BETWEEN THE OPERATOR AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Hasanov A.H., Hasanov H.H., Akhundov R.G., Hashimov E.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

The growing complexity of modern operations has sharply increased the demands placed on military command systems. Contemporary commanders must process large volumes of heterogeneous data, coordinate actions across multiple domains, and make decisions under severe time pressure, uncertainty, and adversarial disruption. In this environment, the issue is no longer whether artificial intelligence should be introduced into command and control, but how functions should be distributed between human operators and AI-enabled systems. Official U.S. defense materials continue to frame AI as a means to enhance military decision-making and operations, while NATO's revised AI strategy emphasizes responsible adoption, interoperability, reliability, explainability, and governability in defense applications. NATO technical work also specifically addresses context-appropriate human involvement across the AI system lifecycle and notes that many defense applications of AI will employ a human-machine teaming approach. The purpose of this study is to determine how functions should be allocated between the operator and AI in modern military command systems so that speed, analytical depth, and adaptability increase without loss of control, responsibility, or operational trust.

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based assessment of military decision processes. The command system is examined as an integrated socio-technical environment that includes information acquisition, data fusion, threat recognition, course-of-action development, risk assessment, decision approval, and execution supervision. The analytical framework evaluates human-machine interaction through four dimensions: cognitive workload, analytical speed, decision quality, and controllability. The study compares three basic models: human-dominant command supported by automation, collaborative human-machine teaming, and AI-heavy decision support with retained human authorization. The working hypothesis states that the greatest operational effect is achieved when AI performs high-speed data processing, pattern recognition, prioritization, and recommendation, while the human operator retains responsibility for contextual interpretation, value-based judgment, escalation decisions, and mission authorization. This approach is consistent with NATO work on appropriate human involvement and with DoD policy that requires appropriate levels of judgment and care by DoD personnel in the development, deployment, and use of AI capabilities.

The first argument of the study is that modern command environments are characterized by cognitive overload rather than by lack of information. A commander may receive sensor feeds, ISR products, communications data, logistics updates, cyber indicators, and operational reports almost simultaneously. Under such

conditions, human cognition becomes a bottleneck if raw information is not filtered, correlated, and prioritized. U.S. defense and Army materials increasingly describe AI as a tool for accelerating command and control, enabling human decisions at machine speed, and supporting modernized military decision-making. This indicates that AI should not be viewed primarily as a replacement for the commander, but as an analytical amplifier that compresses the time required to transform dispersed data into usable operational understanding.

The second argument is that distribution of functions must be based on the differing strengths of humans and machines. AI systems are especially effective in high-volume data processing, anomaly detection, rapid comparison of alternatives, and recognition of weak patterns across multiple information streams. These capabilities make AI highly suitable for supporting intelligence fusion, route prioritization, anomaly flagging, and preliminary course-of-action generation. By contrast, human operators remain superior in contextual judgment, ethical reasoning, interpretation of ambiguity, appreciation of political and legal consequences, and adaptation when operational meaning changes faster than the model assumptions. NATO technical work on context-appropriate human involvement explicitly treats allocation of functions between human and AI agents as a central question for defense systems. Therefore, effective command architecture should not seek identical participation of both actors in every step, but differentiated allocation according to the nature of the task.

The third argument is that the most effective model is collaborative human-machine teaming rather than either manual control of all functions or excessive algorithmic delegation. Army analysis of AI integration into military decision-making notes both the opportunities of AI-enabled planning tools and the operational constraints associated with connectivity, electromagnetic contestation, and the realities of human-machine teaming in warfare. This suggests that AI can significantly improve planning and decision support, but only when the system is designed around real command conditions rather than laboratory assumptions. A collaborative model allows AI to perform information triage, predictive assessment, and option ranking, while the human validates intent, weighs uncertainty, and authorizes action. Such a structure reduces workload without eroding command responsibility.

The fourth argument concerns trust. Human-machine interaction in military command cannot be effective if operators do not understand the basis of AI recommendations or if they are unable to intervene when system outputs appear unsafe or inappropriate. NATO's revised AI strategy includes explainability and traceability, reliability, and governability among its Principles of Responsible Use. DoD responsible AI guidance likewise treats reliability, traceability, and governability as core requirements and links them to appropriate understanding, testing, and the ability to detect and avoid unintended consequences. As a result, the distribution of functions between operator and AI must be paired with interface design, explanation logic, and supervisory controls that allow the user to understand why a recommendation has been produced, how much confidence the system assigns to it, and under what conditions the output may become unreliable.

The fifth argument is that function allocation is not static across all command tasks. Some activities, such as information screening, data fusion, temporal prioritization, or anomaly detection, can be more heavily delegated to AI because speed and consistency are decisive.

Other functions, such as interpretation of strategic intent, use-of-force authorization, escalation management, and politically sensitive decision-making, require stronger human control. NATO research on human involvement across the AI lifecycle and broader defense work on human-machine collaboration both support the view that appropriate human participation depends on context, risk, mission type, and the potential consequences of error. Consequently, function allocation in command systems should be adjustable and risk-based rather than fixed by a single universal rule.

At the same time, the study identifies important limitations. AI-enabled command systems may fail under degraded data quality, network disruption, adversarial deception, or model brittleness in unfamiliar operational contexts. Army work on AI-supported decision-making highlights that adversaries will contest the electromagnetic spectrum and disrupt the connectivity required by many AI-enabled tools. In addition, poor human-machine interaction design can generate either overreliance on automation or excessive skepticism toward it. For this reason, effective command systems require not only algorithms, but also resilient communications, realistic testing, operator training, and doctrinal rules defining when AI recommendations should be accepted, challenged, or overridden.

The study supports the hypothesis that the most effective human-machine interaction model in modern military command systems is a differentiated and collaborative distribution of functions. AI provides the greatest value in high-speed processing, pattern recognition, prioritization, and analytical support, while the human operator remains essential for contextual interpretation, responsibility, and final command judgment.

The operational benefit of such an approach lies in faster decision cycles, lower cognitive burden, improved situational understanding, and more disciplined command under complex multidomain conditions.

The main conclusion is that function allocation between operator and AI should be designed as a risk-sensitive command architecture rather than as a purely technical automation problem.

The practical significance of the study lies in its applicability to AI-enabled command and control systems, decision-support platforms, mission planning tools, and the development of doctrinal requirements for trusted human-machine teaming in defense.

References

1. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

2. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

3. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

4. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

5. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

6. Hasanov A. H. et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 3. – С. 74-80.

7. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

8. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

9. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

10. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

11. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

12. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

13. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

14. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

15. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

16. Hashimov E. G. Destruction of enemy combat power in indeterminacy condition //Proc. of Vth International Scientific Technical conference "Modern development directions of data communication technology and control means. – 2015. – С. 23-24.

17. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

18. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

19. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

20. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

21. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

MACHINE LEARNING DECISION SUPPORT IN DEFENSE SYSTEMS

Ibidun C.A.[1], Nasirov E.V.[2], Akhundov R.G.[2], Hashimov E.G.[2,3]
Sol Plaatje University, Kimberley, South Africa
National Defense University, Baku, Azerbaijan
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

This article examines machine learning based decision support in defense systems through an integrated analytical framework that combines effectiveness measurement, threat resilience, and auditable governance. The study is motivated by the growing use of machine learning in cybersecurity, military logistics, and autonomous decision-making, where operational value depends not only on predictive accuracy but also on timeliness, stability under adversarial pressure, resource efficiency, and accountability. In defense settings, a technically accurate model cannot be considered operationally sufficient if it is vulnerable to false alarms, delayed reactions, manipulation of input data, or opaque decision logic. The aim of the study is therefore to develop a unified methodological structure in which machine learning solutions can be evaluated as operational decision mechanisms rather than as isolated technical models.

The methodology treats the defense system as a multi-component decision environment functioning under antagonistic conditions. A generalized objective function is introduced in which achieved operational benefit is balanced against risk and resource-economic cost. Within this structure, a unified set of EFG indicators is defined for the three main application domains. In cybersecurity, the key indicators include detection probability, false alarm rate, and response delay. In logistics, the framework evaluates on-time delivery probability, route resilience, and inventory balance. In autonomous decision mechanisms, the emphasis is placed on explainability, thresholds for human oversight, and constraints related to civilian risk. These indicators are normalized and linked to scenario-based evaluation, allowing structured comparison across nominal and adversarial regimes.

A central feature of the proposed framework is that machine learning performance is tested not only under ordinary operating conditions but also under deliberate adversarial influences such as data poisoning, adversarial examples, and sensor deception. For each scenario, the degradation trajectory of effectiveness indicators is assessed separately. The article shows that aggregate measures may conceal critical weaknesses in subordinate threat classes and that operational assessment should therefore be performed by sub-scenarios rather than by average values alone. The discussion further demonstrates that false alarms in cybersecurity create a dual burden by simultaneously increasing operational risk and resource consumption, while resilience gains in logistics often produce nonlinear cost escalation rather than proportional benefit.

The study also argues that auditability must be embedded directly into the decision cycle. Decision traces, input data, applied rules, and critical threshold crossings should be recorded systematically, and transfer to human oversight must

function as an internal control mechanism rather than as an external procedural formality. The overall conclusion is that machine learning can become a justified and effective instrument in defense systems only when three conditions are satisfied simultaneously: effectiveness is standardized through measurable EFG indicators, resilience is tested across adversarial scenarios, and governance is supported by audit, explainability, and human oversight. Under these conditions, machine learning based solutions acquire operational credibility and become suitable for real defense applications.

References

1. Ibrahimov B.G. Information security research special-purpose telecommunication systems using machine learning technology. *In* Problems of informatization. 2024. 1, 87-88.
2. Islamov, I., et al. Big data analytics and machine learning for predicting radiation and chemical threats in the military sphere. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (September 26, 2025; Kraków, Poland), 30–38.
3. Dergachov K., et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.75-78
4. Krikun, V.L., et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture / Problems of informatization. 2025, Vol. 2., section 3,7. p.120-121
5. Radovanović M. et al. Application of the new hybrid model LMAW-G-EDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army //Journal of decision analytics and intelligent computing. – 2024. – Т. 4. – №. 1. – С. 16-31.
6. Akhundov R.G., Hashimov E.G. Enhancing the physical protection of critical facilities through the integration of physical process models and machine learning. Grail of Science, № 61 (January 2026). P.722-731.
7. Huseynov B.S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan / Problems of informatization. 2025, Vol. 2., section 3,7. -p.p.132-134
8. Muradov S.A., Huseynov B.S., Akhundov R.G., Hashimov E.G. System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency / Problems of informatization. 2025, Vol. 2., section 3,7. p.124-126
9. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.
10. Hashimov E., Khaligov G. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
11. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116
12. Hashimov, E.G. et al. (2016). Terrain orthophotoplanes making for military objects revealing. *National security and military sciences*, *2*(4), 14-20.
13. Nasibov, Y.A. et al. (2019). Modelling of the rationally deployment of observing systems. *Сучасні інформаційні системи*, (3,№ 2), 10-13.
14. Hashimov, E.G. (2017). GIS technology and terrain orthophotomap making for military application. *Journal of Defense Resources Management*, *8*(2), 81-90.

INTEGRATED OPTIMIZATION OF WATER RESOURCE USE IN AZERBAIJAN

Teymurov M.A.[1], Hasanov A.H.[3], Hashimov E.G.[2,3], Akhundov R.G.[3]
[1]Institute of Geography, Baku, Azerbaijan
[2]Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
[3]National Defense University, Baku, Azerbaijan

Water resource optimization in Azerbaijan has become a strategic priority due to the combined influence of water scarcity, high agricultural demand, infrastructure losses, climate variability, and strong dependence on transboundary inflows. A substantial share of the country's available water originates outside national borders, which makes water management not only a technical issue, but also a matter of hydrological resilience, institutional coordination, and long-term resource security. Under such conditions, the traditional approach focused mainly on expanding supply is insufficient. The present study proposes an integrated conceptual framework for optimizing water resource use in Azerbaijan by treating the problem as a multicriteria management system that combines source sustainability, loss reduction, irrigation efficiency, intersectoral allocation, water quality, economic productivity, governance coordination, and digital monitoring.

The study is based on a conceptual-analytical methodology that synthesizes official statistical indicators, normative and strategic documents, international analytical reports, and water security diagnostic approaches. The empirical basis includes national statistical data on water withdrawal, consumption, and conveyance losses, as well as international assessments of irrigation use, agricultural demand, and climate-related pressures.

Within this framework, optimization is interpreted not as a simple reduction in water consumption, but as the simultaneous improvement of interconnected functional criteria across the entire chain from water source to final use. The proposed structure organizes the optimization problem into four principal blocks: the source block, the infrastructure block, the use block, and the management-control block. This structure is further translated into a phased decision model that includes data and monitoring, reduction of conveyance losses, irrigation modernization, wastewater reuse, and basin-based decision-making.

The analysis shows that the largest reserve for improving water efficiency in Azerbaijan lies in reducing structural losses within conveyance and irrigation systems rather than solely developing new water sources. High water losses demonstrate that without modernization of canals, pipelines, metering systems, and digital accounting, additional supply measures will have limited effectiveness. The study also shows that agricultural water use must be reconsidered through crop prioritization based on agroclimatic conditions, market value, and water productivity. Equally important are basin-based governance, real-time monitoring, scenario planning under dry and wet year conditions, and the expansion of wastewater treatment and reuse as a supplementary resource.

The study concludes that water resource optimization in Azerbaijan should be implemented as an integrated and staged governance model rather than as a fragmented set of isolated engineering measures. Its strategic effectiveness depends on the combination of digital accounting, infrastructure modernization, economically justified allocation, climate-adaptive planning, and stronger institutional coordination. Such an approach can provide a more reliable basis for strengthening water security, improving economic efficiency, and ensuring long-term ecological sustainability in the country.

References

1. Mammadov R., & Teymurov M. Assessment of water resources and risk of water losses due to climate changes and human activities. The Scientific Heritage. 2019,34-3, 3-11.

2. Makhmudov, R. et al. Regional climate changes in Azerbaijan and assessment of their impact on water resources with a new method. *Reliability: Theory &Applications*. 2024, 19(SI 6 (81)), 830-837.

3. Mammadov, G.S. et al. Climate change effects on soil fertility and moisture in the Nakhchivanchay River Basin, Azerbaijan. *International Journal of Agriculture and Biosciences*. 2026, 15(1), 77-86.

4. Teymurov, M.A. Assessment of soil-vegetation cover and water resources on the basis of modern scientific innovation. Scientific advances and innovative approaches. In *III International Scientific Conference*. 2023, (pp. 28-32).

5. Teymurov, M.A. Estimation of rivers' current water resources and prediction in the period until 2050. Materials of the international Scientific-Practical Conference. *Water resources, hydraulic facilities and environment*, 2017. 15.

6. Makhmudov, R. et al. Assessment of the water balance of the territory and rivers water resources using a new operational-interactive method. *Reliability: Theory & Applications*. 2023, 18(SI 5 (75)), 500-509.

7. Teymurov M.A. et al. Integated assessment of water resources in Azerbaijan from quantitative and qualitative perspectives // Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: збірник наукових праць з матеріалами XI Міжнародної наукової конференції. 2026. с. 109-120

8. Teymurov M. et al. Integrated approaches to water resource optimization in Azerbaijan. Scientific Forum: Theory and Practice of Research. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA» 2026. p.189-198

9. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116

10. Hashimov, E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method. *National Security and Military Sciences*, 2015, 1(1), 128-132.

11. Hashimov, E.G. About some aspects of using a flock of UAVs. *İn* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, 1, 4-5.

12. Hashimov, E.G. The flight dynamics of drones. *National security and military sciences*. 2016, 2(3), 11-16.

13. Nasibov, Y.A. et al. Modelling of the rationally deployment of observing systems. *Сучасні інформаційні системи*, 2019. (3,№ 2), 10-13.

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF UAV PLATFORMS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

Tomar P.K.[1], Ismayil I.[2], Hashimov E.G.[2], Khalilov I.A.[2]
[1]Netaji Subhas University of Technology, New Delhi, India
[2]Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

This study develops a conceptual framework for the structural-parametric and functional optimization of an unmanned aerial vehicle platform intended for environmental monitoring tasks. The relevance of the problem is determined by the growing need for operationally flexible, spatially accurate, and cost-efficient observation systems capable of supporting the monitoring of atmospheric pollution, vegetation condition, land cover change, soil degradation, coastal processes, and water body dynamics. Although UAV technologies have become an effective tool in modern environmental observation, platform selection cannot be reduced to a simple technical choice because monitoring effectiveness depends on the interaction among payload characteristics, energy reserve, flight duration, coverage density, route length, communication stability, and data quality. The aim of the study is therefore to formulate a scientifically grounded optimization approach in which platform structure, energy configuration, sensor composition, and flight parameters are linked to the functional requirements of environmental monitoring missions.

The methodology formalizes the monitoring mission as a multi-parameter decision problem in which structural-parametric variables determine functional performance indicators. The principal input variables include platform type, payload capacity, battery mass and capacity, flight speed, nominal flight altitude, endurance, sensor mass, sensor energy demand, swath width, image overlap ratios, communication range, and operational-environment complexity. These variables are related to a system of output criteria representing data quality, spatial resolution, coverage area, mission duration, energy consumption, communication reliability, and processability of the final monitoring product. The optimization problem is expressed in multi-criteria form and then transformed into a weighted normalized objective function whose coefficients are selected according to mission priorities. The framework also incorporates a system of feasibility constraints, including payload limitation, energy balance, mission coverage, minimum data-quality requirements, and communication-stability conditions. Methodologically, optimization proceeds through sequential stages involving mission identification, task-specific sensor selection, adaptation of the platform and energy module, construction of route and coverage scenarios, calculation of time and energy indicators, and comparison of Pareto-type compromise solutions.

The analysis shows that rational UAV platform selection for environmental monitoring emerges from three principal trade-off domains. The first is the trade-off between sensor richness and flight endurance, where higher information content increases payload and energy demand, thereby reducing mission duration. The second is the trade-off between spatial resolution and coverage area, since lower-

altitude and high-overlap flights improve observation quality but reduce survey efficiency over large territories. The third is the trade-off between data quality and operational simplicity, especially in air-quality monitoring, where multiple low-cost sensors improve spatial density but create additional calibration and error-compensation challenges. Based on these relationships, the study distinguishes multirotor platforms for precise local observation, fixed-wing platforms for large-area coverage, and hybrid platforms for mixed missions. The study concludes that the optimal solution is not the technically most powerful UAV configuration, but the functionally most suitable one, selected through a compromise among sensor mass, energy expenditure, coverage area, communication stability, and monitoring quality. This framework provides a methodological basis for mission-oriented UAV design and supports further development through simulation, field experiments, and cooperative multi-UAV monitoring architectures

References

1. Islamov I., et al. Innovative approaches to environmental recovery in conflict-affected areas //Матеріали конференцій МЦНД. – 2025. – №. 24.10. 2025; Житомир, Україна. – С. 180-190.

2. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116

3. Rustamli B. et al. Prospects and challenges of bio-nano remediation of military-contaminated lands //Матеріали конференцій МЦНД. – 2025. – №. 24.10. 2025; Житомир, Україна. – С. 227-237.

4. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.

5. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.

6. Marko Radovanovich, et al. Application of the new hybrid model LMAW-GEDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army. Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing, -2024. Vol. 4 issue 1. p.16-31.

7. Huseynov, M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.

8. Islamov, I., et al. Prospects for the use of robotic complexes in eliminating the consequences of environmental accidents at military facilities. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 301–311.

9. Hashimov E. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.

10. Hashimov E. G. et al. Terrain orthophotomap making and combat control // Proc. of Internatonal Conf.“Modern Call of Security and Defence”. 2016. T.19. C.68-71.

11. Hashimov E. et al. GIS technology and terrain orthophotomap making for military application //Journal of Defense Resources Management. – 2017. – Т. 8. – №. 2. – С. 81-90.

МЕТОД ВІДБОРУ ПОЛІТИК ЗБЕРЕЖЕННЯ КРИТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ ЗА КАТАСТРОФІЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ

Ткачов В.М., Рубан І.В.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Інформаційна система на мобільній платформі (ІСМП) належить до класу систем, для яких динамічна доступність ресурсу, розриви зв'язності між елементами та зовнішні деструктивні впливи є вихідними умовами функціонування. У роботах [1–3] розглянуто окремі аспекти порогового оцінювання випадкових процесів, стратегії функціонування ІСМП за дії деструктивних впливів, індексні політики забезпечення живучості ІСМП та функціональну стійкість ІСМП. У доповіді наводиться результат аналізу сценаріїв, за яких за короткий інтервал часу ІСМП втрачає 70–80 % функціональної спроможності. За таких умов визначальною стає задача швидкого відбору політики реконфігурації, за якої ІСМП підтримує критичне ядро та локальну функційну здатність уцілілих компонентів ІСМП.

Метою доповіді є розроблення методу відбору політик збереження критичних функцій ІСМП у катастрофічному режимі, за якого після зовнішнього впливу система переходить у стан глибокої структурної деградації, але має утримувати виконання основної функції на визначеному інтервалі часу.

Нехай початкова конфігурація ІСМП задається множинами вузлів N_0 каналів E_0 та сервісів Ω_0. Після деструктивного впливу на момент t працездатними залишаються множини $N_a(t) \subseteq N_0$, $E_a(t) \subseteq E_0$, $\Omega_a(t) \subseteq \Omega_0$. Для кількісного опису масштабу втрат вводиться індекс деградації компонентів ІСМП:

$$\kappa(t) = 1 - \frac{|N_a(t)| + \rho|E_a(t)|}{|N_0| + \rho|E_0|}, \quad \rho > 0,$$

де ρ – коефіцієнт еквівалентності втрати каналу відносно втрати вузла, який відображає відносну структурну значущість порушення зв'язності при обчисленні інтегрального індексу деградації. За $\rho = 1$ втрати вузлів і каналів вважаються рівновагомими, за $\rho > 1$ переважає внесок порушення зв'язності, а за $0 < \rho < 1$ – внесок втрат вузлів.

Катастрофічному режиму відповідає область $\kappa(t) \geq 0.7$, коли політики розподілу ресурсів не забезпечують утримання цільової функції.

У такому режимі повне збереження функціональності не є реалістичною метою. Доцільним є виділення критичного ядра $\Omega^* \subset \Omega_0$ до складу якого входять сервіси виявлення події, локального підтвердження її достовірності, актуалізації стану, передавання пріоритетних керувальних повідомлень,

базового узгодження стану сервісів та перепризначення ролей між уцілілими компонентами ІСТМ. Решта сервісів розглядається як периферійні та може бути переведена у відкладений режим або згорнута для вивільнення ресурсів.

Стан критичного ядра Ω^* на момент t оцінюється за вектором безрозмірних часткових дефіцитів:

$$\vec{d}(t) = \ d_c(t), d_e(t), d_b(t), d_s(t), d_q(t) \ , \quad d_i(t) \in 0,1 \ ,$$

де компоненти вектора характеризують дефіцит обчислювального ресурсу $d_c(t)$, запасу ходу платформи $d_e(t)$, зв'язності $d_b(t)$, узгодженості стану сервісів $d_s(t)$ та рівня виконання критичної функції $d_q(t)$.

Агрегований дефіцит сервісного стану задається виразом:

$$d(t) = \alpha_c d_c(t) + \alpha_e d_e(t) + \alpha_b d_b(t) + \alpha_s d_s(t) + \alpha_q d_q(t),$$

$$\alpha_c + \alpha_e + \alpha_b + \alpha_s + \alpha_q = 1, \quad \alpha_i \geq 0,$$

де α_i – вагові коефіцієнти, що відображають відносну значущість відповідних часткових дефіцитів у формуванні агрегованого дефіциту сервісного стану (набувають значень відносно реальних сценаріїв).

Тоді область допустимого функціонування визначається умовою $d(t) < d^*$, де d^* – критичний кордон значення дефіциту. Подія $d(t) \geq d^*$ означає втрату здатності ІСМП діяти як цілісна система, навіть якщо окремі вузли функціонують.

На кожному кроці керування t_k формується множина допустимих політик $\Pi_{\xi}(t_k)$, що охоплює скорочення функцій до критичного ядра, консолідацію ролей, локальну автономізацію сегментів та мікровідновлення за умови виконання ресурсно-часових обмежень:

$$R_\pi(t_k) \leq R_\zeta(t_k), \quad E_\pi(t_k) \leq E_\zeta(t_k), \quad \tau_\omega(\pi) + \tau_\varpi(\pi) \leq \tau_\upsilon(t_k),$$

де $R_\pi(t_k)$ та $E_\pi(t_k)$ – ресурсні потреби політики π; $R_\zeta(t_k)$ та $E_\zeta(t_k)$ – доступні залишкові ресурси; $\tau_\omega(\pi)$ – тривалість реконфігурації ІСМП; $\tau_\varpi(\pi)$ – час завершення узгодження стану сервісів; $\tau_\upsilon(t_k)$ – тривалість поточного вікна зв'язності.

Відновлення потребує виділення ресурсів та завершення узгодження стану сервісів у межах доступних вікон зв'язності.

Для катастрофічного режиму доцільно відбирати політику за ризиком досягнення критичного кордону дефіциту на найближчому інтервалі $t_k, t_k + T_k$. Для цього дієвим є механізм порогово-ймовірнісної оцінки [4]. Нехай для політики π на кроці t_k отримано оцінки математичного сподівання $m_{d,\pi}(t_k)$, дисперсії $\sigma^2_{d,\pi}(t_k)$ та дисперсії швидкості зміни дефіциту $\sigma^2_{\bullet\, d,\pi}(t_k)$. Тоді інтенсивність досягнення критичного кордону визначається виразом:

$$\nu_{\pi}(t_k) = \frac{\sigma_{\cdot\, d,\pi}(t_k)}{2\pi\sigma_{d,\pi}(t_k)} \exp\left\{-\frac{\left[d^* - m_{d,\pi}(t_k)\right]^2}{2\sigma^2_{d,\pi}(t_k)}\right\}.$$

Оцінка ризику досягнення критичного кордону на інтервалі T_k задається як:

$$P_{\pi}(t_k) = 1 - \exp\ -\nu_{\pi}(t_k)T_k\ .$$

Критерій відбору політики має вигляд:

$$J(\pi, t_k) = P_{\pi}(t_k) + \lambda_1 C_{\omega}(\pi, t_k) + \lambda_2 C_{\varpi}(\pi, t_k) + \lambda_3 C_{\psi}(\pi, t_k) \to \min,$$

де $C_{\omega}(\pi, t_k)$ – ресурсні витрати на реконфігурацію ІСМП; $C_{\varpi}(\pi, t_k)$ – витрати на завершення узгодження стану сервісів; $C_{\psi}(\pi, t_k)$ – втрати функціональності периферійних сервісів; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – вагові коефіцієнти.

Оптимальна політика визначається згідно виразу:

$$\pi^{\dagger}(t_k) = \arg \min_{\pi \in \Pi_{\xi}(t_k)} J\ \ \pi, t_k\ \ .$$

У катастрофічному режимі ІСМП розглядаються наступні типи політик.

Політика скорочення функцій до критичного ядра передбачає негайне виведення з множини керування всіх сервісів, що не належать до критичного ядра, з перерозподілом ресурсу на підтримання базового циклу спостереження, ухвалення рішення та передавання керувальної інформації.

Політика консолідації ролей передбачає покладання функцій координатора, оброблення та передачі даних на єдиний уцілілий елемент.

Політика локальної автономізації сегментів переводить ізольовані сегменти в режим локального керування з відкладеним міжсегментним узгодженням стану.

Політика мікровідновлення використовує короткі вікна зв'язності та залишкові резерви для повернення лише критичних компонентів інформаційної системи на мобільній платформі.

Таким чином, метод включає такі етапи:

формування профілю уцілілої конфігурації та оцінювання індексу деградації;

виділення критичного ядра і розподіл периферійних сервісів за режимами згортання, відкладення або мінімального підтримання;

оцінювання параметрів процесу дефіциту для кожної потенційної політики та обчислення ризику;

вибір політики з множини $\Pi_{\xi}(t_k)$ (запуск реконфігурації та диспетчеризації виконання дій);

оновлення оцінок стану і повторення циклу керування.

У сценарії, де інформаційна система на мобільній платформі виконує функції мобільного спостереження, локального аналізу та координації дій у зоні надзвичайної події, комбінований зовнішній вплив, наприклад, призводить до

втрати більшості сенсорних вузлів, двох основних маршрутів передавання даних, частини накопичувачів та значної частки обчислювальних модулів. За такого стану підтримання повного набору сервісів формує надмірний дефіцит сервісного стану.

За цих умов метод відбирає політику скорочення функцій до критичного ядра або локальної автономізації сегментів залежно від оціненого ризику та умов здійсненності. У результаті інформаційна система на мобільній платформі зберігає інформацію про стан, пріоритетні потоки подій, локальне ухвалення рішень у сегментах та подієву передачу критичних повідомлень, що дає змогу утримати $d(t) < d^*$ на інтервалі, достатньому для подальшого етапного відновлення. За таких умов живучість ІСМП визначається здатністю організувати залишковий ресурс у мінімально достатню функціональну конфігурацію, не допустити досягнення критичного кордону дефіциту та зберегти умови для подальшого відновлення (за можливості).

Висновки. Розроблено метод відбору політик збереження критичних функцій ІСМП за катастрофічної деградації компонентної бази, який ґрунтується на порогово-ймовірнісному оцінюванні ризику досягнення критичного кордону дефіциту сервісного стану на скінченному інтервалі функціонування ІСМП.

Метод враховує масштаб втрат вузлів і каналів, ресурсно-часові обмеження реконфігурації, вікна зв’язності зі змінною тривалістю та пропускною здатністю, а також витрати на завершення узгодження стану сервісів. Запропонований підхід, згідно з модельними експериментами, забезпечує обґрунтований вибір політики збереження критичного ядра системи після втрати 70–80 % компонентної бази з множини політик скорочення функцій до критичного ядра, консолідації ролей, локальної автономізації сегментів та ймовірного мікровідновлення.

Список літератури

1. Terenyk D., Kharchenko V. Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2024. No. 3 (29). P. 91–103. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091

2. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks / S. V. Buldyrev et al. *Nature*. 2010. Vol. 464, no. 7291. P. 1025–1028. DOI: https://doi.org/10.1038/nature08932

3. Dodonov O. G., Gorbachyk O. S., Kuznietsova M. G. Automated Organizational Management Systems of Critical Infrastructure: Security and Functional Stability. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3241. P. 1–12. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3241/paper1.pdf

4. Ruban I. V., Tkachov V. M. A method for synthesizing index policies to ensure the survivability of a mobile platform-based information system. *Applied Aspects of Information Technology*. 2025. Vol. 8, no. 4. P. 424–441. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.27

5. Kuchuk N., Tkachov V. Self-healing Systems Modelling. *Advances in Self-healing Systems Monitoring and Data Processing*. Cham, 2022. P. 57–111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_2

ІНТЕГРАЦІЯ МЕХАНІЗМУ ТЕМПОРАЛЬНОЇ УВАГИ ТА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ У СИСТЕМАХ З УПОРЯДКОВАНИМИ У ЧАСІ ДАНИМИ

Чалий С.Ф., Кравченко Р.В.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Інтелектуальні системи (ІС) у сферах медичної діагностики, фінансового моделювання та систем контролю якості обробляють дані, що є послідовностями подій із часовими мітками, де порядок у часі визначає причинно-наслідкові залежності, критичні для формування коректних рішень. Проте методи пояснювального штучного інтелекту (XAI – Explainable Artificial Intelligence) вирішують задачу верифікації темпоральної коректності пояснень лише частково, не інтерпретуючи узгодженість каузальної послідовності подій у поясненні з реальними мітками часу у вхідних даних. Зокрема, механізм уваги в темпоральних графових нейронних мережах встановлює важливість подій, але не гарантує, що згенероване пояснення не суперечить фактичному порядку подій [1]. З іншого боку, методи інтервальної алгебри формально верифікують темпоральні відношення між парами подій, що дає можливість виявити навіть неявні суперечності [2]. Проте ці методи не інтегровані в процес генерації пояснень, що обмежує можливості застосування XAI-систем при обробці темпорально упорядкованих даних.

Метою роботи є розробка комплексного підходу до побудови темпорально узгоджених пояснень в ІС, що поєднує механізм темпоральної уваги для визначення внеску подій з інтервальною алгеброю для автоматизованої верифікації коректності темпоральних відношень.

Запропонований підхід поєднує використання темпоральної графової нейронної мережі для формування коефіцієнтів важливості кожної події як основи структурованого пояснення, побудову пояснення з використанням мовної моделі на основі шаблону подій, та автоматизовану верифікацію пояснення з використанням інтервальної алгебри. При виявленні темпоральних порушень відбувається уточнення пояснень для фрагментів з порушеннями.

Експериментальна перевірка підтвердила підвищення темпоральної узгодженості при побудові пояснень порівняно з використанням лише графової нейронної мережі для побудови пояснень.

Список літератури

1. Чалий С. Ф., Кравченко Р. В. Метод адаптивного вибору інтервалів часу для побудови графів темпоральних графових нейронних мереж // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2025. № 2(14). С. 129–139. DOI: https://doi.org/10.20998/2079-0023.2025.02.19

2. Allen J. F. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26, № 11. P. 832–843. DOI: https://doi.org/10.1145/182.358434

АВТОМАТИЗОВАНЕ ФОРМУВАННЯ СИМВОЛЬНОЇ МЕНТАЛЬНОЇ МОДЕЛІ РІШЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ДОМЕННИХ ОНТОЛОГІЙ У СФЕРІ МЕДИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Чалий С.Ф., Лещинська І.О.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Медичні діагностичні системи підтримки рішень зазвичай приймають рекомендації на основі непрозорих алгоритмів машинного навчання, що суттєво утрудню самостійну інтерпретацію результатів діагностики зовнішніми користувачами, які не мають профільної медичної підготовки і тому не можуть оцінити внесок окремих клінічних показників у висновок системи.

Вимога до прозорості та інтерпретованості автоматизованих медичних рішень, закріплена в Регламенті ЄС EU AI Act 2024/1689 в рамках вимог до систем високого ризику, що потребує побудови зрозумілих каузальних пояснень із явними ланцюжками міркування від клінічних атрибутів пацієнта до діагностичного висновку.

Традиційні методи пояснювального штучного інтелекту, наприклад SHAP [1] та LIME [2], формують пояснення у вигляді числових коефіцієнтів важливості клінічних ознак, які є незрозумілими для пацієнтів без спеціальної підготовки та не відображають причинно-наслідкову логіку клінічного рішення.

Традиційна побудова ментальних моделей через інтерв'ю з медичними експертами є трудомісткою, суб'єктивно залежною від конкретного фахівця та використовується лише в рамках одного медичного напрямку. Наслідком цих обмежень є відсутність автоматизованого механізму побудови ментальних моделей, що забезпечують персоналізовані пояснення медичних рішень для пацієнтів із різним рівнем медичної освіти [3].

Метою роботи є розробка підходу до автоматизованої побудови символьної ментальної моделі рішення інтелектуальної системи для зовнішніх користувачів на основі медичної доменної онтології та каузальних послідовностей клінічних міркувань.

Запропонований підхід формує символьну ментальну модель послідовно, починаючи з верифікації термінів доменної онтології й завершуючи логічним виведенням онтологій.

На першому етапі з доменної онтології вибираються текстові описи всіх класів концептів та їх властивостей, після чого для кожного терміну виконується пошуковий запит до медичних веб-ресурсів, зокрема сайтів медичних університетів, національних медичних асоціацій та бібліографічних баз медичної літератури. Для кожного терміну фіксується його поширеність у медичній онлайн-літературі як індикатор зрозумілості для зовнішніх користувачів.

Терміни з низькою поширеністю у медичному веб-корпусі потребують заміни медичними синонімами, наприклад вноситься «порушення глікемії натще» замість технічної назви змінної датасету «Glucose» або SHAP-конструкції «внесок ознаки Glucose у передбачення».

На другому етапі з верифікованої онтології вибираються релевантні класи на основі векторної оцінки семантичної подібності між описами категорій рішень та класами онтології, що забезпечує використання лише термінологічно підтверджених концептів на подальших етапах побудови моделі.

На третьому етапі формується пояснювальний шар моделі у вигляді сукупності правил виведення: наприклад, підвищений рівень глюкози натще в поєднанні з надмірною масою тіла та обтяженою спадковістю утворює антецедент правила, консеквентом якого є віднесення пацієнта до класу «ризик цукрового діабету типу 2».

На четвертому етапі база знань заповнюється конкретними значеннями клінічних атрибутів пацієнтів, зокрема рівнем глюкози, індексом маси тіла, артеріальним тиском, рівнем інсуліну, віком. На п'ятому етапі механізм логічного виведення онтологій класифікує кожного пацієнта до діагностичного класу.

На даному етапі формуються ланцюжки обґрунтування від концепту рішення до конкретних значень атрибутів із трирівневою деталізацією відповідно до користувача. Пацієнт-новачок отримує лише назву діагностичного концепту, тоді як користувач середнього рівня – каузальне правило з іменованими клінічними ознаками, а лікар-експерт має повний доступ до числових значень атрибутів для перевірки ланцюжку міркування.

Висновки. Запропоновано підхід до автоматизованої побудови символьної ментальної моделі рішення медичної інтелектуальної системи з попереднім етапом верифікації повноти термінологічного складу доменної онтології через пошук медичних термінів у веб-корпусі, що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує термінологічну відповідність пояснень стандартам медичної комунікації до початку формування каузальних правил виведення.

Експериментальна перевірка на наборі даних діагностики цукрового діабету репозиторію UCI показала, що верифікація онтологічного словника дозволяє усунути причину незрозумілості пояснень до початку їх побудови, на відміну від перефразування вже сформованих пояснень, та забезпечити відтворюваність клінічних ланцюжків міркування.

Список літератури

1. Lundberg S. M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 4765–4774. URL: https://arxiv.org/abs/1705.07874

2. J Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. «Why should I trust you?» Explaining the predictions of any classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 1135–1144. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939778

3. Чалий С. Ф., Лещинська І. О. Принципи побудови ментальних моделей рішення для зовнішнього користувача в задачі формування пояснень в інтелектуальній системі. АСУ та прилади автоматики: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. Харків: ХНУРЕ, 2024. Вип. 182. С. 82–90. УДК: 004.8:004.9. DOI: https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.182.082

АДАПТАЦІЯ МЕДИЧНОГО БІЗНЕС-ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ДЕТЕКТУВАННЯ ДРЕЙФУ РОЗПОДІЛУ ВХІДНИХ ДАНИХ

Петров К.Е., Чалий Т.В.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Медичні бізнес-процеси визначаються через документовані послідовності клінічних та адміністративних операцій з обслуговування пацієнтів, включаючи діагностику, маршрутизацію, призначення лікування та контроль результатів. Такі процеси функціонують в умовах динамічних клінічних середовищ, де статистичні закономірності вхідних даних змінюються під впливом оновлення протоколів, епідеміологічних зрушень та сезонних коливань показників пацієнтів. Вказану зміну розподілу даних прийнято позначати як концептуальний дрейф (concept drift) [1].

В результаті концептуального дрейфу закономірності, що були отримані в результаті машинного навчання та описують послідовність дій процесу, перестають відповідати новим вхідним даним і якість рекомендацій медичної системи знижується без зовнішніх ознак такої відмови.

Статичні офлайн-підходи до оптимізації параметрів моделей підтримки медичних рішень виконують налаштування процесної моделі одноразово на фіксованому навчальному наборі даних і не мають вбудованих засобів виявлення дрейфу під час експлуатації, що обмежує можливості їх адаптації в умовах змін у клінічному середовищі.

Потреба забезпечувати контроль відповідності автоматизованих медичних рішень актуальному стану клінічних даних є наслідком визначеної у Регламенті ЄС 2024/1689 (EU AI Act) вимоги щодо моніторингу інтелектуальних систем високого ризику. Задоволення даної вимоги потребує розробки механізмів адаптивного перенавчання моделей у режимі реального часу без переривання бізнес-процесу.

Такий підхід до перенавчання має поєднувати ансамблеве виявлення дрейфу розподілу вхідних даних з подальшим оновлення моделі для відновлення підтримки рішень у рамках медичного бізнес-процесу.

Метою роботи є удосконалення підходу до адаптації медичного бізнес-процесу на основі онлайн-механізму ансамблевого детектування дрейфу розподілу даних з використанням двох незалежних детекторів з адаптивним пороговим значенням.

Запропонований підхід реалізує цикл моніторингу стану бізнес-процесу та адаптації його моделі.

На першому етапі здійснюється паралельний моніторинг вхідного потоку клінічних даних двома різними способами.

По-перше, використовується адаптивне ковзне вікно для детектування зміни середнього значення потоку даних. Вікно автоматично розширюється у стабільних умовах і звужується при виявленні значущої зміни середнього. Така зміна вікна є аналогом клінічного спостереження, коли лікар перевіряє аналізи пацієнта у коротшому діапазоні часу, якщо помічає раптову зміну показників.

Другий спосіб полягає у порівнянні форми розподілу поточного вікна спостережень із еталонним розподілом навчальної вибірки (KS-тест). Даний спосіб дозволяє виявляти не лише зміни середнього значення, а й зміни форми розподілу загалом, наприклад, появу нових груп пацієнтів із нетиповими клінічними показниками.

Обидва способи моніторингу доповнюють один одного: адаптивне вікно є чутливим до поступових дрейфів, характерних для повільних змін клінічної практики, тоді як KS-тест виявляє раптові зсуви розподілу, що виникають при зміні протоколу лікування або появі нової патології.

На другому етапі перевіряється умова оновлення моделі бізнес процесу. Адаптація процесу відбувається лише при одночасному виявленні як поступового дрейфу, так і зсувів розподілу із заданим порогом.

На третьому етапі виконується оновлення моделі бізнес-процесу при паралельному функціонування основного медичного процесу.

На четвертому етапі оновлена модель бізнес-процесу розгортається для виконання в рамках відповідної медичної інформаційної системи.

Даний підхід доповнює технологію process mining можливостями в онлайн-режимі визначити невідповідність фактичної моделі бізнес-процесу «як є» та апріорно заданої моделі «як має бути» у випадку концептуального дрейфу.

Традиційне порівняння відмінностей фактичної та апріорної процесних моделей виконується на основі аналізу графової моделі фактичного бізнес процесу, отриманої на основі аналізу логів виконання бізнес-процесу. Однак така модель не відображає концептуальний дрейф. На відміну від традиційного аналізу процесів, поєднання адаптивного ковзного вікна та KS-тесту дає можливість врахувати обидва види концептуального дрейфу.

Висновки. Запропоновано підхід до адаптації медичного бізнес-процесу, який на відміну від статичних офлайн-підходів реалізує онлайн-механізм ансамблевого детектування дрейфу розподілу даних на основі поєднання алгоритму адаптивного вікна та KS-тесту з адаптивним порогом, що забезпечує можливість безперервної адаптації моделі процесу відповідно до змін вхідних даних.

Список літератури

1. Webb G. I., Hyde R., Cao H., Nguyen H. L., Petitjean F. Characterizing Concept Drift // Data Mining and Knowledge Discovery. 2016. Vol. 30, № 4. P. 964–994. DOI: https://doi.org/10.1007/s10618-015-0448-4.

2. Bifet A., Gavalda R. Learning from Time-Changing Data with Adaptive Windowing // Proceedings of the 7th SIAM International Conference on Data Mining. 2007. P. 443–448. DOI: https://doi.org/10.1137/1.9781611972771 .

3. Massey F. J. The Kolmogorov–Smirnov Test for Goodness of Fit // Journal of the American Statistical Association. 1951. Vol. 46, № 253. P. 68–78. DOI: https://doi.org/10.2307/2280095.

ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ВАРІАТИВНИХ МЕДИЧНИХ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЖУРНАЛІВ ПОДІЙ

Чалий С.Ф., Мацейко Т.М.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Інтелектуальний аналіз процесів (process mining) є науковим напрямком, що використовує методи аналізу даних для побудови моделей бізнес-процесів із даних, записаних в процесних логах (журналах подій) [1]. Журнал подій містить записи усіх операцій бізнес-процесу з часовими мітками. В рамках інтелектуального аналізу процесів вирішуються задачі: побудови процесної моделі із даних журналу подій, перевірка відповідності фактичного процесу еталонній моделі та вдосконалення моделі бізнес-процесу на основі виявлених відхилень.

Ці задачі вирішуються на основі порівняння подій журналу із діями моделі, а також виділення блоків таких дій [2]. Однак медичні процеси мають суттєві відмінності від традиційних бізнес-процесів: клінічний шлях пацієнта є варіативним і залежить від індивідуального набору параметрів; протоколи лікування оновлюються нерегулярно; циклічні залежності між клінічними операціями, такі як повторні госпіталізації, корекції терапії, планові контрольні огляди, породжують структури журналів, що є нетиповими для промислових процесів, для яких розроблялись існуючі методи. Наслідком зазначених обмежень є відсутність підходів до аналізу медичних бізнес-процесів, що враховують варіативність клінічних шляхів, циклічні залежності як їх базові характеристики.

Метою роботи є розробка підходу до аналізу відповідності медичних бізнес-процесів, що враховує варіативність клінічних шляхів та циклічні залежності між клінічними операціями як ключові структурні властивості медичних журналів подій.

Запропонований підхід включає кластеризацію клінічних шляхів за структурною подібністю через попередню сегментацію журналу за клінічно значущими ознаками пацієнта та явну ідентифікацію циклічних послідовностей на основі аналізу повторюваних підпослідовностей. Кластеризація забезпечує можливість створення окремих компактних моделей ключових фрагментів бізнес-процесу. Ідентифікація циклічних послідовностей дає можливість врахувати повторні госпіталізації та корекції терапії.

Список літератури

1. van der Aalst W. M. P. Process Mining: Data Science in Action. 2nd ed. Berlin : Springer, 2016. 467 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4.

2. Чалий С. Ф. Методи формування упорядкованих по процесам трас журналу подій в задачах процесного управління [Електронний ресурс] / С. Ф. Чалий, Є. О. Богатов, І. Б. Прібильнова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – 2018. – № 21 (1297). – С. 36–41.

ГЕНЕРАЦІЯ ПОЯСНЕНЬ РІШЕНЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ШАБЛОННОГО РОЗГОРТАННЯ ПРАВИЛ ДЕРЕВА РІШЕНЬ

Чалий С.Ф., Дементʼєв А.М.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Системи підтримки, що використовують алгоритми машинного навчання, зазвичай формують рекомендації у вигляді числових результатів класифікації без текстового пояснення причин рішення. Дерево рішень є моделлю машинного навчання з прозорою внутрішньою структурою, де кожен шлях від кореневого вузла до листового утворює повне логічне правило класифікації. Однак ці правила представляються у технічній нотації, яка є незрозумілою для користувачів без профільної підготовки. Методи генерації пояснень природною мовою використовують шаблонне розгортання як механізм перетворення структурованих даних на зв'язний текст. Шаблон фіксує структуру речення з параметрами, а конкретні значення параметрів заповнюються з вхідних даних. Однак існуючі підходи до генерації пояснень зазвичай формують єдиний фіксований текст без урахування рівня підготовки кінцевого користувача [1].

Когнітивні дослідження свідчать, що ефективність пояснення значною мірою визначається його відповідністю ментальній моделі користувача: надмірно деталізоване пояснення є так само неефективним для користувача-новачка, як і надмірно спрощене для експерта [2].

Метою роботи є розробка підходу до генерації пояснень рішень інтелектуальної системи на основі розгортання правил дерева рішень із адаптацією рівня деталізації до профілю кінцевого користувача.

Запропонований підхід послідовно виділяє всі шляхи від кореневого вузла до листових вузлів. Кожен такий шлях є повним логічним правилом класифікації. Технічні назви ознак дерева рішень замінюються з використанням доменної термінології, після чого для кожного правила дерева рішень застосовуються лінгвістичні шаблони трьох рівнів деталізації відповідно до профілю кінцевого користувача і генерується пояснення.

Висновки. Розроблений підхід реалізує розгортання правил дерева рішень із трирівневою адаптацією деталізації пояснення до профілю кінцевого користувача на основі онтологічно заданої термінології та без ручного налаштування для кожного нового класифікатора.

Список літератури

1. Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A Survey of Methods for Explaining Black Box Models // ACM Computing Surveys. 2018. Vol. 51, № 5. Article 93. DOI: https://doi.org/10.1145/3236009

2. Miller T. Explanation in Artificial Intelligence: Insights from the Social Sciences // Artificial Intelligence. 2019. Vol. 267. P. 1–38. DOI: https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007

LLM-ІНТЕГРОВАНА ГЕНЕРАЦІЯ ПОЯСНЕНЬ ЩОДО РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

Чалий С.Ф., Єрохін Д.О.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Аналіз бізнес-процесів(БП) на основі журналів подій дає можливість сформувати моделі процесів у формі мереж Петрі, а також множину відхилень від еталонних моделей процесів із відповідними числовими оцінками [1]. Такі результати потребують інтерпретації для менеджера БП або клієнта, якому адресовано звіт [2]. Великі мовні моделі генерують зв'язні пояснення щодо структурованих даних і абстракцій, отриманих в результаті аналізу процесів, за умови коректно сформованих підказок. Підхід до генерації пояснень з використанням RAG (retrieval-augmented generation) дозволяє доповнювати внутрішні знання мовної моделі релевантними зовнішніми даними, що витягуються з бази знань безпосередньо під час генерації і дають можливість уточнити підказки. Статичні шаблонні підходи до генерації пояснень не враховують варіативність структури журналів подій. Наслідком зазначених обмежень та умов є потреба в розробці підходу, що використовує результати аналізу відповідності БП для адаптивної LLM-генерації пояснень.

Метою роботи є розробка підходу до LLM-інтегрованої генерації природномовних пояснень щодо результатів аналізу бізнес-процесів із контекстним управлінням рівнем деталізації.

Запропонований підхід включає 4 етапи. На першому етапі результати аналізу відповідності БП перетворюються на структуровану проміжну репрезентацію, що містить числову оцінку відхилення від апріорно заданої моделі. На другому етапі на основі контексту використання бізнес-процесу визначається рівень деталізації пояснення. На третьому етапі структурована репрезентація та рівень деталізації використовуються для отримання прикладів через механізм RAG та побудови підказки для мовної моделі. На четвертому етапі генерується пояснення з використанням LLM та виконується оцінка пояснення з урахуванням показника семантичної подібності. При низькій оцінці пояснення етап 3 виконується повторно.

Висновки. Розроблений підхід, на відміну від існуючих, реалізує контекстне управління рівнем деталізації, уточнення через механізм RAG та оцінку якості отриманого пояснення.

Список літератури

1. van der Aalst W. M. P. Process Mining: Data Science in Action. 2nd ed. Berlin : Springer, 2016. 467 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4

2. Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Побудова пояснень в інтелектуальних системах на основі формування каузальних залежностей // АСУ та прилади автоматики: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. Харків: ХНУРЕ, 2024. Вип. 180. С. 4–15. DOI: https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.180.004

ОЦІНЮВАННЯ КООРДИНАЦІЙНОЇ УЗГОДЖЕНОСТІ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Чалий С.Ф., Євдокимов Б.С.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Мультимодельні інтелектуальні системи застосовуються в задачах прогнозування, де жодна окрема модель не забезпечує достатньої точності, наприклад у задачах прогнозування збоїв логістичних ланцюжків постачань. Кожна модель ансамблю може мати власні пояснення рішень і вони нерідко мають суперечності для одного й того самого об'єкту. Існуючі критерії вірності та стійкості оцінюють якість пояснення окремої моделі, проте не вимірюють узгодженість між поясненнями різних моделей ансамблю. Зазначене обумовлює необхідність оцінювання координаційної узгодженості пояснень для порівняння альтернативних стратегій координації.

Метою роботи є розробка підходу до оцінювання координаційної узгодженості пояснень у мультимодельних інтелектуальних системах.

Запропонований підхід передбачає послідовну оцінку якості координації пояснень за показниками координаційної вірності, приросту значення узгодженості, коефіцієнту узгодженості пояснень та ефективності розв'язання конфліктів між поясненнями. Координаційна вірність оцінює ступінь збереження семантики пояснення при його агрегації у зведене пояснення. Приріст узгодженості характеризує зміну рівня узгодженості між поясненнями моделей ансамблю після застосування стратегії координації порівняно з базовим рівнем. Коефіцієнт узгодженості пояснень відображає частку випадків, у яких пояснення всіх моделей ансамблю сходяться на одних і тих самих ключових атрибутах як підставах рішення. Показник ефективності розв'язання конфліктів призначений для оцінювання якості механізму врегулювання суперечностей між поясненнями з урахуванням як повноти усунення семантичних конфліктів, так і збереження індивідуальної вірності компонентів після їхнього узгодження. Результуюча стратегія має забезпечувати максимізацію коефіцієнту та приросту узгодженості при збереженні вірності вище допустимого порогу за умови прийнятного значення ефективності розв'язання конфліктів між поясненнями.

Висновки. Розроблений підхід, на відміну від існуючих, дає можливість кількісно порівняти альтернативні стратегії координації пояснень.

Список літератури

1. Bhatt U., Weller A., Moura J. M. F. Evaluating and Aggregating Feature-based Model Explanations // Proceedings of the 29th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2020. P. 3016–3022. DOI: https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/

2. Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Можливісна оцінка коректності пояснень для кінцевого користувача в системі штучного інтелекту. Сучасні інформаційні системи. 2023. Т. 7, № 4. С. 75–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.10.

ФОРМУВАННЯ КАУЗАЛЬНИХ ПРОЦЕСНИХ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Лещинський В.О.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Інтелектуальні інформаційні системи забезпечують можливості підтримки прийняття рішень у виробництві, охороні здоров'я, управлінні бізнес-процесами та фінансовому аудиті, тобто у сферах, де своєчасність рішень безпосередньо визначає результати діяльності організації.

Однак використанню таких систем перешкоджає їхня непрозорість, оскільки складні алгоритми машинного навчання формують рішення без пояснення щодо того, які стани системи, дії та причинно-наслідкові зв'язки між ними зумовили отриманий результат. Концепція пояснювального штучного інтелекту (explainable artificial intelligence, XAI) реалізована як система методів підвищення прозорості моделей машинного навчання, орієнтованих на різні категорії користувачів [1]. Зовнішні кінцеві користувачі потребують пояснень на концептуальному рівні, тоді як внутрішні користувачі, якими є розробники та аналітики систем, потребують детального процесного опису послідовності станів і дій, що сформували рішення, з метою виявлення вузьких місць і вдосконалення відповідних моделей. Існуючі методи XAI, зокрема LIME та SHAP, забезпечують пояснення на рівні важливості окремих ознак, але не відображають причинно-наслідкових зв'язків між послідовними станами процесу формування рішення, що обмежує їх можливості щодо опису процесно-орієнтованої поведінки системи. Каузальне моделювання надає формальний апарат для опису причинно-наслідкових залежностей між подіями та станами складних систем [2], що відкриває можливість побудови пояснень, які відповідають на питання «чому» та «що було причиною» щодо отриманого рішення, а не лише питання «що вплинуло на рішення».

Темпоральні залежності, які представляють собою впорядковані у часі відношення між станами процесу прийняття рішення, у поєднанні з каузальними залежностями дають можливість відобразити логіку рішення як упорядкований у часі ланцюжок дій і відповідних їм змін стану системи.

Інтелектуальна система на практиці може розглядатись як «сіра скринька», оскільки її поведінка лише частково відображена у системних логах (журналах подій), що обмежує використання ймовірнісної оцінки правил формування рішення. Проте теорія можливостей дозволяє оцінювати ступінь правдоподібності та впевненості у причинно-наслідкових правилах в умовах неповноти інформації [3]. У підсумку, існуючі підходи реалізують окремо побудову пояснень на основі впливу вхідних даних, опис процесу прийняття рішення у вигляді комбінації темпоральних та каузальних залежностей, а також оцінку правдоподібності цих залежностей. Зазначене свідчить про актуальність створення інформаційної технології побудови каузальних процесно-орієнтовних пояснень.

Метою роботи є розробка інформаційної технології формування каузальних процесних пояснень в інтелектуальних системах на основі можливісних каузальних залежностей між станами процесу формування рішення.

Запропонована інформаційна технологія включає фази побудови моделі пояснення та формування пояснення на основі отриманої моделі. Фаза побудови моделі пояснення включає аналіз логу процесу, побудову темпоральних залежностей і на їх основі формування й можливісну оцінку каузальних залежностей, а також формування моделі пояснення із множини правил. На даній фазі із журналу подій процесу формування рішення виділяються впорядковані послідовності станів, кожен з яких описується атрибутами найменувань дій, часових міток виконання та залучених ресурсів. Між парами послідовних станів усередині кожної траси журналу формуються темпоральні залежності, які узагальнюються у темпоральні правила, що охоплюють повторювані послідовності дій у кількох реалізаціях процесу. Темпоральні правила перетворюються на каузальні залежності та потенційні каузальні правила, які описують причинно-наслідкові зв'язки між станами. Для кожного правили визначаються оцінки можливості та необхідності [4]. Можливість застосування правила оцінюється за частотою його використання у відомих реалізаціях процесу, а показник необхідності визначається як відносна частота застосування цього правила серед усіх альтернативних правил, що можуть спрацьовувати в аналогічних ситуаціях. Модель пояснення формується як впорядкована підмножина правил із різнем рівнем деталізації, що дозволяє користувачеві самостійно визначати потрібну глибину пояснення. Фаза представлення пояснення включає деталізацію відібраних каузальних правил з урахуванням граничних значень атрибутів станів та побудову пояснення звичайною мовою на основі каузальних правил.

Висновки. Запропонована інформаційна технологія формування каузальних процесних пояснень в інтелектуальних інформаційних системах відрізняється використанням послідовності станів процесу для формування темпоральних і можливісних каузальних залежностей, що створює умови для побудови пояснень в умовах неповноти інформації щодо процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі.

Список літератури

1. Arrieta A. B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J. та ін. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI // Information Fusion. 2020. Vol. 58. P. 82–115. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012

2. Pearl J. Causality: Models, Reasoning and Inference. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 484 p. ISBN: 978-0-521-89560-6.

3. Zadeh L. A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzy Sets and Systems. 1978. Vol. 1, № 1. P. 3–28. DOI: https://doi.org/10.1016/S0165-0114(78)80002-4

4. Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Можливісна оцінка коректності пояснень для кінцевого користувача в системі штучного інтелекту. Сучасні інформаційні системи. 2023. Т. 7, № 4. С. 75–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.10.

ЗАСТОСУНОК ДЛЯ КЕРУВАННЯ ОСОБИСТИМИ ФІНАНСАМИ З ПРОГНОЗУВАННЯМ ВИТРАТ

Порошенко А.І., Тельбух І.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

У сучасних умовах значна частина фінансових операцій виконується в цифровому середовищі, тому зростає потреба у програмних засобах, що забезпечують зручний облік доходів, витрат і стану особистого бюджету. За даними OECD, результати міжнародного дослідження фінансової грамотності підтверджують важливість інструментів, які допомагають користувачам краще розуміти власну фінансову поведінку та приймати обґрунтовані рішення [1].

У зв'язку з цим розроблення застосунку для керування особистими фінансами є актуальним завданням, орієнтованим на підвищення зручності щоденного фінансового обліку та впорядкування персональних даних.

Метою доповіді є узагальнення основних функціональних вимог до застосунку для керування особистими фінансами з елементами прогнозування витрат.

Такий програмний засіб має забезпечувати введення та редагування записів про доходи й витрати, розподіл операцій за категоріями, перегляд історії змін, обчислення підсумкових показників за певний період і наочне подання результатів у вигляді звітів та діаграм. Аналіз сучасних рішень у цій сфері показує, що користувачі очікують від таких систем насамперед можливостей ведення бюджету, роботи з доходами і витратами, формування звітів та візуалізації даних [2].

Структурно запропонований застосунок може складатися з модуля керування фінансовими записами, модуля категоризації операцій, модуля аналітики та модуля формування звітів.

Основною функцією системи є накопичення й оброблення інформації про особисті фінанси користувача, що дає змогу оцінювати структуру витрат, визначати найбільш витратні категорії та відстежувати зміни фінансового стану в часі.

Додатково в межах такого застосунку може бути реалізовано спрощене прогнозування витрат на основі вже накопичених даних.

Список літератури

1. OECD. OECD/INFE 2023 International Survey of Adult Financial Literacy. OECD Publishing, 2023.

2. Stefanov T., Stefanova M., Varbanova S., Temelkov S. Personal Finance Management Application. TEM Journal. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 2066-2075. DOI: https://doi.org/10.18421/TEM133-34

БІБЛІОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В БЛОКЧЕЙН-ОРІЄНТОВАНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Фесенко Т.Г., Чепурна І.С.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Останніми роками спостерігається стійка тенденція розвитку багаторівневих хмарних інфраструктур, в тому числі туманних обчислень, та інтеграція технологій розподіленого реєстру у високотехнологічні рішення, що формують нові вимоги до архітектури сучасних розподілених інформаційних систем [1]. Функціонування блокчейн-орієнтованих розподілених інформаційних систем з мультихмарною інфраструктурою суттєво ускладнюється умовами динамічно змінного навантаження та гетерогенністю обчислювальних ресурсів хмарних середовищ [2]. Останні надаються в межах моделей виділення ресурсів різними вендорами, що ускладнює експлуатацію таких систем в мультихмарному середовищі.

Водночас централізовані методи моніторингу та управління в таких умовах виявляють обмежену ефективність, що зумовлено гетерогенністю ресурсів різних хмарних вендорів та ризиками виникнення єдиної точки відмови. Конкурентне використання ресурсів керуючого компонента та цільової системи загрожує каскадною відмовою у випадку дефіциту обчислювальних ресурсів та зумовлює необхідність методологічного забезпечення координації ресурсів, що підтримують цілісність управління в умовах часткової відмови компонентів інфраструктури або каналів зв'язку.

Метою доповіді є бібліометричний аналіз існуючих моделей управління ресурсами в блокчейн-орієнтованих розподілених інформаційних системах з мультихмарною інфраструктурою для обґрунтування методів та напрямів розробки математичних моделей управління ресурсами.

В доповіді наводяться результати бібліометричного аналізу наукових публікацій та досліджень з бази Scopus, опублікованих за період 2021-2026 років, що виконано за допомогою інструментарію VOSviewer [3]. Даний часовий проміжок обумовлений стрімкою динамікою інтеграції блокчейн- та хмарних технологій, розвитком хмарної оркестрації та впровадженням мультихмарних інфраструктур, що робить ранні дослідження в цьому напрямі менш актуальними для формування сучасних моделей.

Загальний масив релевантних публікацій склав понад 800 досліджень, зокрема фахових статей та матеріалів конференції, що демонструє зростання інтересу до інтеграції блокчейн-технологій в хмарні інфраструктури (рис.1). Передові позиції в дослідженнях та розробці моделей управління ресурсами наразі займають технічні університети Китаю, Індії, Сполучених штатів та Австралії. Наведені дані демонструють, що при кластерізації мережі ключових слів публікацій визначаються три основні вектори досліджень, в яких акцентовано увагу на забезпеченні безпеки та контролю доступу, реалізації смарт-контрактів як невід'ємної частини блокчейн-логіки, прикладному та

практичному застосуванні моделей управління ресурсами в інтегрованих інформаційних системах.

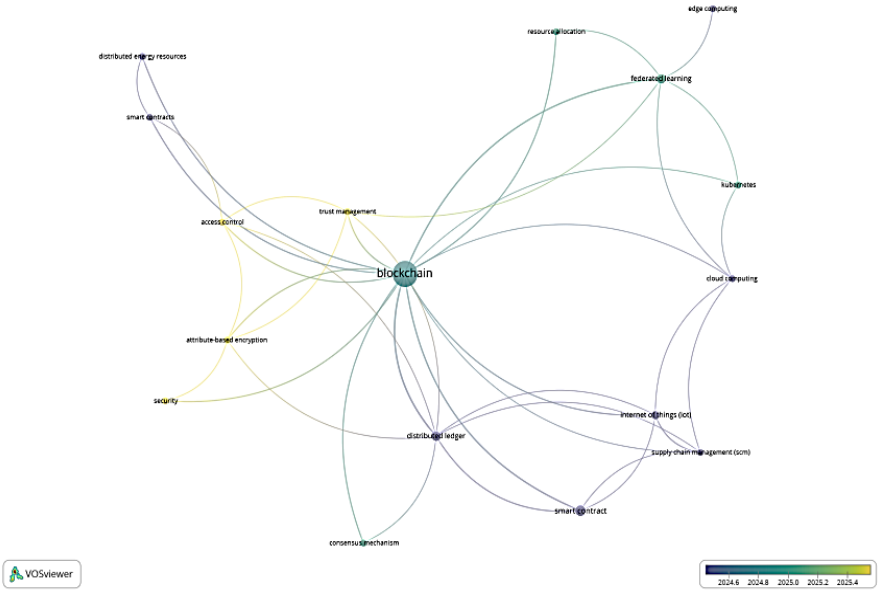


Рис. 1. Карта тематичної кластерізації за ключовими словами наукових досліджень

Разом з тим в публікаціях 2025-2026 років набуває стрімкої тенденції формалізація та розробка моделей управління обчислювальними ресурсами розподілених інформаційних систем, що сфокусовані на інфраструктурних рішеннях із застосуванням інструментів оркестрації, зокрема платформи Kubernetes, та методів управління на основі нейромереж. Водночас у зазначених роботах архітектура розподілених інформаційних систем розглядається крізь призму інтеграцію блокчейна з контейнеризованими та Edge-інфраструктурами в гетерогенних хмарних середовищах.

При цьому дослідження початкового етапу обраного періоду були переважно зосереджені на питаннях забезпечення безпеки та розробці механізмів гарантування довіри до учасників блокчейн-мереж та верифікованого доступу до ресурсів.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на вдосконалення математичного опису процесів координації обчислювальних ресурсів в блокчейн-орієнтованих розподілених інформаційних системах в мультихмарному середовищі. Це передбачає розробку моделей управління ресурсами на основі агрегації та обробки гетерогенних телеметричних даних від хмарних середовищ різних вендорів. Такий підхід дозволить забезпечити стабільність функціонування такої системи в мультихмарному середовищі в

умовах динамічно змінного навантаження, дефіциту обчислювальних ресурсів окремого хмарного середовища або часткової відмови компонентів інфраструктури.

Список літератури

1. Hunko M., Kovalenko A., Tkachov V. Comparative Analysis of Cloud and Fog Computing: Performance and Suitability in Different Scenarios. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 6–10 October 2025. 2025. P. 1–6. URL: https://doi.org/10.1109/khpiweek61436.2025.11288655 (date of access: 09.03.2026).

2. Адаптивні методи управління розподіленими хмарними обчисленнями / М. О. Волк, Р. М. Брестовицький, І. А. Самойлов, Є. І. Ковтун // Проблеми інформатизації = Problems of informatization : тези доп. тринадцятої міжнар. наук.-техн. конф., 27-28 листопада 2025 р., м. Баку, м. Харків, м. Бельсько-Бяла : [у 4 т.]. Т. 4. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – С. 14-15.

3. VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. *VOSviewer*. URL: https://www.vosviewer.com/ (date of access: 09.03.2026).

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТОРГОВИМИ БОТАМИ ДЛЯ РИНКІВ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ПОДІЙ

Тарасенко Д.П., Сітніков В.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
Сітнікова С.І.
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

У сучасних умовах цифровізації фінансових ринків значного поширення набувають автоматизовані системи торгівлі, які дозволяють виконувати операції без безпосередньої участі людини. Особливу увагу привертають ринки передбачення подій (prediction markets), які базуються на колективному прогнозуванні майбутніх подій шляхом купівлі та продажу відповідних контрактів. Такі ринки широко використовуються для оцінки політичних, економічних і соціальних подій, а також для аналізу ризиків і прийняття управлінських рішень.

Автоматизовані торгові боти відіграють ключову роль у функціонуванні таких ринків, забезпечуючи швидке реагування на зміну інформації, виконання великої кількості операцій і підтримку ліквідності. Розробка системи управління торговими ботами передбачає створення програмного середовища, яке дозволяє координувати їх роботу, налаштовувати стратегії торгівлі та здійснювати моніторинг результатів у режимі реального часу [1].

Основою функціонування торгових ботів є алгоритми аналізу даних, які використовують методи машинного навчання, статистичного аналізу та обробки природної мови. Це дозволяє враховувати новинні потоки, соціальні сигнали та історичні дані для формування прогнозів і прийняття рішень щодо купівлі або продажу активів [2].

Автоматизована система управління повинна забезпечувати централізований контроль над групою ботів, включаючи розподіл завдань, управління ризиками та оптимізацію торгових стратегій. Використання модульної архітектури дозволяє гнучко змінювати конфігурацію системи та інтегрувати нові алгоритми без значних змін у її структурі.

Важливим аспектом є забезпечення надійності та відмовостійкості системи. У зв'язку з високою швидкістю змін на ринках передбачення навіть незначні затримки або збої можуть призвести до фінансових втрат. Тому необхідно використовувати розподілені обчислювальні середовища, системи резервування та механізми автоматичного відновлення роботи [3].

Окрему увагу слід приділити питанням безпеки. Система повинна забезпечувати захист даних, безпечне зберігання ключів доступу та контроль дій користувачів. Використання криптографічних методів і механізмів аутентифікації дозволяє мінімізувати ризики несанкціонованого доступу та кіберзагроз.[4]

З урахуванням сучасних тенденцій розвитку фінансових технологій доцільним є використання хмарних платформ для розгортання системи. Це дозволяє забезпечити масштабованість, гнучкість і доступність сервісів, а також ефективно обробляти великі обсяги даних.[5]

Крім того, важливим є впровадження систем моніторингу та аналітики, які дозволяють оцінювати ефективність роботи торгових ботів, виявляти аномалії та оптимізувати стратегії торгівлі. Використання візуалізаційних інструментів сприяє підвищенню прозорості роботи системи та полегшує прийняття управлінських рішень.

Метою доповіді є дослідження процесу розробки автоматизованої системи управління торговими ботами для ринків передбачення подій, визначення основних вимог до її функціонування та розробка ефективних підходів до побудови такої системи.

У доповіді розглянуто архітектуру системи, проаналізовано методи реалізації торгових стратегій, досліджено питання забезпечення безпеки, надійності та масштабованості, а також запропоновано рекомендації щодо підвищення ефективності роботи автоматизованих торгових систем.

Список літератури

1. Ковальчук В.О. Алгоритмічна торгівля та фінансові системи. Київ: КПІ, 2023. DOI: https://doi.org/10.34725/kpi.trading.2023.001

2. Бондаренко О.М. Методи аналізу даних у фінансових системах. Харків: ХНУРЕ, 2022. DOI: https://doi.org/10.34725/kharkiv.fintech.2022.002

3. Гнатюк С.О. Розподілені інформаційні системи. Львів: ЛНУ, 2023. DOI: https://doi.org/10.34725/lnu.distributed.2023.003

4. Chen Y., Pennock D. Prediction Markets and Their Applications. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/prediction.2023.004

5. Hull J. Options, Futures and Other Derivatives. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/finance.2022.005

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВІЗУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Харебов М.Ф., Єрошенко О.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Розвиток технологій комп'ютерного зору на сучасному етапі відкриває безмежні можливості для автоматизації процесів ідентифікації та локалізації об'єктів у динамічному середовищі. Актуальність розробки систем розпізнавання візуальних образів зумовлена необхідністю підвищення точності та швидкості обробки великих масивів візуальних даних у таких критично важливих сферах, як автономний транспорт, інтелектуальне відеоспостереження та медична діагностика [1]. Метою дослідження є створення комплексної системи, здатної не лише класифікувати об'єкти, а й визначати їх точні координати на зображенні в режимі реального часу, використовуючи передові архітектури глибокого навчання.

В основі функціонування системи лежать принципи згорткових нейронних мереж, які дозволяють ефективно вилучати ієрархічні ознаки – від простих ліній і текстур до складних геометричних форм. Теоретичний підхід базується на математичних операціях згортки та пулінгу, що забезпечують інваріантність до зсувів та масштабування. Проаналізовано сучасні моделі одностадійного розпізнавання, зокрема сімейство алгоритмів YOLO, які демонструють високу продуктивність завдяки розгляду задачі детекції як єдиної регресійної проблеми, що значно прискорює обчислення порівняно з двоетапними методами [2].

Програмна реалізація системи здійснюється із використанням мови програмування Python та бібліотек OpenCV і PyTorch, що надають потужний інструментарій для обробки відеопотоків та оптимізації нейромережевих обчислень.

Алгоритмічна база проекту враховує необхідність балансу між обчислювальною складністю та точністю розпізнавання, що досягається шляхом квантування моделей та використання методів прискорення на графічних процесорах. Запропоноване рішення дозволяє отримувати візуальний зворотний зв'язок у вигляді маркованих.

Список літератури

1. Федорченко В.М., Єрошенко О.А. Застосування алгоритмів штучного інтелекту для моделювання загроз інформаційних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки».* Т.6 (75). Ч. 2. 2025. С. 384-391. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.6.2/52

2. Fedorchenko V., Yeroshenko O., Shmatko O., Kolomiitsev O., Omarov M. Password hashing methods and algorithms on the .Net platform. *Advanced Information Systems*. №8(4). 2024. Pp. 82–92. DOI: 10.20998/2522-9052.2024.4.11

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ДИНАМІЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ІЄРАРХІЧНИХ СТРУКТУРАХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ

Гордійко В.Р., Єрошенко О.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

У сучасних умовах функціонування великих підприємств корпоративна комп'ютерна мережа перетворюється на критично важливу інфраструктуру, від якої залежить швидкість прийняття управлінських рішень та стабільність сервісів. Проблема вибору ефективного методу маршрутизації полягає у необхідності підтримки гетерогенного середовища, де одночасно передаються дані систем планування ресурсів (ERP), голосовий трафік та відеопотоки високої чіткості [1]. Метою дослідження є проєктування гібридної системи маршрутизації, яка поєднує класичні детерміновані алгоритми з сучасними інтелектуальними методами управління трафіком для досягнення максимальної пропускної здатності та мінімізації часу відновлення мережі після збоїв.

Розглянуто механізми функціонування протоколу EIGRP як прикладу гібридної маршрутизації, що поєднує швидкість збіжності протоколів стану каналу з простотою дистанційно-векторних підходів. Математичне моделювання мережевих процесів дозволяє оптимізувати розподіл навантаження через декілька паралельних каналів зв’язку (ECMP), що запобігає перевантаженню окремих магістральних вузлів та забезпечує рівномірне використання орендованих каналів [2].

Алгоритмічна стійкість мережі підсилюється впровадженням політик маршрутизації на основі ідентифікації додатків, що дозволяє системі розпізнавати тип контенту безпосередньо в процесі передачі. В роботі також проаналізовано методи підвищення безпеки, зокрема використання віртуальних екземплярів маршрутизації (VRF), що дозволяє ізолювати трафік різних відділів або дочірніх компаній у межах єдиної фізичної інфраструктури.

Запропонована модель маршрутизації створює гнучкий фундамент для подальшого масштабування бізнесу, забезпечуючи високу якість клієнтського досвіду та надійний захист корпоративних даних у глобальному інформаційному просторі.

Список літератури

1. Єрошенко О. А., Піняєв Є. В., Пивоварова Д. І., Кравченко П. О. Метод оптимізації publish-subscribe архітектур для інтелектуального інформування в умовах обмежених ресурсів IoT, *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, Т. 1. № 83. 2026. С. 69-76. DOI: 10.26906/SUNZ.2026.1.069

2. Fedorchenko V., Yeroshenko O., Shmatko O., Kolomiitsev O., Omarov M. Password hashing methods and algorithms on the .Net platform. *Advanced Information Systems*. №8(4). 2024. Pp. 82–92. DOI: 10.20998/2522-9052.2024.4.11

ПРОГРАМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Виродов В.Р., Єрошенко О.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Комп'ютерний зір є одним із ключових напрямів сучасних інформаційних технологій, що забезпечує автоматизований аналіз та інтерпретацію зображень і відеоданих. Стрімкий розвиток нейронних мереж значно розширив можливості систем комп'ютерного зору, дозволяючи досягати високої точності у задачах розпізнавання, детекції та сегментації об'єктів [1-2].

Актуальність дослідження зумовлена широким застосуванням таких технологій у різних галузях, зокрема в автономному транспорті, медичній діагностиці та системах безпеки. У роботі розглянуто основні методи комп'ютерного зору, включаючи класифікацію зображень, детекцію об'єктів, сегментацію та виявлення ключових точок. Значну увагу приділено сучасним підходам до розпізнавання облич та аналізу відеоданих. Проаналізовано типи нейронних мереж, що застосовуються у даній галузі, зокрема згорткові нейронні мережі, рекурентні мережі та трансформери, а також генеративні моделі.

Досліджено популярні архітектури нейронних мереж, такі як LeNet, AlexNet, VGG та ResNet, а також сучасні моделі детекції об'єктів, зокрема YOLO та Faster R-CNN, і сегментаційні мережі типу U-Net. Розглянуто інструментальні засоби реалізації, включаючи бібліотеки TensorFlow, PyTorch та OpenCV, а також спеціалізовані фреймворки для побудови моделей комп'ютерного зору.Визначено основні переваги використання нейронних мереж, зокрема високу точність та автоматизацію процесів, а також недоліки, такі як потреба у великих обсягах даних та значні обчислювальні витрати. Окремо розглянуто сучасні тенденції розвитку галузі, включаючи self-supervised навчання, мультимодальні моделі, edge AI та підходи до пояснюваності штучного інтелекту.

Результати роботи підтверджують ефективність застосування нейронних мереж у задачах комп'ютерного зору та визначають перспективи подальшого розвитку даного напряму

Список літератури

1. Єрошенко О. А., Піняєв Є. В., Пивоварова Д. І., Кравченко П. О. Метод оптимізації publish-subscribe архітектур для інтелектуального інформування в умовах обмежених ресурсів IoT, *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, Т. 1. № 83. 2026. С. 69-76. DOI: 10.26906/SUNZ.2026.1.069

2. Fedorchenko V., Yeroshenko O., Shmatko O., Kolomiitsev O., Omarov M. Password hashing methods and algorithms on the .Net platform. *Advanced Information Systems*. №8(4). 2024. Pp. 82–92. DOI: 10.20998/2522-9052.2024.4.11

ЕЛЕМЕНТАРНІ КЛІТИННІ АВТОМАТИ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

Цірюльніков Д.В., Міхаль О.П.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Клітинні автомати (КА) як модель дискретної динамічної системи давно привертають увагу дослідників завдяки своїй простоті, локальності правил переходу та здатності породжувати надзвичайно складну поведінку з елементарних взаємодій. Водночас навчання з підкріпленням (RL) залишається одним із ключових підходів у сучасному штучному інтелекті, що дозволяє агентам навчатися оптимальній поведінці шляхом взаємодії з середовищем. Однак традиційні RL-алгоритми часто стикаються з проблемами обчислювальної складності, особливо у задачах, що вимагають довготривалої пам’яті або роботи в умовах високої розмірності простору станів.

Одним із перспективних напрямів подолання цих обмежень є резервуарні обчислення – парадигма, в якій фіксована нелінійна динамічна система (резервуар) використовується для відображення вхідних сигналів у простір високої розмірності, після чого навчається лише лінійний вихідний шар. Попередні дослідження показали, що КА, зокрема елементарні клітинні автомати (ЕКА), можуть ефективно виконувати роль такого резервуару, демонструючи здатність до довготривалої пам’яті на еталонному тесті x-bit memory benchmark [1].

Метою доповіді є аналіз результатів дослідження, присвяченого застосуванню ЕКА як резервуару для розв’язання задач RL. Робота спрямована на дослідження унікальних правил елементарних клітинних автоматів та їхніх властивостей у різних RL-середовищах, а також на визначення впливу ключових гіперпараметрів резервуару на продуктивність навчання.

Дослідження ґрунтується на поєднанні трьох теоретичних областей: теорії клітинних автоматів, резервуарних обчислень та навчання з підкріпленням.

Запропонований підхід використовує одновимірні ЕКА як резервуар – динамічну систему, що приймає на вхід поточний стан агента або середовища, еволюціонує згідно з обраним правилом переходу протягом певної кількості ітерацій, а отриманий стан резервуару використовується для апроксимації функції цінності або політики агента.

У роботі досліджуються різноманітні правила ЕКА, а також варіюються такі параметри, як розмір резервуару (кількість комірок), кількість ітерацій еволюції, частка комірок, що оновлюються на кожному кроці, та спосіб їхнього оновлення [2].

Особливу увагу приділено правилам, що демонструють критичну поведінку, оскільки саме в таких системах часто спостерігається максимальна обчислювальна потужність.

Експерименти проводилися на кількох типових RL-задачах, що вимагають від агента здатності запам'ятовувати попередні події для прийняття оптимальних рішень, серія задач із частковим спостереженням. Вибір таких завдань зумовлений тим, що резервуари на основі ЕКА раніше продемонстрували здатність до довготривалої пам'яті, що є критичним компонентом успішного RL. Основні результати дослідження можна узагальнити наступним чином.

Показано, що варіації розміру резервуару, кількості ітерацій та способу оновлення комірок суттєво впливають на продуктивність моделі, причому характер цього впливу сильно залежить від конкретного обраного правила ЕКА [3].

Для деяких правил збільшення розміру резервуару призводить до монотонного покращення результатів, тоді як для інших – спостерігається ефект насичення або навіть деградація.

Не всі правила ЕКА однаково придатні для виконання ролі резервуару в RL. Правила, що належать до класу хаотичних, часто забезпечують кращу роздільну здатність станів, але можуть призводити до нестабільності навчання. Натомість правила зі складною, але передбачуваною динамікою демонструють кращу здатність до узагальнення.

Ефективність навчання. Запропонований підхід виявився швидким методом навчання високопродуктивних моделей завдяки обчислювально ефективним методам навчання резервуару, навчається лише лінійний вихідний шар.

Це робить його особливо привабливим для застосувань, де ресурси обмежені, або де потрібне швидке повторне навчання.

Це дослідження робить важливий внесок у розвиток гібридних підходів, що поєднують теорію клітинних автоматів, резервуарні обчислення та навчання з підкріпленням.

Результати дослідження свідчать про те, що ЕКА можуть слугувати ефективною альтернативою традиційним рекурентним нейронним мережам як резервуар у задачах RL, особливо коли критичними є вимоги до обчислювальної ефективності та наявність довготривалої пам'яті.

Список літератури

1. Glover T. E., Lind P., Yazidi A., Osipov E., Nichele S. Investigating Rules and Parameters of Reservoir Computing with Elementary Cellular Automata, with a Criticism of Rule 90 and the Five-Bit Memory Benchmark. *Complex Systems*. 2023. Vol. 32, No. 3. P. 309-351. DOI: https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.32.3.309

2. Glover T. E., Osipov E., Nichele S. On when is Reservoir Computing with Cellular Automata Beneficial. arXiv preprint arXiv:2407.09501. 2024. 10 с.

3. Nishiyama Y., Uragami D., Nichele S., Gunji Y.-P., Adamatzky A. Generalization performance of reservoir computing implemented by asynchronously tuned elementary cellular automaton on parity task. *Artificial Life and Robotics*. 2026. Vol. 31. P. 77-82. DOI: https://doi.org/10.1007/s10015-025-01045-x.

ГІБРИДНИЙ МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Добровольський О.О., Ляшенко О.С.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Сучасний етап розвитку інформаційних систем підтримки прийняття рішень (СППР) характеризується переходом від жорстко детермінованих моделей до адаптивних алгоритмів, здатних навчатися на основі накопичених даних. Еволюція СППР від модельно-орієнтованих систем до систем, керованих даними, зумовлена експоненційним зростанням обсягів інформації та необхідністю врахування складних, нелінійних залежностей у процесах управління [1]. Однак застосування методів машинного навчання у відповідальних доменах, таких як фінанси, медицина чи промисловість, наштовхується на низку викликів: проблема «чорної скриньки» знижує довіру до автоматизованих рекомендацій, дисбаланс класів у реальних даних призводить до неадекватної чутливості моделей до рідкісних, але критичних подій, а статичний характер більшості ансамблевих методів не дозволяє адаптувати стратегію прогнозування до локальних особливостей вхідних даних [2].

Метою доповіді є розробка гібридного методу підтримки прийняття рішень, який інтегрує сильні сторони градієнтного бустингу та нейронних мереж через механізм динамічного зважування, що враховує як глобальні статистичні властивості навчальної вибірки, так і локальні характеристики конкретного прецеденту.

Проведений у роботі аналіз показав, що ансамблеві методи на основі дерев рішень, зокрема сучасні реалізації градієнтного бустингу (XGBoost, LightGBM, CatBoost), демонструють найвищу прогностичну точність на структурованих табличних даних.

Ключова перевага цих методів для СППР полягає у природній інтерпретовності завдяки можливості оцінки важливості ознак та використанню SHAP-значень для локальних пояснень. Глибокі нейронні мережі володіють унікальною здатністю до автоматичного вилучення ієрархічних представлень та кращого узагальнення на нетипових прикладах, що знаходяться в областях низької щільності навчальних даних. Наявні гібридні підходи, як правило, використовують статичне усереднення або стекінг, що не дозволяє повною мірою використати контекстно-залежну комплементарність цих двох класів моделей.

Метою навчання є побудова функції прийняття рішень $f: X \to Y$, яка для довільного вхідного вектора $x \in X$ повертає рекомендоване рішення $\hat{y} = f(x)$. Ця функція повинна якомога точніше відтворювати закономірності, притаманні навчальній вибірці, і водночас мати здатність до узагальнення нових, раніше не бачені даних.

Для кількісної оцінки якості прийнятих рішень вводиться функція втрат $\ell: Y \times Y \to \mathbb{R}_+$, яка визначає вартість помилки, коли прогнозоване рішення $\hat{y}$

відрізняється від істинного y. Функція втрат задовольняє природній умові $\ell(y, \hat{y}) = 0$ для всіх $y \in Y$.

Запропонована математична модель базується на чотириетапному процесі прийняття рішень. На першому етапі здійснюється попередня обробка вхідного вектора $x' = \phi(x)$, що включає нормалізацію, кодування категоріальних змінних та заповнення пропусків. Другий етап передбачає незалежне прогнозування двома базовими моделями: машиною градієнтного бустингу та багатошаровою нейронною мережею.

Результатом їхньої роботи є вектори ймовірностей $p_{GB}(x)$ та $p_{NN}(x)$ для кожного з можливих класів.

Ключовою інновацією методу є третій етап – динамічне зважування прогнозів.

На відміну від статичних ансамблів, де ваги фіксовані для всіх вхідних векторів, у пропонованому підході вага, що призначається моделі градієнтного бустингу, є функцією від характеристик поточного прецеденту:

$$w_{GB}(x) = \sigma(\beta_0 + \sum_{j=1}^{m} \beta_j \cdot conf_j(x) + \gamma \cdot density(x))$$

де $\boldsymbol{\sigma}$– сигмоїдна функція, що забезпечує значення ваги в інтервалі (0, 1); $\boldsymbol{\beta}_0, \boldsymbol{\beta}_j, \boldsymbol{\gamma}$– параметри, що навчаються на валідаційних даних; $\boldsymbol{conf}_j(\boldsymbol{x})$ – впевненість моделі щодо ознаки j; $density(x)$ – оцінка щільності навчальних даних в околі точки x.Фінальний прогноз формується як зважена комбінація $p_{final}(x) = w_{GB}(x) \cdot p_{GB}(x) + w_{NN}(x) \cdot p_{NN}(x)$.

На четвертому етапі приймається рішення

$$\hat{y} = \arg max_{k \in \{1,\dots,K\}} p_{final}(x)_k$$

та обчислюється оцінка впевненості, яка враховує не лише максимальну ймовірність, але й ступінь узгодженості між базовими моделями. Для кількісного вимірювання розбіжності між розподілами p_{GB}та p_{NN} використовується симетрична та обмежена міра – розбіжність Йенсена-Шеннона.

На базі результатів дослідження розроблена програмна реалізація гібридного методу та проведено експерименти на реальних наборах даних.

Запропонований підхід до динамічного зважування вигідно вирізняється з поміж існуючих аналогів тим, що забезпечує адаптивне комбінування інтерпретовності деревоподібних структур із гнучкістю нейромережевих представлень.

Список літератури

1. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. Nature. 2015;521(7553):436-444. doi:10.1038/nature14539

2. Lessmann S, Baesens B, Seow HV, Thomas LC. Benchmarking state-of-the-art classification algorithms for credit scoring: A ten-year update. European Journal of Operational Research. 2015;247(1):124-136. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.030

СЕКЦІЯ 5
СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

Керівник секції: д.т.н., проф. О. О. Можаєв, ХНУВС, Харків
Секретар секції: PhD А. П. Шиман, НТУ «ХПІ», Харків

RESEARCH EFFECTIVENESS FREE SPACE OPTICS OMMUNICATION

Ibrahimov B.G., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan
National Defense University; Baku, Azerbaijan

Free Space Optics (FSO) communication is a technology that uses light as its carrier to transmit data between two points in the atmosphere channel [1].

Free space optics (FSO) are sensitive to weather conditions – primary to fog and precipitation – may face with substantial loss of its power during passing through channel [1–3]. The effect of absorption and scattering of the light carrier signal (i. e. Laser) can be described by the path – dependent attenuation coefficient [2].

A laser communication system is advantageous to radio frequency communication systems for the following reasons [1,2,4,5]: no licensing requirements or tariffs are required for its utilization; its large bandwidth allows very high data rates; the system is light weight, small, and has compact dimensions; it operates with low power consumption.

Considering the above, this paper theoretically analyzes the efficiency and attenuation of FSO optical communication systems operating at selected wavelengths: 650 nm, 850 nm, 950 nm 1310 nm and 1550 nm under fog conditions, using PPM (Pulse Position Modulation) and NRZ-OOK modulation techniques over fog channel [2, 4].

On the other hand, unlike radio frequency systems, laser communication systems have a very narrow laser beam divergence angle as well as a very narrow receiver field of view [1, 2]. The proposed model for the prediction of attenuation due to fog is reported in [3-5].

One of the keys of any communication system is the selection of a suitable modulation technique; pulse position modulation L-PPM can provide higher power efficiency at the expense of increased bandwidth requirement [2, 4].

On the other hand, on – off – key (OOK-NRZ) is the simplest and widely used modulation scheme in free space optical communication due to its simplicity in the implementation. OOK-NRZ offers similar power efficiency to the 2-PPM [1, 5].

For a terrestrial FSO link transmitting optical signal through the atmosphere, the received signal power at a distance, L from the transmitted signal power for FSO is given by [1, 4]:

$$P_R(\lambda_i) = P_T(\lambda_i) \cdot \frac{A_R(\lambda_i)}{(\theta \cdot L_{\max})^2} \cdot \exp(-\gamma_{fog} \cdot L_{\max}),\ i = \overline{1,n},$$

where A is the receiver area, θ is the full divergence angle; γ_{fog} is the fog attenuation factor (dB/km).

The function of $\gamma_{fog}(\lambda_i)$ is the total extinction coefficient per unit length, which represents the attenuation of the transmitted light. It is composed of terms for scattering and absorption, and general it is the sum of the following terms [1, 4]:

$$\gamma(\lambda_i) = \alpha_m(\lambda_i) + \alpha_a(\lambda_i) + \beta_m(\lambda_i) + \beta_a(\lambda_i),\ i = \overline{1,n}. \quad (2)$$

The first two terms represent the molecular and aerosol absorption coefficients, respectively; while the last two terms are the molecular and aerosol scattering coefficients respectively.

The wavelengths used in FSO are basically chosen to coincide with the atmospheric transmission windows [1, 2, 5], resulting in the attenuation coefficient being dominated by scattering the attenuation is reduced to:

$$\gamma_{spec.}(\lambda_i) = \beta_a(\lambda_i),\quad i = \overline{1,n} \quad (3)$$

Attenuation coefficient based on empirical measurement data was calculated by the following empirical model [2, 5]:

$$\beta_a(\lambda_i) = 3.91\, L_v \cdot (\lambda_i / 550)^{-\delta},\ i = \overline{1,n}, \quad (4)$$

where V is the visibility in (km); λ_i represent the wavelength in (nm).

References

1. Kashani F.D., Hedayati Rad M.R., et.al, Reliability analysis of an auto-tracked FSO link under adverse weather condition, Optik-International journal for light and electron optics, vol. 124, iss. 22, (2013) 5462-5467.
2. İbrahimov B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2. p.4-5
3. Yusifbayli N., Guliyev H. Intellectual voltage management in electrical networks. Isgt Innovative smart grid technologies europa 2011, IEEE, PES, Manchester UK, 05-07 December 2011.pp.235-246.
4. Ibrahimov B. G., & Hashimov E. G. (2025). Special purpose machine learning and data mining methods. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 2: sections 2. -pp.90
5. Ibrahimov B.G. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.
6. Ibrahimov B.G. et al. Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.10-11
7. Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30
8. Ibrahimov B.G. Research quality of functioning of the efficiency optical telecommunication systems using spectral technologies. *In* Проблеми інформатизації. 2023. Т.1. – С. 29-30.

ANALYSIS TIME INDICATORS OF TELECOMMUNICATION BUSINESS PROCESSES

Ibrahimov B.G.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan
National Defense University; Baku, Azerbaijan
Hamidov R.R.
Azerbaijan State University of Economics; Baku, Azerbaijan

In today's competitive environment, the telecommunications and multimedia services market is constantly intensifying. New telecommunications business models are emerging, technologies are becoming more complex, and the range of multimedia and intelligent services is expanding [1]. The telecommunications industry is also constantly evolving due to the rapid development of digital technology and communications infrastructure. Therefore, to successfully implement a telecommunications business in this area, it is necessary to reduce costs and implement digital transformation, logistics, and document processing as efficiently as possible. A thorough analysis of business processes helps with this [2, 3].

Thus, the large number of customer requests and real-time service make the business processes of a telecommunications company a good subject for research and analysis using queuing theory. Furthermore, this analysis is facilitated by the extensive set of standards and recommendations developed by the international telecommunications association TeleManagement (TM) Forum [1, 4, 5].

TM Forum is a global association for digital businesses (e.g., service providers, telecom operators, etc.) which provides industry best practices, standards and proofs-of-concept for the operational management systems, also known as Operations Support Systems [4]. Therefore, the task of constructing a mathematical model of business processes and providing a numerical analysis of its time characteristics of the unified model of telecommunication business processes is relevant.

Taking into account the above, this paper considers the research objectives and analysis of time indicators of telecommunication business processes from the point of view of queuing theory using open BCMP- network methods [3, 4].

It should be noted that the Open BCMP Network is a queueing network model with external arrival and departure of message requests, satisfying the Baskett, Chandy, Mani, and Palacios (BCMP) theorem, which provides a product-multiplicative probability distribution states. It describes systems with different types of service in a telecommunications system for performing various business processes, client classes, and queuing disciplines, allowing for analytical determination of stationary system characteristics [2, 3, 5].

Consequently, in the realities of business in a telecommunications system, no process operates independently of the others. Their flows intersect at one level or another. Therefore, based on the method described in [2], a model was constructed, shown in Fig. 1, which integrates the reference end-to-end business processes [4]. The model is constructed as an exponential network with heterogeneous requests, the so-called BCMP network [2, 4, 5].

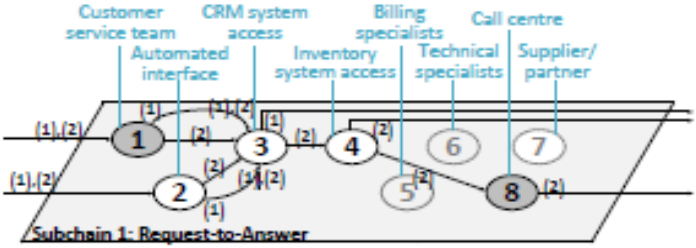


Fig. 1. Structural mathematical model of end-to-end telecommunications business processes using the open BCMP network

As Figure 1 shows, we examined the following telecommunications processes: Request-Resolution, Complaint-Resolution, Failure-Resolution, Termination-Confirmation, and Request-Change. Thus, the mathematical model most accurately reflects the processes of a telecommunications company and allows for assessing the level of process performance.

References

1. TM Forum Frameworx, https://www.tmforum.org/tm-forum-frameworx.
2. Samouylov K., Gaidamaka Y., Zaripova E. Analysis of Business Process Execution Time with Queueing Theory Models // Information Technologies and Mathematical Modelling - Queueing Theory and Applications / Dudin A., Gortsev A., Nazarov A., Yakupov R. (eds.); Communications in Computer and Information Science.- 2016. Vol. 638. pp. 315–326.
3. Ibrahimov, B. G. (2021). Telecommunication systems and technologies. Textbook for technical higher schools. AzTU, Baku. 354 p.
4. TM Forum: Business process framework (eTOM) End-to-end business flows. Frameworx Standard GB921 Addendum E. R16.5.1, Vol. 16.5.2, 2017.
5. Ibrahimov, B. G. (2025, November). Research Quality of Communication in Multiservice Telecommunication Networks. In *2025 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1-5). IEEE.

AUTONOMOUS AND SEMI-AUTONOMOUS UNMANNED SYSTEMS IN THE ARMED FORCES: ARCHITECTURE, OPERATIONAL CONSTRAINTS, AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Talibov A.M., Ibrahimov B.G., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The rapid evolution of unmanned technologies has become one of the defining features of contemporary military transformation. Autonomous and semi-autonomous unmanned systems are increasingly used in reconnaissance, surveillance, target acquisition, logistics, perimeter protection, mine countermeasures, and strike support. Their growing military relevance is associated with the ability to operate in dangerous

environments, reduce personnel exposure, extend operational reach, and increase the tempo of mission execution. At the same time, the transition from remotely controlled platforms to systems with elements of autonomy raises complex technical, organizational, and doctrinal questions. The relevance of this study lies in the need to assess how autonomous and semi-autonomous unmanned systems can be integrated into the armed forces in a manner that improves operational effectiveness without creating unacceptable risks in control, reliability, and accountability. The main objective of the research is to examine the architectural principles of such systems, identify their major operational constraints, and determine the most promising directions for their further development in the military domain.

Methodology

The study is based on a systems engineering approach combined with structural and functional analysis of unmanned military platforms. The research applies conceptual modeling to describe the internal architecture of autonomous and semi-autonomous systems, including perception, navigation, communication, mission execution, and control subsystems. Comparative analysis is used to distinguish the operational characteristics of remote, semi-autonomous, and highly autonomous platforms. The methodological basis also includes scenario-oriented analysis of representative military tasks performed by unmanned systems in contested environments. These tasks include reconnaissance in denied areas, route patrol, convoy support, logistics delivery, and coordinated operation with manned assets. Logical analysis is employed to assess the relationship between mission effectiveness, autonomy level, operator involvement, communication dependency, and environmental uncertainty.

The first major argument of the study is that the military value of unmanned systems is determined not simply by the absence of a crew onboard, but by the architecture through which sensing, control, communication, and decision functions are organized. In a basic remote-control model, the platform depends heavily on continuous operator input and stable communication channels. In a semi-autonomous model, the system can independently perform selected functions such as route following, obstacle avoidance, target tracking, or return-to-base procedures, while the human operator retains control over mission-critical decisions. This shift changes not only technical performance, but also the logic of command, supervision, and risk distribution.

The second argument is that semi-autonomous systems currently represent the most practical and operationally acceptable model for broad military deployment. Full autonomy remains limited by the unpredictability of combat environments, the presence of deception and interference, and the need for context-sensitive judgment. By contrast, semi-autonomous systems reduce operator workload, improve response speed in routine functions, and preserve meaningful human control over lethal or strategically sensitive actions.

The study further shows that the effectiveness of unmanned systems depends on several core components: the perception subsystem, the data processing and decision layer, the communication subsystem, and the execution subsystem. Military

performance depends on the coordinated functioning of all these elements rather than on any single component in isolation. At the same time, the analysis identifies major limitations. One of the most significant is communication vulnerability, since many unmanned systems depend on navigation signals, command links, or data exchange channels that may be jammed, spoofed, or intercepted in a contested electromagnetic environment. Another limitation is environmental uncertainty. Terrain complexity, weather conditions, battlefield obscurants, and dynamic adversary behavior reduce the reliability of onboard perception and automated routines. A further challenge concerns trust and controllability, since commanders may hesitate to rely on autonomous functions when system behavior is insufficiently transparent.

The study also emphasizes that unmanned platforms are most effective not as isolated devices, but as elements of an integrated combat system linked with reconnaissance assets, command networks, and human operators. From a forward-looking perspective, the most promising directions include resilient navigation, onboard AI for degraded conditions, cooperative interaction among multiple platforms, and improved human-machine interfaces for mission supervision

Results and Conclusions

The study confirms that autonomous and semi-autonomous unmanned systems can increase military effectiveness by extending operational reach, reducing personnel exposure, and improving mission persistence in dangerous environments. However, their real value depends on architectural reliability, communication resilience, and proper integration into command structures. The main conclusion is that semi-autonomous systems currently represent the most balanced option for broad military adoption. They combine limited functional independence with retained human authority over critical actions. The practical significance of the study lies in its applicability to defense planning, doctrinal development, and the formulation of technical requirements for next-generation unmanned systems.

References

1. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

2. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

3. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

4. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

5. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

6. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems.* 2026. 10(1), 66-71.

7. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

8. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

9. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

10. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

11. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

12. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

13. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

14. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

15. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

16. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

17. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

18. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

19. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

20. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

21. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

22. Atayev S.U. et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.100-101

23. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

24. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

25. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

RESEARCH EFFICIENCY MULTISERVICE NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT SIGNAL-CODE CONSTRUCTIONS

Karimov V.R.
Institute of Mathematics, Baku, Azerbaijan

Based on the study, communication quality characteristics show that the effectiveness telecommunication systems is characterized by its ability to provide a given number of messages I(x, y) with the least amount time $T_{\min}$, frequency bandwidth ΔF_k, signal power P_S and guaranteed quality of service QoS and QoE [1,2].

Taking into account the components of the communication quality vector, such as the probability $P_E(E_b, P_S)$ reception error in terms noise immunity indicators of telecommunication systems, which are described by functional dependence as follows [3,4]:

$$P_E(E_b, P_S) = W[SNR(E_b, N_0), V_b(b), S_{SKK}(b,k), \eta_{SE}(\Delta F_S, b_i)], \quad (1)$$

where $SNR(E_b, N_0)$ – a function that takes into account the signal-to-noise ratio (Signal to-Noise to Rate) at the input of the demodulator, taking into account the energy of the bit signal E_b and the spectral power density of the interference N_0, which characterize complex indicators of communication quality; $V_b(b)$ – bit rate of message with binary code element b_i, $b_i = \{0,1\}$, $\eta_{SE}(\Delta F_S)$ – spectral efficiency telecommunication systems, which characterizes the efficiency using a channel over a frequency band ΔF_S, $S_{SKK}(b_i, k)$ – signal-code structure when encoding a channel and is expressed as follows [1,4]:

$$S_{SKK}(b_i, k) = k \cdot (E_b / T_b) \cdot \ell og_2 M, \quad (2)$$

where $k = (n - r)$ – respectively, k, r, and n – the number information, verification and general elements in the code combination.

Expressions (1) and (2) define the essence of the proposed new approach and characterize the indicators of quality and quantity of reliability of traffic message transmission systems.

In (1), one of the important indicators proposed new approach to the total noise immunity of telecommunication systems is the efficiency function $\eta_E(b_i)$, which takes into account the criteria for the quality and b_i quantity communication systems with a binary signal and is described as follows [1, 4]:

$$\eta_E(b_i) = \beta\,[\eta_{IE}(b_i), \eta_{SE}(b_i), \eta_{EE}(b_i)], \quad (3)$$

where $\eta_{IE}(b_i), \eta_{SE}(b_i), \eta_{EE}(b_i)$ – efficiency indicators, respectively, information, spectral and energy efficiency of telecommunication systems.

In (1), (2) and (3), among the analyzed characteristics of the reliability of the transmission traffic messages, a special place is occupied by the efficiency indicators

communication systems when using noise-resistant modulation and coding methods, as well as rational signal-code structures.

The spectral efficiency of telecommunication systems is expressed as follows:

$$\eta_{SE}(b_i) = \frac{V_b(b_i)}{\Delta F_k} = \frac{R_k}{T_b} \cdot \frac{\ell og_2 m_k}{\Delta F_k}, \quad (4)$$

where $V(b_i)-$ bit rate signals with binary code element b_i and equals $V(b_i) = \frac{1}{T_b} R_k \ell og_2 m_k$; R_k – code speed and equal $R_k = (k/n) < 1$, k, $n-$ and the number information and general symbols in the code combination, respectively; $m_k -$ code base or code alphabet volume; T_b- duration of a multi-position bit signal [4-9]

Expression (4) determines the degree of efficient use of the channel over the frequency band and characterizes the quality of communication when transmitting and receiving traffic messages.

References

1. Ibrahimov, B. G. (2021). Telecommunication systems and technologies. Textbook for technical higher schools. AzTU, Baku. 354 P.

2. Ibrahimov, B. G., Yusifov, C. A., & Binnetov, M. F. (2025, June). Research Methods of Assessing the Efficiency Information Protection Systems in Multiservice Communication Networks. In2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO) (pp. 1-4). IEEE.

3. Yusifbayli, N.A., Guliyev, H.B. Intelligent Voltage Regulation on Base of Fuzzy Sets Theory. The 12th International Conference on Pobabillstic Methods Applied to Power Systems. PMAPS 2012, 10-14th June 2012, Istanbul, Turkey, p.447-453.

4. Ibrahimov, B. G., Namazov, M. B., & Quliev, M. N. (2020). Analysis performance indicators network multiservice infrastructure using innovative technologies. In *Proceedings of the 7-th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications* (Vol. 2, pp. 176-178).

5. Gasimov V.A., Mammadzada N.F., Mammadov J.I. Method of hidden transmission of information based on fractals and its software. Tomsk State University Journal of Control and Computer Science, № 65, 2023, pp. 95-104.

6. Hashimov E.G. (2026). Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*, *10*(1), 66–71.

7. Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30

8. Ibrahimov B.G. et al. Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.10-11

9. İbrahimov B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2. p.4-5.

STUDY OF COMMUNICATION SYSTEM USING MIMO TECHNOLOGY

Humbatov R.T., Mammadova F.V., Mirzoev O.H.
Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan
Ibrahimov R.F.
Institute of Control Systems NASA, Baku, Azerbaijan

Communication systems with many transmitting and many receiving antennas (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) provide high spectral efficiency due to spatial multiplexing (compression) of signals and spatial diversity of antennas, allowing to reduce the bit error rate (BER).

At present, the rapid development multiservice telecommunication networks, given the intensive growth in the volume transmitted useful and service traffic packet flows, requires the creation noise-resistant radio engineering systems using MIMO technology with increased performance radio communication networks [1].

However, in real radio engineering systems there are various distortions, such as interference and multipath fading, which can significantly affect the quality of radio signal reception. Radio communication is an integral element of a modern multiservice telecommunication network.

This determines the requirements for the simplicity of its communication organization, high throughput and mobility, simple recovery and low cost radio channels when using MIMO technology [1-8]. In addition, the MIMO processing mode was widely introduced into practice at the stage of the emergence 4G-LTE and 5G-NR (New Radio) mobile communication networks.

In each receiving antenna, the signals coming from all transmitting antennas are summed. The received signals in antennas $Rx_1,...,Rx_N$ are designated as $y_1,...,y_N$.

In this regard, the task of determining the potential capabilities of radio engineering systems for this mode has become especially relevant. The known results related to this issue were obtained based on the approach associated with maximizing the channel capacity according to Shannon [2]. The MIMO capacity when using the Alamouti scheme is determined by the formula [1]:

$$C_{\max}(A) = \Delta F_k \cdot \sum_{i=1}^{m} [1 + (P_0 \cdot \lambda_i / M)] , \quad (1)$$

where ΔF_k – channel bandwidth; P_0 – maximum permissible broadcast level; λ_i – eigenvalues of the matrix **H**.

Based on (1) it can be determined at the reception $SNR(P_0)$:

$$SNR(P_0) = 10\ell g[P_0 \cdot (\lambda_i / M)], \text{ dB} \quad (2)$$

From (1) and (2) it is evident that the Alamouti scheme can lead to losses expressed as an effective reduction by M times of the $SNR(P_0)$ present in the performance formula.

The most important task in the development radio engineering systems for transmitting discrete messages is the constant increase in their noise immunity under

conditions harmful influence various sources interference and linear distortions in the radio communication channel with increased transmission speed.

As an indicator noise immunity, the probability of erroneous reception a bit is usually used, which significantly depends on the type manipulation and coding used in the channels message transmission (CMT).

At present, in CMT, including military ones, due to the strict requirements imposed on them for the speed data transmission and the volume transmitted information, signals with M-QAM (Quadrature amplitude modulation) are used.

Now we can determine the probability erroneous reception at least one of the m subcarriers when receiving M-QAM signals against an Additive white Gaussian noise (AWGN) background, which is expressed as [2]:

$$P_{SER}(h) = 1 - \{\frac{1}{2^{m-1}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [1 + \mathrm{erf}(u/\sqrt{2})]^{m-1} \cdot \exp[-0.5(u - \sqrt{2P_S T_S / N_0})^2]^m \, du\}^m, \quad (3)$$

Expression (3) determines the probability error per symbol, which is the SER characteristic (SER – Symbol Error Rate) of the demodulator and characterizes the probability of erroneous reception of a bit when receiving M-QAM signals against the background AWGN.

References

1. Ibrahimov, B. G., & Yakhyaev, B. M. (2024, November). Research of transmission capacity radio engineering systems using MIMO technology. In *Problems of informatization.* (Vol. 1, pp. 50-51).
2. Yusifbayli, N., Guliyev, H. Intellectual voltage management in electrical networks. Isgt Innovative smart grid technologies europa 2011, IEEE, PES, Manchester UK, 05-07 December 2011.pp.235-246.
3. Ibrahimov, B. G. (2025, November). Research Quality of Communication in Multiservice Telecommunication Networks. In *2025 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1-5). IEEE.
4. Abbasov A.M., Gasimov V.A. Organization of thematic-oriented search in global information systems. Computer design and computational defense systems. 2011.p.181-198.
5. Ibrahimov, B. G., Ismaylov, Z. A., Orujova, M. Y., & Mammadov, I. M. (2022, May). About one problem of control network and channel resources in communication networks during processing useful and service message signals. In *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* (pp. 1-4).
6. Ibrahimov, B. G. (2021).Telecommunication systems and technologies. Textbook for technical higher schools. AzTU, Baku. 354 P.
7. Hashimov E.G. (2026). Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*, *10*(1), 66–71.
8. Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30

DEVELOPMENT OF NATIONAL SATELLITE PROGRAMS AS INDICATORS OF TECHNOLOGICAL SYSTEM EVOLUTION

Ahmadzada S.I.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Early satellite missions can be treated as engineering prototypes that reveal how a country organizes technology under constraint. Rather than isolated achievements, they function as early models of system architecture, where decisions about structure, functionality, and risk directly influence how later space systems are built. A comparison of first-generation satellites shows that differences in design were not only technical, but reflected funding models, institutional capacity, and access to launch infrastructure.

Ofeq-1 (1988) fits neither model exactly and is best understood as constraint-driven engineering. The satellite operated in low Earth orbit for approximately 118 days and was designed primarily to validate control and communication subsystems under national launch limitations [1-3].

Its architecture remained compact, but unlike Sputnik, it was not purely demonstrative. Unlike Explorer, it did not attempt broad functional expansion. Instead, it reflects a selective strategy, which is isolating and verifying critical elements within a limited configuration.

This approach suggests a development philosophy shaped by restricted launch conditions and the need to build capability incrementally without overextending system complexity.

A different pattern appears in India's Rohini RS-1 (1980), with a mass of around 35 kg. The Rohini series was structured as a sequence of missions, rather than focusing on a single breakthrough. Each of them introduced controlled improvements in stabilization, telemetry, and payload performance [3]. This reflects a cumulative development model, where reliability is achieved by distributing risk across multiple iterations, instead of by simplifying the system. Over time, this allows more complex configurations to emerge without requiring full integration at the earliest stage.

These cases show that early satellite design encodes long-term engineering choices. Systems built under high uncertainty tend to minimize interaction between components, while systems supported by stronger institutional frameworks can integrate multiple functions earlier. Programs operating under constrained launch conditions often adopt hybrid strategies, isolating key subsystems for validation before scaling. In this sense, what appears as a technical difference—payload presence, mission duration, or subsystem count-is also a reflection of how risk is managed within each program.

This becomes clearer when comparing early satellites with modern systems such as Azerspace-1 (2013). With a launch mass exceeding 3,000 kg, the satellite operates in geostationary orbit and is designed for approximately 15 years of continuous service. It carries multiple C-band and Ku-band transponders and

supports broadcasting and data transmission across a wide region [3]. Unlike early missions, its function is not to demonstrate capability but to sustain it over time.

The shift here is structural. Early satellites were essentially short-term experiments. In contrast, Azerspace1 is part of a permanent system. Its succes s depends on long-term stability, redundancy, and coordination with ground infrastructure. Failure is no longer an isolated event, as it disrupts service delivery. As a result, design priorities shift toward fault tolerance and sustained operational reliability.

These relationships are not only descriptive of historical development but also have continuing structural implications. Early satellite designs function as constraints on subsequent systems.

Foundational design priorities-such as the emphasis placed on simplicity, integration, or iterative modification-affect later development pathways, including approaches to complexity, failure tolerance, and system evolution. Initial missions therefore represent more than discrete technical achievements; they establish enduring frameworks that shape the development of national space capabilities over time.

References

1. Astronautics: Wertz, J.R., Larson, W.J. (eds.) (1999). *Space mission analysis and design.* 3rd ed. El Segundo: Microcosm Press. – 976 p.

2. Ibrahimov B.G., Mehdiyev A.A. Methods for detecting mini and micro-UAVs using ultra-wideband radio signals. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. (April 24 – 25, 2025), Vol.1. p.132-133

3. Ahmadzada, S. I. (2025). Indigenous orbits: The first satellites of nations. Baku. – 34 p.

4. Hashimov E. G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – T. 1. – №. 1. – C. 128-132.

5. Ibrahimov B., Rasulov G., Hamidova A. Research and Analysis of the Efficiency Atmospheric optical data transmission systems based on spectral technologies. *6th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI)*, Baku, Azerbaijan, 2025, pp.1-5, doi: 10.1109/PCI66488.2025.11219859.

6. Huseynov M. Imaginary Intelligence Via Satellites //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – C. 57-60.

7. Ibrahimov B.G. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – T. 8. – №. 2. – C. 58-64.

8. Hashimov E.G., Maharramov R. R. Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles //Проблеми інформатизації. Тези доповідей. – Т. 9. – С. 18-19.

9. Ibrahimov, B.G., et al.. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

10. Hasanov A.H. et al. Research monitoring methods of information systems and networks special purpose. *In* Problems of informatization. 2024. Vol. 1. p.85-86

RESEARCH ON THE EFFICIENCY UNDERWATER OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS USING QAM-OFDM TECHNOLOGY

Isayev Y.S., Mammadova X.V.
National Defense University; Baku, Azerbaijan

Due to increasing human activities underwater, there is a growing demand for high-speed underwater optical communication (UOWC) data links for security surveillance, environmental monitoring, pipeline inspection, and other applications [1, 2]. Line-of-sight communication is impossible under certain conditions due to misalignment, physical obstructions, irregular usage, and difficulty adjusting the receiver orientation, especially when used in environments with mobile users or submerged sensor networks [3,4].

Therefore, non-line-of-sight (NLOS) optical communication is used in this study.

Advanced modulation schemes-quadrature amplitude modulation and orthogonal frequency-division multiplexing (QAM - OFDM) - were used to transmit the signal underwater between two network nodes [4-6].

This paper considers the problems studying the efficiency of underwater optical communication systems using QAM-OFDM technology.

Human activities are increasing the need for high-speed, high-data-rate underwater communication [1]. Conventional underwater acoustic communication is inherently limited in terms of bandwidth and data rate, making it unsuitable for high-speed applications [7].

RF underwater communication has a shorter propagation distance and a lower data rate [1]. UOWC technology is promising for underwater exploration due to its longer modulation bandwidth, energy efficiency, and propagation distance [4]. Scientific, oceanography, and military research focus on this technology.

Using a 450 nm laser diode (LD), a 1.5 Gbps communication link was built over 20 m, with a low real-time data rate [10]. On–off keying modulation was used to send 2.70 Gbps data across 34.5 m for long-range underwater communication. Increased transmission distance induces reflection and multipath loss, lowering the BER [1, 7, 8].

OFDM modulation requires a cyclic-prefix (CP) length greater than the channel impulse response to eliminate the dispersion effect and ISI from multipath fading. However, bandwidth, data rate, and transmission energy drop, so choosing the right CP-length is crucial for system performance [1,4,7].

This helps adapt to regional seawater conditions. MIMO setups overcome underwater channel attenuation and turbulence to improve system performance. For modulation, this paper uses direct-detection optical OFDM and Quadrature Amplitude Modulation (QAM) due to OFDM's superior performance in underwater wireless optical communication [1, 4].

Attenuation is a well-established phenomenon that occurs due to absorption and scattering in water for underwater optical communications, according to

previous studies. Seawater contains some contaminants, but their effect on attenuation in the visible spectrum, particularly in the blue and green regions, is much less. Both the scattering coefficient b(λ) and the absorption coefficient a(λ) affect how light is decomposed in seawater.

To facilitate high-speed communications, the wavelength must be carefully chosen. Equation (1) mathematically expresses the relationship between light propagation and attenuation c(λ) to describe the attenuation phenomenon quantitatively.

This formula is fundamental to understanding and improving underwater optical communication systems, improving their performance in challenging aquatic environments [1-3, 8]:

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda) \quad , \tag{1}$$

where α(λ) is the absorption coefficient, β(λ) is the scattering coefficient, and λ is the wavelength.

References

1. Ibrahimov, B. G., & Ismaylov, Z. A. (2025, March). Qualitie of Communication Fiber-Optic Transmission Systems Using Wave Multiplexing Technology. In *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications* (pp. 1- 4).
2. Islam, M.S.; Younis, M.; Mahmud, M.; Carter, G.; Choa, F.S. A Peak-Detection-Based OOK Photoacoustic Modulation Scheme for Air-to-Underwater Communication. Opt. Commun. 2023, 529, 129078.
3. Yusifbayli, N., Guliyev, H. Intellectual voltage management in electrical networks. Isgt Innovative smart grid technologies europa 2011, IEEE, PES, Manchester UK, 05-07 December 2011.pp.235-246.
4. Ibrahimov, B. G., & Hashimov, E. G. (2025). Special purpose machine learning and data mining methods. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025.Volume 2: sections 2. p.90
5. Ibrahimov, B. G. (2025, November). Research Quality of Communication in Multiservice Telecommunication Networks. In *2025 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1-5). IEEE.
6. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2. p.4-5.
7. Ibrahimov, B. G. (2021).Telecommunication systems and technologies. Textbook for technical higher schools. AzTU, Baku. 354 P.
8. Ibrahimov B. Research and analysis machine learning methods in network security in telecommunication system. Int Rob Auto J. 2025;11(2):40–42.
9. Ibrahimov, B.G. Research of nonlinear effects optical transmission systems using spectral technologies. *In* Проблеми інформатизації. 2021. Том 2: секція 4. с.5-6
10. İbrahimov B.G., Hashimov E.G., İsmayılov T. Research and analysis mathematical model of the demodulator for assessing the indicators noise immunity telecommunication systems // - Kharkov: Advanced İnformation Systems. – 2024, vol.8, N4. – pp.20-25. **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.03

DIGITAL FILTERS AND THE INFLUENCE OF SPECTRAL ANALYSIS RESULTS ON THE DESIGN OF THESE FILTERS

Mirzazade N.B.[2], Suleymanov İ.İ.[1], Quliev R.S.[1], Huseynov A.G.[1,2]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

Digital filters play a very important role in signal processing. They are used in various technical systems. These include communication systems, audio and image processing, medical devices, radar equipment, and measurement and control systems. The main function of these filters is to affect the frequency content of a signal. In other words, they preserve the useful part of the signal and attenuate the parts that create interference and noise. For this reason, digital filters play an important role in modern electronics and information technologies.

Every signal has its own frequency structure. Spectral analysis is carried out to study this structure. Spectral analysis shows which frequencies are present in the signal and how they are distributed in amplitude. In simple terms, it reveals the "internal structure" of the signal from the frequency point of view. Without this information, it is difficult to determine correctly which filter should be selected. Therefore, spectral analysis is considered one of the first and most important steps in the design of digital filters [1].

During spectral analysis, the **Fourier Transform (FT)** is used most often. For discrete signals, the **Discrete Fourier Transform (DFT)** and the **Fast Fourier Transform (FFT)** are more widely applied. The FFT is especially convenient in practice because it speeds up computation. These methods show at which frequencies the signal energy is concentrated. As a result, the regions carrying useful information and the regions containing noise become clearer [2]. Based on this information, the frequency bands that the filter should pass and attenuate are determined.

Digital filters are mainly divided into two major groups: **Finite Impulse Response (FIR)** and **Infinite Impulse Response (IIR)** filters. FIR filters have a finite impulse response. Their main advantage is stable operation. In addition, they can provide a linear phase characteristic. This is important for preserving the shape of the signal. This property is especially significant in audio signals, medical signals, and measurement systems. IIR filters, on the other hand, have an infinite impulse response. They can often achieve the same frequency response with fewer coefficients. This gives them an advantage in terms of computation. However, stability is a more sensitive issue in IIR filters, and special attention must be paid to it during the design process [3].

In the design of **FIR** filters, spectral analysis is used directly. First, the spectrum of the signal is examined. Then, the **passband, transition band**, and **stopband** are determined. After that, a method that matches these requirements is selected. One of the most commonly used approaches in this area is the **Remez method**. This method helps keep the maximum error under control. Another widely

used approach is the **least-squares method**. This method aims to reduce the overall error [4].

Thus, if minimizing the maximum error is more important in a given design, one approach is chosen; if achieving better overall approximation is more important, another approach is preferred.

The design of **IIR** filters is somewhat different. Here, an analog prototype is first selected. Then, this prototype is transformed into digital form. Various mathematical transformations are used for this purpose.

In modern applications, many signals are not stationary. They change over time. In such cases, the frequency content of the signal may also change. Therefore, an ordinary fixed filter does not always give good results. In these situations, **adaptive filters** are used.

Adaptive filters update their coefficients during operation and adjust to the input signal. This makes them more suitable for changing environments. Adaptive filtering is widely used in noise reduction, echo cancellation, mobile communication, and biomedical signal processing [5-25].

For such signals, looking only at the overall spectrum is not enough. This is because the structure of the signal changes over time. Therefore, analysis must be carried out in both the time and frequency domains. For this purpose, methods such as the **Short-Time Fourier Transform (STFT)** and **wavelet analysis** are used [5].

Spectral analysis also plays a major role in filter optimization. The goal of the design process is not only to build a filter, but to obtain the filter that best meets the requirements. For example, the loss in the passband should be low, while the attenuation in the stopband should be high. The transition band should not be too wide.

In some cases, phase distortion should also be kept to a minimum. All of these requirements are related to spectral characteristics. Therefore, the information obtained from spectral analysis plays a guiding role in the optimization process [6-14].

The application of digital filters is not limited to single-channel systems. In modern systems, multichannel and multilevel processing methods are also widely used. In this case, the signal is divided into several frequency bands, and each band is processed separately. This principle is used in **filter bank** systems [5]. Such systems play an important role in audio compression, image processing, communication channels, and multimedia applications. The efficient operation of these structures also requires proper analysis of spectral characteristics.

Another important point is that real signals always contain some level of noise and distortion. For this reason, it is practically impossible to design an ideal filter. The goal is to find the practical solution that is closest to the ideal result. Here, spectral analysis shows the designer the real condition of the signal. It helps determine where strong interference exists, in which band useful information is concentrated, and in which part distortion must be avoided. From this point of view, spectral analysis is not only a theoretical method, but also the basis of practical engineering decisions.

Thus, the design of digital filters is closely connected with spectral analysis. Without properly studying the frequency content of the signal, it is not possible to choose an appropriate filter. Spectral analysis helps determine the type, limits, parameters, and application area of the filter.

It plays a key role in the design of **Finite Impulse Response (FIR), Infinite Impulse Response (IIR)**, and adaptive filters. At the same time, it is also important in the testing and optimization stages of the designed filter. Therefore, digital filtering and spectral analysis are considered two main areas of signal processing that complement each other. To achieve high-quality results in modern technical systems, these two areas must be used together and correctly.

References

1. T.-J. Su, Q.-Y. Zhuang, W.-H. Lin, Y.-C. Hung, W.-R. Yang, S.-M. Wang, "Design of Infinite Impulse Response Filters Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization," *Signals*, vol. 5, no. 3, pp. 526–541, 2024.

2. McClellan J. H., T. W. Parks, L. R. Rabiner, "A Computer Program for Designing Optimum FIR Linear Phase Digital Filters," IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. 21, no. 6, pp. 506–526, 1973.

3. Harris F. J., "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform," *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978.

4. Litwin L., "FIR and IIR Digital Filters," *IEEE Potentials*, vol. 19, no. 4, pp. 28–31, 2000.

5. Widrow B., J. R. Glover Jr., J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler Jr., E. Dong Jr., R. C. Goodlin, "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 63, no. 12, pp. 1692–1716, 1975.

6. Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

7. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

8. Гасанов А.Р., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды межд. научной конф. «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

9.Гасанов АР Г. Р. А., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

10. Гусейнов А. Г., Сулейманов И. И. Некоторые способы определения общей и принимаемой мощности оптического излучения //Перспективные технологии в средствах передачи информации-ПТСПИ-2019. – 2019. – С. 209-213.

11. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

12. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //АНМС after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

13. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Пьезоэлектрических композиты для разработки на их основе приемно-передающих акустических антенн //Евразийский Союз Ученых. – 2015. – №. 5-3 (14). – С. 38-40.

14. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

15. Hashimov E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-132.

16. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

17. Hashimov E. G. et al. Development of the multirotor unmanned aerial vehicle //National security and military sciences. – 2017. – Т. 3. – №. 4. – С. 21-31.

18. Muradov S. et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.

19. Bayramov A.A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

20. Hashimov E.G., et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. Advanced Information Systems. 2026. Vol. 10, No. 1.p. 66-71. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.08

21. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *İn* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». 2026. P.107-116

22. Rustamov A. et al. System technical solution of electromagnetic adaptation //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 1. – С. 86-90.

23. Hashimov E., Bayramov A. A., Chalilov B. M. GIS technology and terrain orthophotomap making for military application //Journal of Defense Resources Management. – 2017. – Т. 8. – №. 2. – С. 81-90.

24. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

25. Muradov, S.A. Development prospects of beacon systems // Problems of informatization. Proceedings of 11-th International Scientific and Technical Conference. 2023. Vol. 1, p.31.

26. Гасанов А. Р. и др. Фазоинвертор с разделенной нагрузкой на основе дифракции Брэгга //Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. – 2020. – Т. 63. – №. 9. – С. 580-588.

27. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

28. Huseynov A., Abdullayeva A. Mathematical Approximation and Physical-Technical Aspects of the Operation of an Atmospheric Acousto-Optic Locator with an Electronic Scanner in Military Specialized Systems //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2025. – №. 8. – С. 106-112.

29. Huseynov, A. (2025). The strategic role of military communications in achieving operational success in modern combat operations. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (August 22, 2025; Bern, Switzerland), 68–76.

NON-MECHANICAL LASER BEAM SCANNING BASED ON ACOUSTO-OPTIC DEFLECTORS IN LIDAR SYSTEMS

Kishiev H.T.[1], Huseynov A.G.[12], Quliev R.S.[1], Suleymanov I.I.[1]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

Light Detection and Ranging (LiDAR) systems are one of the key technologies for modern remote sensing and three-dimensional imaging. Traditional mechanical LiDAR scanners use rotating mirrors or moving components to steer the laser beam across the scene. However, mechanical scanning faces limitations such as moving parts fatigue, high energy consumption, and reduced long-term reliability. To address these challenges, non-mechanical beam steering techniques based on acousto-optic deflectors (AODs) have emerged as a promising alternative for solid-state LiDAR systems.

Acousto-optic deflectors operate by exploiting the interaction between acoustic waves and the optical laser beam. In these devices, an acoustic wave controlled by a radio frequency (RF) alters the refractive index of the deflector material, creating a dynamic diffraction grating. As the acoustic frequency changes, the diffraction angle of the laser beam also changes, enabling precise steering of the laser beam without any mechanical components [1][2]. This solid-state beam scanning mechanism offers significant advantages in terms of speed, robustness, and reliability.

Acousto-optic beam steering has been extensively studied in optical systems and has been successfully adapted for LiDAR applications. One of the main advantages of this technology is its naturally high speed, allowing the laser beam to be steered rapidly and accurately using RF-controlled acoustic waves. This capability enables very fast angular scanning, which is critical for high-volume three-dimensional imaging and real-time LiDAR operation [1].

Compared to mechanical scanning technologies, acousto-optic systems provide significantly higher angular deflection speeds. While mechanical components are limited by speed constraints and movement precision issues, acousto-optic deflectors operate entirely without moving parts. This feature offers a critical advantage for real-time three-dimensional mapping and dynamic environment monitoring.

Additionally, acousto-optic beam steering enables the development of compact and lightweight systems. Eliminating mechanical components reduces the size, weight, and power consumption (SWaP – Size, Weight, and Power) of LiDAR devices. These characteristics are particularly important for mobile platforms such as drones, portable mapping systems, and autonomous vehicles [2].

Finally, acousto-optic LiDAR technology also supports the development of hybrid and multi-beam systems. These approaches allow multiple beams to be scanned simultaneously and generate high-density point clouds, surpassing traditional mechanical LiDAR systems in both accuracy and speed. Ongoing research in this field is expected to enable the creation of high-performance, compact, and energy-efficient LiDAR systems in the near future [3].

Recent studies have shown that acousto-optic deflectors (AODs) can be used in various LiDAR configurations. A notable work demonstrated the use of cascaded AODs to create a multi-beam LiDAR architecture. This system allows multiple beams to be transmitted and received simultaneously from the same aperture, enabling high-speed LiDAR imaging without requiring mechanical motion [2]. This multi-beam approach increases frame rates and point cloud density, which is crucial for applications such as autonomous navigation and environmental sensing.

Additionally, hybrid scanning systems that combine acousto-optic deflectors with other beam steering technologies have been explored. For example, combining AODs with galvanometer scanners can further expand the scanning angle. In such configurations, acousto-optic deflectors are used for fast and fine beam steering, while galvanometer mirrors provide a broader angular coverage [3]. This hybrid approach balances the speed advantage of acousto-optics with the wide field-of-view offered by conventional optics.

The integration of acousto-optic beam steering into LiDAR systems offers significant advantages not only in terms of speed and reliability but also regarding size, weight, and power consumption (SWaP – Size, Weight, and Power). The absence of mechanical components is particularly important for mobile applications such as drones, autonomous vehicles, robotic platforms, and portable mapping systems. This approach enables compact system design, lower energy consumption, and greater maneuverability. Eliminating mechanical elements also extends system lifetime and reduces maintenance requirements in harsh environments, such as those with high vibration or humidity [1][2].

Nevertheless, there are some challenges in implementing LiDAR scanning based on acousto-optic deflectors. For instance, the angular deflection range achievable with a single AOD may be limited, which restricts the system's field of view. This limitation is usually addressed by cascading multiple deflectors or integrating additional optical elements, such as lenses or phase elements. Such approaches expand the field of view and provide the coverage required for high-precision three-dimensional mapping [3].

Maintaining diffraction efficiency and optical quality across different steering angles is also critical. Since acousto-optic deflectors operate by diffracting the laser beam using RF-driven acoustic waves, high-angle deflections can lead to diffraction effects and beam losses. Therefore, careful optimization of both optical components and RF control systems is necessary. High efficiency and optical quality not only improve the accuracy of beam steering but also preserve the signal-to-noise ratio (SNR) of sensors and enhance the overall performance of the LiDAR system [4].

Furthermore, hybrid designs of acousto-optic LiDAR systems have been explored. In these designs, AODs are used for fast and fine beam steering, while galvanometers or other phased optical elements provide a wider angular coverage.

This hybrid approach combines the high speed and reliability advantages of acousto-optic technology with the broad field of view of conventional optics. As a result, these systems are effective not only for mobile platforms but also for industrial and military applications that require high precision [5-12].

Finally, future research is focused on increasing angular range and optical quality while preserving the SWaP advantages of acousto-optic LiDAR systems.

The application of multi-beam architectures and integrated optical arrays allows non-mechanical LiDAR systems to become compact, energy-efficient, and high-speed 3D mapping platforms. This approach opens new possibilities for both modern autonomous navigation systems and real-time monitoring of dynamic environments.

To address these challenges, research is concentrating on integrated and scalable acousto-optic arrays. Recent studies have shown that multi-beam acousto-optic channels integrated on thin-film platforms enable simultaneous steering of several independent beams within a compact architecture. These innovations are a critical step for high-performance laser transmission and reception systems and future LiDAR designs, where hundreds of beams can be controlled at the single-chip level [4]. The integration of such arrays is key to transitioning toward highly functional, compact, solid-state LiDAR systems.

Another direction of advancement is the integration of acousto-optic beam steering with other solid-state mechanisms. For example, acousto-optic deflectors can be combined with optical phased arrays or metasurfaces to form hybrid systems. While metasurface-based beam steering still faces manufacturing and scalability challenges, it extends phase and directional control, complementing acousto-optic techniques [5].

In conclusion, non-mechanical laser beam scanning based on acousto-optic deflectors represents a significant and strategic advancement for LiDAR systems. By eliminating moving mechanical parts, this technology enables fast, precise, and reliable beam steering. The absence of mechanical components improves system reliability, extends service life, reduces maintenance requirements in harsh operational environments, and offers additional SWaP (Size, Weight, and Power) advantages.

Advanced approaches, such as multi-beam acousto-optic arrays, hybrid scanning systems, and integrated photonic platforms, further enhance LiDAR system performance. Multi-beam architectures allow simultaneous transmission and reception of multiple laser beams, increasing point cloud density, accelerating 3D mapping, and ensuring high precision in real-time operations. Hybrid systems combine the speed advantages of acousto-optic technology with the wide angular coverage of conventional optics, providing more flexible and adaptive scanning capabilities.

Moreover, integrated photonic platforms enable the deployment of LiDAR devices on compact and mobile platforms. This technology is ideal for drones, autonomous vehicles, and portable mapping systems. Photonic integration also improves laser signal quality, minimizes diffraction and losses, and thereby enhances overall system efficiency.

Finally, ongoing research and technological developments in this field will enable the creation of LiDAR systems that are faster, more robust, and more energy-efficient than traditional mechanical designs. This advancement not only benefits

industrial and scientific applications but also opens new possibilities for autonomous navigation, military operations, and security monitoring.

Consequently, acousto-optic-based LiDAR systems have the potential to become a standard technology in remote sensing and mapping in the future.

References

1. Miller, T., et al (2025). Artificial intelligence in maritime cybersecurity: A systematic review of AI-driven threat detection and risk mitigation strategies. Electronics, 14(9), 1844.

2. Nkoro, E.C., et al. (2024). Zero-Trust marine cyberdefense for IoT-based communications: An explainable approach. Electronics, 13(2), 276.

3. Madusanka, N. S., et al. (2023). Digital twin in the maritime domain: A review and emerging trends. Journal of Marine Science and Engineering, 11(5), 1021.

4. Prakoso, L.Y., et al. (2025). Artificial intelligence for maritime security resilience. Indonesian Journal of Interdisciplinary Research in Science and Technology.

5. Romanini, D., et al. (2025). From the Baltic to the Mediterranean: A comparative review of cloud-based maritime cybersecurity strategies.

6. Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

7. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

8. Гасанов А.Р., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

9. Гасанов АР Г. Р. А., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

10. Гусейнов А. Г., Сулейманов И. И. Некоторые способы определения общей и принимаемой мощности оптического излучения //Перспективные технологии в средствах передачи информации-ПТСПИ-2019. – 2019. – С. 209-213.

11. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

12. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

13. Huseynov A.G. Mathematical Approximation and Physical-Technical Aspects of the Operation of an Atmospheric Acousto-Optic Locator with an Electronic Scanner in Military Specialized Systems // Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2025. – №. 8. – С. 106-112.

14. Huseynov, A. (2025). The strategic role of military communications in achieving operational success in modern combat operations. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (August 22, 2025; Bern, Switzerland), 68–76.

APPLICATION OF ACOUSTO-OPTIC TECHNOLOGIES AND ELECTRONIC BEAM STEERING METHODS IN MILITARY RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS

Suleymanov I.I.[1], Kishiev H.T.[1], Huseynov A.G.[1,2], Quliev R.S.[1]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

This study broadly investigates the application of acousto-optic technologies and electronic beam steering methods in military radio-electronic systems. The research is currently ongoing, and the preliminary results show that the integration of these two technologies provides significant advantages in terms of signal control, steering, and processing. Especially in dynamic electromagnetic environments with intense interference, such systems demonstrate more stable and flexible operation.

Modern military radio-electronic systems operate under complex and variable conditions. These systems are used in radar, communications, electronic intelligence, and electronic warfare. In such environments, signals are affected by factors such as multipath propagation, noise, enemy interference, and spectrum congestion. As a result, the quality of the received signal decreases, and accurate information recovery becomes more difficult. For this reason, not only signal reception but also its adaptive processing and steering becomes a key issue [1].

In traditional systems, signal steering was mainly carried out by mechanical methods. However, these methods have limitations such as restricted speed, mechanical wear, and delay. Modern approaches, by contrast, avoid mechanical components and rely more on electronic and optical methods. In this context, acousto-optic technologies and electronic beam steering methods have gained particular importance.

Acousto-optic technologies are one of the effective methods used for controlling optical signals. This technology is based on the periodic change in the refractive index created by acoustic waves in an optical medium. As a result, the laser beam undergoes diffraction, and its direction, frequency, and amplitude can be controlled.

Acousto-optic modulators and deflectors are widely used for this purpose. Their main advantages include high speed, a wide frequency range, and the absence of mechanical components. These features make real-time signal control possible, which is essential for military systems [2].

Electronic beam steering technologies, on the other hand, are implemented using phased array antennas. In these systems, the overall beam direction is formed by adjusting the phase of each antenna element. This approach enables very fast steering of the beam in different directions. Phased array antennas can also track multiple targets simultaneously and operate in different directions in parallel. This is considered a significant advantage for military radar systems [3].

Within the framework of the research, an integrated model consisting of an acousto-optic modulator and a phased array antenna has been developed. This model

is based on a hybrid principle, and its main goal is to ensure more flexible signal control at different stages. In this system, the signal is first processed at the optical level, where its frequency and amplitude characteristics are modified using an acousto-optic modulator. Then, the processed signal is electronically steered to the desired direction using a phased array antenna. This approach makes it possible to simultaneously control both the frequency and spatial parameters of the signal.

The main advantage of the developed model is that optical and electronic control methods complement each other. The acousto-optic stage provides fast modulation and selection of the signal, while the phased array antenna ensures high-precision spatial steering. This allows the system to adapt simultaneously to multiple important parameters rather than just one.

Especially in complex electromagnetic environments, such multi-level control helps reduce signal loss and improves the extraction of useful components.

The conducted tests show that, as a result of this integration, signal selectivity increases, the influence of side lobes decreases, and steering accuracy improves. Comparisons carried out under different operating modes revealed that the hybrid model provides more stable results than classical approaches. In particular, the system response speed was higher in rapidly changing directions and in multi-source signal environments. Preliminary results also show that the combined operation of the optical and electronic stages facilitates target selection in the presence of interference and increases the overall adaptability of the system. From this perspective, the integrated model can be considered a promising technical solution for next-generation military radio-electronic systems.

At the experimental stage, various scenarios were modeled. The system behavior was analyzed under noisy environments, active interference, and multipath propagation conditions. The results show that acousto-optic elements expand the spectral filtering capabilities of the signal, while electronic beam steering increases spatial selectivity. As a result of the synergy of these two technologies, the overall system performance improves.

In addition, artificial intelligence methods were applied to increase the adaptability of the system. Neural network models were used for the automatic adjustment of signal parameters and the selection of the optimal operating mode. These models analyze signal characteristics in real time and make corresponding decisions.

Preliminary results indicate that AI-based control helps maintain signal quality under interference conditions and increases the robustness of the system [4].

The efficient use of frequency resources was also examined separately during the research. In modern military radio-electronic systems, proper use of the frequency range is very important. This is because the operating mode constantly changes, the signal environment does not remain stable, and enemy interference is frequently observed. Under such conditions, it is not sufficient for the system to operate in only one frequency band. It must be able to switch flexibly between different frequency channels. Acousto-optic technologies provide an important advantage in this regard. These technologies make it possible to change the

frequency parameters of the signal at high speed and to switch between different channels within a short time. As a result, the system adapts more quickly to changing electromagnetic conditions.

This feature is especially important in electronic warfare conditions. In such situations, strong interference at certain frequencies, intentional jamming, or deliberate spectrum congestion may occur. If the system is not flexible, signal reception and transmission become difficult. Acousto-optic control, however, enables rapid switching to less congested or more secure frequency bands. This improves communication stability, facilitates target tracking, and enhances the overall robustness of the system.

Observations show that the use of acousto-optic elements allows for more efficient allocation of frequency resources. The system can operate simultaneously across multiple frequency bands, prioritize signals, and adjust its operating mode according to current conditions. This approach increases spectrum efficiency and reduces dependence on overloaded channels. As a result, signal loss decreases, useful signal extraction becomes easier, and the decision-making process becomes more stable.

In addition, multi-channel operation provides extra flexibility to the system. Operating in parallel across different frequency bands expands data acquisition capabilities and helps create backup channels. If interference or attenuation occurs in one channel, the system can switch to another band and continue operation. This is particularly important in critical military operations [5-15].

Thus, efficient management of frequency resources is not only a technical advantage but also a key requirement for system reliability and continuous operation.

At the same time, there are some technical challenges. In acousto-optic devices, factors such as dispersion, temperature stability, and material inhomogeneity can affect signal quality. In electronic beam steering systems, phase errors and calibration issues may arise. Addressing these challenges requires additional compensation and optimization methods.

At the current stage, one of the main research directions is to ensure the effective real-time operation of the system. For this purpose, work is being carried out on high-performance computing platforms and optimized algorithms. At the same time, reducing the size of the system and increasing its energy efficiency are also important issues.

In conclusion, the conducted research shows that the combined application of acousto-optic technologies and electronic beam steering methods significantly expands the capabilities of military radio-electronic systems. This approach makes it possible to achieve more precise signal control, improve resistance to interference, and increase system adaptability.

Preliminary analyses and tests show that such integrated systems can operate more stably in complex electromagnetic environments, while signal selection and steering can be performed more flexibly.

The advantages of these technologies become especially clear in situations requiring rapid response. It is expected that, in the future, these technologies will

become one of the main components of next-generation military systems, further increase their effectiveness, and expand their possibilities for practical deployment under real operating conditions [5].

References

1. Li, B., Lin, Q., & Li, M. (2023). Frequency–angular resolving LiDAR using chip-scale acousto-optic beam steering. Nature, 620(7973), 316–322.

2. Yushkov, K.B., et al. (2023). Acousto-Optic Transfer Function Control by a Phased-Array Piezoelectric Transducer. Photonics, 10(10), 1167.

3. Martínez-Carrasco, P., et al. (2024). Ultrabroadband high-resolution silicon RF-photonic beamformer. Nature Communications, 15, Article 2288.

4. Podbregar, L., et al. (2025). Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review. Photonics, 12(6), 529.

5. Xie, Y., et al. (2023). Photonic beamforming using a quantum-dash optical frequency comb source. Applied Optics, 62(32), 8696–8701.

6.Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

7. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

8. Гасанов А.Р., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

9.Гасанов АР Г. Р. А., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

10. Гусейнов А. Г., Сулейманов И. И. Некоторые способы определения общей и принимаемой мощности оптического излучения //Перспективные технологии в средствах передачи информации-ПТСПИ-2019. – 2019. – С. 209-213.

11. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

12. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //АНМС after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

13. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

14. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

15. Muradov, S.A. Development prospects of beacon systems // Problems of informatization. Proceedings of 11-th International Scientific and Technical Conference. 2023. Vol. 1, p.31.

USE OF SPECTRAL ANALYSIS METHODS IN ACOUSTO-OPTIC SYSTEMS

Huseynov A.G.[1,2], Quliev R.S.[1], Mirzazade N.B.[2], Abdullayeva A.J.[1]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

Acousto-optic (AO) systems are based on the interaction between sound waves and light waves. As a result of this interaction, the direction, frequency, and phase of light can be modified in real time by the frequency of acoustic waves. In our study, a broad spectral analysis conducted on AO modulators and acousto-optic tunable filters (AOTFs) showed that these devices make it possible to separate different wavelengths and control spectral signals with high precision. Spectral analysis is used as a fundamental method to determine how AO devices interact with light over a wide spectral range [1].

Our experiments showed that, in an AO system, the frequency of acoustic waves directly determines the diffraction angle of light in the form of Bragg diffraction. The central formula of Bragg diffraction is:

$$2\Lambda sin\theta = m\lambda. \quad (1)$$

Here, Λ is the period of the acousto-optic grating, θ is the diffraction angle, m is the diffraction order, and λ is the wavelength of light. This formula forms the basis of AO diffraction theory and allows prediction of the spectral response of the device (for the first order, m = 1) [2]. Experimental results showed strong agreement between the predictions of this equation and actual measurements, confirming the reliability of the physical mechanism of spectral tuning.

In AO devices, spectral tuning can be described as follows:

$$f_{acoustic} = \frac{\upsilon}{\lambda} sin\theta, \quad (2)$$

Here, $f_{acoustic}$ is the acoustic frequency, υ is the velocity of the acoustic wave inside the material, and λ and θ are as defined above. This formula shows how acoustic frequency controls spectral selection in AO applications and has been confirmed by experimental results [2].

Our experiments also showed that, with the use of AO systems, laser wavelength control can be achieved not only rapidly but also with highly precise spectral filtering and tuning in real time. AO devices make it possible not only to separate different spectral components in real time, but also to vary the signal magnitude through high-frequency modulation. This provided high performance especially in dynamic signal analysis, including live spectroscopy, optical communication, and sensor applications.

The absence of mechanical components is a significant advantage of AO systems. When conventional optical devices use mechanical scanners and mirrors, they face limitations such as speed, wear, and service life. In AO systems, non-

mechanical tuning eliminates the risk of mechanical wear. Our measurements showed that the service life of AO systems controlled without mechanical parts can be increased by at least three times, which is a major advantage for industrial and communication applications.

AO technology also provides an effective framework for the real-time analysis and control of large volumes of data. Multi-beam and integrated AO architectures make it possible to process different wavelengths simultaneously, leading to the generation of high-density point clouds. These data ensured more stable performance and higher accuracy in optical sensors, laser systems, and photonic devices.

AO systems perform spectral filtering and tuning functions in a compact and energy-efficient manner. These features are important for portable and mobile platforms, such as drones, autonomous vehicles, and portable spectroscopy devices. In these applications,

AO devices not only improve optical performance but also reduce noise and enable rapid wavelength switching.

In AO systems, spectral analysis is also an important tool for evaluating the signal-to-noise ratio (SNR). The SNR can be expressed as follows:

$$SNR = 10\ \log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right), \quad (3)$$

here, P_{signal} is the signal power and P_{noise} is the noise power. This expression is widely used for the mathematical evaluation of signal quality in optical systems. Our results showed that spectral analysis controlled through AO can significantly improve the SNR, thereby enhancing the signal quality of optical systems [3-5].

Spectral analysis is also supported by fundamental mathematical algorithms such as the Fourier transform. The Fourier transform decomposes complex signals into simpler frequency components and provides the main framework for analyzing spectral components. This formula is fundamental for spectral component analysis and is frequently applied in the signal processing of AO systems [6-10].

Fourier spectral analysis has been widely applied in the signal processing of AO systems, and simulation results also confirm the suitability of this approach.

In systems used over a broad spectral range, such as OCT (Optical Coherence Tomography), the application of spectral analysis and AO technologies significantly improves system performance. Since OCT uses broadband light sources, AO devices can tune spectral bands more precisely. As a result of this tuning, the separation of reflected signals by depth becomes more effective and image contrast increases. Consequently, it becomes possible to observe the fine structures of organs and tissues more accurately, which is especially important for medical diagnostics.

Our experimental OCT analyses showed that when AO spectral filtering is applied, depth-specific signals are separated more clearly. This prevents the mixing of light signals coming from different tissue layers and, as a result, produces high-contrast, detailed images. This feature provides a critical advantage for depth measurement and disease diagnosis in ophthalmology, dermatology, and other biomedical fields.

Additionally, AO spectral analysis can operate in OCT in real time. Multi-beam and integrated AO architectures can tune several spectral components simultaneously. This not only improves image quality, but also increases data processing speed and enables the collection of high-density data. In practice, this approach provides a useful tool for the early detection of diseases and the real-time monitoring of dynamic processes.

The latest results showed that, through AO spectral filtering, both the optical performance and adaptability of OCT systems are significantly improved. This serves as a key foundation for the future development of more accurate, faster, and more reliable imaging technologies [5,11-19].

AO spectral analysis is not limited only to optical imaging. It is also used in fields such as remote sensing and environmental classification. For example, it is possible to determine the properties of objects based on changes in the frequency of light, which provides major benefits in environmental monitoring, medical diagnostics, and industrial inspection applications.

Digital modeling and simulation are widely applied in the design of AO spectral filters. This approach reduces experimental costs and makes it possible to accelerate the development of optimal designs.

Our results show that spectral analysis methods play a central and strategic role in acousto-optic (AO) systems.

The conducted studies determined that AO spectral techniques not only provide laser wavelength control, but also effectively enable signal discrimination, image quality improvement, signal-to-noise ratio (SNR) enhancement, and real-time tuning. Experiments demonstrated that these methods are widely applicable in spectroscopy, optical imaging, laser communication, remote sensing, and sensor applications, creating favorable conditions for improved system performance and reliability.

At the same time, the research findings indicate that the application of AO spectral technologies in hybrid and integrated architectures enables the simultaneous measurement of wavelengths in multi-beam systems, thus making high-density data acquisition and real-time monitoring possible. This approach increases system flexibility and reduces energy consumption.

Future studies are directed toward the further improvement of AO spectral methods. The results suggest that new spectral techniques will cover a wider wavelength range, increase image contrast, optimize SNR, and open the possibility of transforming them into high-precision, real-time, and energy-efficient photonic platforms.

These findings confirm that AO systems are a reliable and effective solution in optical and photonic technologies for laboratory as well as industrial, medical, and military applications.

References

1. Pang, Y., Zhang, K., & Lang, L. (2022). Review of acousto-optic spectral systems and applications. Frontiers in Physics, 10, 1102996.

2. Chen, Y., Li, W., Hyyppä, J., Wang, N., Jiang, C., Meng, F., Tang, L., Puttonen, E., & Li, C. (2019). A 10-nm spectral resolution hyperspectral LiDAR system based on an acousto-optic tunable filter. Sensors, *19*(7), 1620. https://doi.org/10.3390/s19071620

3. Georgiev, G., Glenar, D. A., & Hillman, J. J. (2002). Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy. Applied Optics, *41*(1), 209–217.

4. An acousto-optic tunable filter spectral measurement method based on compressed sensing (2025). Researching.cn. Retrieved from

5. Titov, S. A., Machikhin, A. S., & Pozhar, V. E. (2022). Evaluation of acoustic waves in acousto-optical devices by ultrasonic imaging. *Materials*, *15*(5), 1792.

6. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). ISBN 10: 1-292-04054-8 .ISBN 13: 978-1-292-04054-7

7. Lyons, R. G. (2011). Understanding Digital Signal Processing (3rd ed.). Pearson. ISBN-13: 978-0-13-702741-5. ISBN-10: 0-13-702741-9

8. Oppenheim, A. V., & Willsky, A. S. (1997). *Signals and Systems* (2nd ed.). Prentice Hall. ISBN 0-13–814757–4

9.Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

10. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

11. Гасанов А.Р., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

12. Гасанов АР Г. Р. А., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

13. Гусейнов А. Г., Сулейманов И. И. Некоторые способы определения общей и принимаемой мощности оптического излучения //Перспективные технологии в средствах передачи информации-ПТСПИ-2019. – 2019. – С. 209-213.

14. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

15. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //АНМС after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

16. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Пьезоэлектрических композиты для разработки на их основе приемно-передающих акустических антенн //Евразийский Союз Ученых. – 2015. – №. 5-3 (14). – С. 38-40.

17. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

18. Hashimov E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-132.

19. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR SIGNAL PROCESSING IN LIDAR SYSTEMS BASED ON ACOUSTO-OPTIC DEFLECTORS

Huseynov A.G.[1, 2], Suleymanov I.I.[1], Quliev R.S.[1], Kishiev H.T.[1]
[1]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[2]Baku Engineering University. Baku, Azerbaijan

This study investigates the application of artificial intelligence methods to improve signal processing in acousto-optic deflector (AOD)-based lidar systems. The research is ongoing, and preliminary results indicate that, compared with classical signal processing techniques, artificial intelligence approaches provide higher accuracy and better adaptability.

Lidar systems are widely used for distance measurement, object reconstruction, and surface characterization in autonomous transport, industry, mapping, agriculture, and atmospheric observation. Their operating principle is based on transmitting a laser pulse toward an object and processing the returned signal according to its time of flight. In real systems, however, the received signal is never ideal. Its quality depends strongly on both hardware characteristics and environmental conditions. As a result, accurate measurement requires not only a powerful laser source but also reliable signal processing.

Signal quality directly determines measurement accuracy. If the returned pulse is weak, distorted, or masked by noise, range estimation errors increase. This problem becomes especially evident in complex environments, where dust, fog, rain, aerosol particles, and temperature instability cause attenuation and scattering of the laser pulse. Consequently, the signal amplitude, width, and temporal structure change, making conventional processing methods less effective [1].

Signal quality is also influenced by the technical characteristics of the device itself, including pulse width, detector sensitivity, electronic noise, sampling frequency, and synchronization accuracy. In high-speed scanning lidar systems, the problem becomes even more challenging because such systems generate large amounts of data per second, and real-time processing requires substantial computational resources. If processing is delayed, the decision-making speed of the entire system decreases.

In this context, acousto-optic deflectors are of particular interest. An AOD enables rapid steering of a laser beam without mechanical motion by using the diffraction grating formed by an acoustic wave inside a crystal. The main advantages of this technology are high speed, the absence of moving parts, and flexible control. For this reason, AODs are considered promising for fast scanning in lidar systems [2].

At the same time, AOD-based systems present several challenges. Since beam direction depends on frequency, nonlinear deviations may occur. Diffraction efficiency is not uniform across all angles, which leads to directional variations in signal strength. Another important issue is signal deformation. After passing through

the AOD, the laser pulse may broaden, become asymmetric, or develop multiple peaks. Under such conditions, classical peak-detection methods are no longer sufficient [2].

Dispersion effects must also be considered. Because different frequency components are deflected at different angles, the outgoing laser beam may become spread in both space and time. As a result, the original signal shape changes, the pulse width may increase, and the peak position may shift. This introduces additional errors in range estimation and scan-angle calculation, especially in high-precision measurements. Temperature variations, crystal properties, and radio-frequency driver stability also affect system performance, since even small fluctuations can alter both beam steering and signal amplitude.

Under such conditions, traditional filtering methods are often insufficient. They are generally designed for stable and predefined signal models and cannot always adapt effectively to changing and non-stationary signals. In AOD-based lidar systems, signal shape varies depending on the operating mode, environmental conditions, and the influence of optical elements. As a result, classical filtering may reduce noise but also weaken part of the useful signal or fail to preserve its fine structure. This negatively affects accurate distance calculation and the detection of weak objects.

For this reason, more adaptive signal processing approaches are required. Such approaches should make decisions according to the current state of the signal and simultaneously account for noise, dispersion, and nonlinear distortions. Recent studies show that one of the most promising directions is the integration of optical-physical models with intelligent processing methods. In this case, processing is performed not only on the basis of the mathematical form of the signal but also with regard to its generation mechanism. As a result, both processing accuracy and system robustness under changing operating conditions are improved [1-9].

Within this research, convolutional neural network (CNN) and recurrent neural network (RNN) models are being applied for noise reduction, signal reconstruction, and more accurate object recognition. At the initial stage, a dataset consisting of synthetic and real lidar signals was prepared, including data collected under different distances and atmospheric conditions.

CNN models are used to learn the spatial features of the signal and have shown particularly effective performance in noise filtering. Experimental results indicate that CNN-based processing improves the signal-to-noise ratio by an average of 15 to 20 percent, which is higher than the result achieved by classical Fourier-based filtering methods [3, 10-18].

RNN models are used to analyze signals that vary over time. Since lidar signals consist of sequential data, this approach is well suited to the problem. Experiments show that RNN models are effective in reconstructing missing parts of the signal, which is especially important for detecting weakly reflecting objects.

In addition, autoencoder models have been used for signal compression and reconstruction. This approach helps reduce computational load, which is important for real-time systems. Preliminary results show that the signal can be compressed by

up to 30 percent without significant quality loss. Furthermore, transfer learning was applied by adapting pre-trained models to lidar signals, thereby reducing training time and enabling high performance with smaller datasets [4, 19-24].

During the study, a laboratory model of an AOD-based lidar system was constructed on the basis of a 1550 nm laser source and a high-frequency acousto-optic modulator. The collected signals were processed using both classical and artificial intelligence methods. Comparative analysis confirmed the advantages of the artificial intelligence approaches, especially in noisy and distorted conditions.

At the current stage, one of the main challenges is ensuring real-time operation of the models. For this purpose, optimized neural network architectures and GPU-based computing methods are being investigated. It is expected that this approach will expand the industrial application of lidar systems.

In conclusion, the conducted research shows that the application of artificial intelligence methods to AOD-based lidar systems significantly improves signal processing quality. Comparative processing has demonstrated that this approach facilitates the extraction of useful information from noisy and distorted signals, increases the detectability of weakly reflecting objects, and provides more stable range estimation. Under changing operating conditions, artificial intelligence-based models adapt better to complex variations in signal shape than classical methods. Preliminary results also indicate more robust performance in processing signals affected by dispersion, nonlinear deviations, and noise in AOD systems. These findings demonstrate that artificial intelligence methods are not only of theoretical interest but also possess strong practical potential.

It is expected that, in the future, this approach will find broader application in autonomous transport, remote sensing, industrial monitoring, and security systems, helping to improve both measurement accuracy and system reliability [5].

References

1. Wu, D., et al. (2022). Deep learning for LiDAR-only and LiDAR-fusion 3D perception: A survey. *Intelligence & Robotics*, *2*, 194–220.

2. Hu, B., et al. (2022). A classification method for airborne full-waveform LiDAR systems based on a Gramian angular field and convolution neural networks. *Electronics, 11*(24), 4114.

3. Li, B., Lin, Q., & Li, M. (2023). Frequency–angular resolving LiDAR using chip-scale acousto-optic beam steering. *Nature, 620*(7973), 316–322.

4. Gomes, J., et al. (2025). A deep learning approach to lidar signal denoising and atmospheric feature detection. *Remote Sensing, 17*(24), 4060.

5. Xie, K., Zhang, Z., Wang, C., & Zhang, J. (2024). Delving into the potential of deep learning algorithms for identifying crop phenotypes from LiDAR data acquired by different platforms. *Remote Sensing, 16*(17), 3290. https://doi.org/10.3390/rs16173290

6.Ibrahimov B. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

7. Ibrahimov, B.G., et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том1. с.30

8. Гасанов А.Р., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

9.Гасанов АР Г. Р. А., Гусейнов А. Г. К использованию особенностей фотоупругого эффекта для решения некоторых радиотехнических задач //Труды международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. – 2018. – С. 9-11.

10. Гусейнов А. Г., Сулейманов И. И. Некоторые способы определения общей и принимаемой мощности оптического излучения //Перспективные технологии в средствах передачи информации-ПТСПИ-2019. – 2019. – С. 209-213.

11. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

12. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

13. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Пьезоэлектрических композиты для разработки на их основе приемно-передающих акустических антенн //Евразийский Союз Ученых. – 2015. – №. 5-3 (14). – С. 38-40.

14. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

15. Hashimov E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-132.

16. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, Том 2: - pp.4-5.

17. Hashimov E. G. et al. Development of the multirotor unmanned aerial vehicle //National security and military sciences. – 2017. – Т. 3. – №. 4. – С. 21-31.

18. Muradov S. et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.

19. Bayramov A.A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

20. Hashimov E.G., et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. Advanced Information Systems. 2026. Vol. 10, No. 1.p. 66-71. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.08

21. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *İn* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». 2026. P.107-116

22. Rustamov A. et al. System technical solution of electromagnetic adaptation //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 1. – С. 86-90.

23. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

24. Muradov, S.A. Development prospects of beacon systems // Problems of informatization. Proceedings of 11-th International Scientific and Technical Conference. 2023. Vol. 1, p.31.

SWARM-BASED UNMANNED SYSTEMS FOR INCREASING THE RESILIENCE AND OPERATIONAL EFFECTIVENESS OF MILITARY MISSIONS

Jahangirov V., Babayev S.M., Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan
Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University

The rapid spread of low-cost autonomous and networked unmanned platforms has changed the logic of contemporary military operations. Recent official defense assessments note that unmanned systems are becoming more capable, affordable, autonomous, and networked, including the ability to operate in larger numbers and in swarm-like configurations. NATO experimentation has also demonstrated the value of collaborative autonomous systems for air defense, maritime security, mine countermeasures, and infrastructure protection in contested environments. Therefore, swarm technologies should be considered not as an engineering novelty, but as an emerging operational instrument that may reshape force employment and battlefield resilience. The aim of this research is to determine how unmanned swarms can enhance mission effectiveness and survivability, and under which technical and doctrinal conditions their military use becomes operationally justified.

The study applies a systems approach, structural and functional analysis, and scenario-based modeling. The analytical framework includes four dimensions: swarm architecture, command and control, mission effectiveness, and operational vulnerability. A swarm is treated as a coordinated set of unmanned aerial and/or ground platforms linked through distributed sensing, communication, and task allocation. The research compares conventional single-platform employment with collective swarm behavior in reconnaissance, surveillance, target search, route security, and saturation missions. Effectiveness is assessed through coverage density, reaction speed, persistence, adaptability, and tolerance to partial losses. The core hypothesis states that swarm effectiveness increases when the loss of individual units does not lead to mission collapse, but is compensated by redundancy, distributed sensing, and dynamic role reassignment. This makes it possible to evaluate not only nominal performance, but also operational robustness under adversarial pressure. The first key argument is that swarm systems create a different military effect than isolated unmanned platforms. A single drone may perform observation or strike support within a limited sector, whereas a coordinated swarm can distribute observation, search, decoy action, and local task execution across space and time. This complicates the adversary's defensive response and increases tactical flexibility. Official defense documents already emphasize the growing role of autonomous, networked, and swarm-capable systems, which shows that the issue is operational rather than theoretical.

The second argument is that the main advantage of a swarm lies in resilience through distribution. In a platform-centric model, the loss of a key asset may critically degrade the mission. In a swarm model, functionality is distributed among

many relatively inexpensive units. If part of the group is jammed or destroyed, the remaining elements may preserve sufficient sensing and task capacity to continue the operation. This is particularly important for reconnaissance in denied areas, convoy screening, urban search, and facility protection. DARPA's OFFSET program placed human-swarm teaming, large-scale coordination, and rapid tactic generation at the center of development, reflecting the practical military interest in swarm employment. The third argument concerns command and control. The usefulness of swarms depends not only on the number of platforms, but on the balance between machine autonomy and human supervision. As swarm scale grows, direct manual control over each unit becomes impossible. Effective military swarms therefore require a higher-level model in which the operator defines intent, priorities, and constraints, while the swarm autonomously allocates local tasks and adapts to changing conditions. This reduces cognitive overload and shortens the decision cycle, but also creates requirements for explainability and trusted interfaces.

At the same time, swarm performance may degrade under communication denial, GPS disruption, cyber intrusion, sensor ambiguity, and adversarial deception. A tactically impressive swarm may also fail in real operations if doctrine and operator training remain designed for single-platform systems. NATO demonstrations of heterogeneous autonomous systems in GPS-denied and contested environments confirm that resilience, interoperability, and integrated situational awareness are becoming decisive design priorities. The study supports the hypothesis that swarms of unmanned systems can significantly increase the resilience and operational effectiveness of military missions when compared with isolated platforms. Their value lies in distributed sensing, redundancy, flexible task allocation, and the ability to preserve partial functionality despite attrition or interference. However, this potential is realized only when swarm architecture is combined with resilient communications, adaptive control logic, and human-centered command. The main conclusion is that swarming should be treated as a distinct operational concept rather than a simple numerical increase in unmanned assets. Its practical significance lies in enabling persistent reconnaissance, area saturation, deception, infrastructure protection, and collaborative action in multidomain operations. The results may be used in military planning, doctrine development, force design, and the formulation of technical requirements for next-generation autonomous systems.

References

1. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

2. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

3. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

4. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

5. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

6. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

7. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

8. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

9. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

10. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

11. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

12. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

13. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

14. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

15. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

16. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

17. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

18. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, pp. 101-104).

19. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

20. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

21. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

22. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

23. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

24. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

25. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

26. Atayev S.U. et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., sect. 3,7. p.100-101

27. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

28. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

29. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

30. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

INTEGRATED COUNTER-UAS METHODS BASED ON THE FUSION OF RADAR, ELECTRONIC WARFARE AND AI ANALYTICS

Hasanov A.H., Talibov A.M., Akhundov R.G., Hashimov E.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The rapid proliferation of unmanned aerial systems has transformed the air threat environment for military forces and critical defense infrastructure. The U.S. Department of Defense notes that state and non-state actors increasingly employ small UAS against forces, facilities, and infrastructure, while NATO has stressed that counter-drone technologies must be integrated into broader air and missile defense architectures. The purpose of this study is to substantiate an integrated counter-UAS approach based on the coordinated use of radar surveillance, electronic warfare, and AI-driven analytics in order to improve detection, identification, tracking, and defeat of small aerial threats under contested operational conditions.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based assessment of counter-UAS operations. The analytical model treats counter-UAS as a layered process including detection, classification, decision support, and neutralization. Radar is considered the primary instrument for early search and tracking, electronic warfare as the principal means of signal disruption, and AI analytics as the layer that fuses sensor inputs, reduces false alarms, and accelerates operator decision-making. The study compares single-sensor and integrated architectures using detection continuity, reaction time, resistance to

interference, and stability under target saturation. The hypothesis is that effectiveness rises when heterogeneous sensors and non-kinetic effectors are connected through a unified command-and-control logic.

The first argument is that modern counter-UAS defense must be layered and sensor-integrated. NATO interoperability exercises in 2024 tested more than 60 counter-drone systems, including sensors, jammers, drone-on-drone systems, and cyber interceptors, because no single technical means can reliably defeat the full spectrum of low, slow, small, and partially autonomous aerial targets. This confirms that the counter-UAS problem requires a coordinated architecture in which surveillance, identification, and engagement are linked in one operational loop. The second argument is that radar remains indispensable, but not sufficient by itself. NATO technical materials on new-generation counter-UAS systems indicate that active radar is commonly used for initial detection, while electro-optical and infrared sensors are employed for further investigation and identification. Other NATO research also highlights the relevance of radar, EO surveillance, and passive emitter-localization sensors for detecting low-signature UAS. Radar should therefore be treated as the backbone of the search function, while its outputs must be supplemented by other modalities to improve target discrimination in cluttered environments. The third argument concerns electronic warfare. In practice, EW is essential because many small UAS rely on radio-frequency links or satellite-enabled navigation, and NATO's 2024 counter-drone exercise explicitly included jammers and cyber interceptors among the tested capabilities. This indicates that disruption of control, navigation, or data exchange is now a core part of modern counter-UAS defense. At the same time, highly autonomous drones, pre-programmed flight paths, and frequency-agile links reduce the effectiveness of simple jamming. Therefore, EW should not be viewed as a stand-alone solution, but as an adaptive component of a wider integrated defense system. The fourth argument is that AI analytics provides the decisive integration layer. Official U.S. defense documents emphasize AI and machine learning for ingesting and analyzing sensor feeds in command-and-control systems, as well as for real-time sensor data fusion and automated tasking. In a counter-UAS setting, this allows radar tracks, passive RF indications, EO observations, and jammer status data to be fused into a unified threat picture. Operators therefore receive prioritized recommendations on target confidence, probable trajectory, threat category, and response options rather than fragmented alerts.

The study also identifies several constraints. Integrated counter-UAS systems depend on interoperability between sensors, effectors, and command software. NATO procurement requirements for counter-unmanned aircraft capabilities specifically state that command-and-control systems should ensure all sensors are fully integrated. In addition, the value of AI analytics depends on training data quality, operational testing, and robustness against deception. Dense electromagnetic conflict may also degrade both detection and EW performance. Therefore, the greatest practical value lies not in any single subsystem, but in resilient architecture, procedural coordination, and trained operator oversight.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that the most effective methods of countering unmanned aerial threats are based on the integration of radar, electronic warfare, and AI analytics within a unified command-and-control framework. Radar provides search and track continuity, electronic warfare delivers non-kinetic disruption, and AI analytics fuses data, reduces ambiguity, and accelerates the decision cycle. Their combined use offers higher resilience against small, low-signature, and massed aerial threats than isolated countermeasures.

The main conclusion is that future counter-UAS systems should be designed as layered, interoperable, and data-centric defense architectures rather than as collections of separate devices. The practical significance of the study lies in its applicability to force protection, military base defense, convoy security, and the protection of critical defense infrastructure.

References

1. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

2. Atayev S.U. et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., se. 3,7. p.100-101

3. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

4. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

5. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

6. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

7. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

8. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

9. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

10. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

11. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

12. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.120-121

13. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

14. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

15. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

16. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

17. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

18. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

19. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

20. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

21. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

22. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, pp. 101-104).

23. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

24. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

25. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

26. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

27. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

28. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

29. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

30. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

ELECTRONIC WARFARE IN A SATURATED ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT: NEW APPROACHES TO DETECTION, SUPPRESSION, AND PROTECTION

Jahangirov V., Nasirov E.V., Akhundov R.G.,
National Defense University, Baku, Azerbaijan
Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The modern battlespace is increasingly shaped by a congested and contested electromagnetic environment in which communications, navigation, sensing, and command systems are exposed to interference, jamming, spoofing, and hostile spectrum exploitation. Official NATO and U.S. defense documents stress that future operations must be conducted under persistent electronic warfare pressure and that sensing technologies must remain effective even when the spectrum is intentionally disrupted or overloaded. In such conditions, electronic warfare becomes a central instrument for preserving combat effectiveness and force survivability. The aim of this study is to substantiate new approaches to detection, suppression, and protection in electronic warfare under conditions of spectrum saturation.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural and functional analysis, and scenario-oriented assessment. Electronic warfare is examined as an operational cycle that includes electromagnetic awareness, signal detection and classification, suppression planning, protection of friendly systems, and adaptive reconfiguration. The study compares traditional platform-centric EW organization with distributed models in which sensors, jammers, and command nodes exchange information in near real time. Evaluation is performed using four criteria: detection speed, suppression selectivity, protection resilience, and continuity of operation under interference and deception. The working hypothesis states that EW effectiveness in a saturated environment rises when spectrum awareness, automated analytics, adaptive jamming, and defensive emission control are integrated into a coordinated architecture.

The first argument of the study is that the main difficulty of modern electronic warfare lies in the structure of the electromagnetic environment itself. The problem is no longer limited to identifying a single hostile emitter or applying jamming against a known channel. Operators must function in an environment saturated with friendly, hostile, civilian, and commercial signals, where bandwidth is limited and adversaries deliberately create ambiguity through mobility, deception, and emission variability. NATO materials on contested electromagnetic environments state that sensing and surveillance technologies must operate where the spectrum is constrained by both unintentional interference and hostile jamming, and where radar and navigation systems may suffer degradation. The second argument is that detection must move from simple interception toward dynamic electromagnetic awareness. In a saturated spectrum, it is not enough to register emissions. Effective

detection requires continuous monitoring, anomaly recognition, behavioral classification, and rapid correlation between emitter characteristics and probable operational intent. U.S. and NATO materials emphasize real-time awareness, rapid assessment of the electromagnetic operating environment, and spectrum survey as prerequisites for command decisions and EW coordination. Therefore, the detection function must combine wide-area sensing, passive collection, and predictive recognition of hostile patterns. The third argument is that suppression should become adaptive rather than static. Traditional jamming often assumes a stable waveform, fixed frequency range, or predictable communication pattern. In practice, modern threats can shift frequencies, alter modulation, shorten transmission windows, or use partially autonomous behavior to reduce vulnerability to disruption. DARPA programs on adaptive electronic warfare and radio-frequency machine learning show that defense research is moving toward systems capable of learning signal behavior, identifying previously unseen emitters, and generating flexible response options. Future suppression should therefore be selective, time-sensitive, and machine-assisted rather than based only on broad-spectrum power denial. The fourth argument concerns protection. In a contested environment, success depends not only on suppressing enemy emitters, but also on preserving the functioning of friendly communications, sensors, navigation, and command systems. Electronic protection must therefore include emission control, waveform agility, distributed communications, spectrum discipline, alternative navigation methods, and rapid reconfiguration under jamming or spoofing. Recent U.S. service documents stress that forces must observe the electromagnetic operating environment, deny the enemy use of the spectrum, and protect their own access in contested, congested, and constrained conditions. Artificial intelligence and machine learning are becoming important enabling tools, but not autonomous substitutes for operators. Their main value lies in accelerating classification of unknown signals, supporting real-time data fusion, and reducing cognitive burden in dense electromagnetic activity. However, AI-assisted EW remains dependent on representative data, explainable logic, adversarial robustness, and disciplined human supervision.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that electronic warfare in a saturated electromagnetic environment becomes more effective when detection, suppression, and protection are organized as linked functions within a unified adaptive architecture. The most promising approach is the integration of electromagnetic awareness, machine-assisted signal analysis, selective suppression, and resilient protective measures.

The main conclusion is that new-generation electronic warfare must be data-centric, adaptive, and human-supervised. Its practical significance lies in the protection of maneuver forces, command posts, unmanned systems, and critical military infrastructure in multidomain operations.

References

1. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

2. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

3. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

4. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

5. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

6. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

7. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

8. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

9. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

10. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

11. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

12. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

13. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

14. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

15. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

16. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

17. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

18. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, pp. 101-104).

19. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

20. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

21. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

22. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

23. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

24. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

25. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

26. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

27. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

28. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

TRUSTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DEFENSE SYSTEMS: REQUIREMENTS FOR RELIABILITY, EXPLAINABILITY AND CONTROL

Huseynov B.S., Muradov S.A., Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan
Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Introduction

Artificial intelligence is becoming an increasingly important component of modern defense systems, including decision support, intelligence processing, autonomous functions, logistics, cyber defense, and mission planning. At the same time, military adoption of AI creates a specific problem that goes beyond raw performance: the system must not only be effective, but also trusted under operational stress, uncertainty, and adversarial pressure. Official U.S. Department of Defense guidance defines five AI ethical principles, namely responsibility, equitability, traceability, reliability, and governability, while NATO's revised AI strategy identifies six Principles of Responsible Use for AI in Defence, including explainability and traceability, reliability, and governability. The objective of this study is to determine the core requirements that make AI trustworthy in defense applications and to show why reliability, explainability, and human control should be treated as system-level conditions rather than optional design features.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-oriented assessment of AI-enabled defense applications. Trusted AI is examined as an integrated socio-technical construct that includes algorithms, data, interfaces, operators, governance procedures, and operational context. The analytical framework uses three interrelated dimensions: reliability, explainability, and control. Reliability is interpreted as stable and bounded performance under realistic operational conditions. Explainability is treated as the capacity to make system outputs sufficiently understandable and traceable for responsible military use. Control is defined as the combination of human oversight, technical constraints, and governance mechanisms that prevent unsafe, unintended, or unauthorized system behavior. This approach is consistent with NATO's Principles of Responsible Use and with recent defense guidance on dependable AI and responsible AI implementation.

Main Part

The first argument of the study is that trust in defense AI cannot be reduced to high accuracy in laboratory conditions. Military AI operates in dynamic, incomplete, deceptive, and adversarial environments in which data may be degraded, manipulated, delayed, or contextually ambiguous. For this reason, reliability must be understood as operational dependability rather than benchmark success. DoD guidance explicitly treats reliability as a core ethical principle and requires AI capabilities to have defined uses, well understood limitations, and testing and assurance within those uses across their life cycles. NATO's AI strategy likewise stresses reliability and the need to protect AI against interference, manipulation, or sabotage. Therefore, trusted AI in defense must be validated not only for nominal functionality, but also for degraded conditions, adversarial inputs, and system-of-systems interactions. The second argument is that explainability is not merely a transparency preference, but an operational necessity. In military environments, commanders and operators must often justify action under time pressure, uncertain information, and legal responsibility. If an AI system generates a recommendation, a classification, or a prioritization result that cannot be meaningfully interpreted, the user may either overtrust it or reject it entirely. NATO explicitly includes explainability and traceability among its responsible-use principles, and DoD guidance similarly emphasizes traceability so that relevant personnel possess an appropriate understanding of the technology, development processes, and operational methods applicable to the capability. In practical terms, this means that defense AI should support auditable data provenance, understandable model behavior, and interpretable outputs that are sufficient for command review and post-action analysis. The third argument concerns control and governability. A trusted military AI system must remain subject to human judgment, policy constraints, and technical interruption mechanisms. DoD policy on autonomy in weapon systems establishes guidelines intended to minimize the probability and consequences of failures that could lead to unintended engagements. In parallel, responsible AI guidance treats governability as a core requirement, meaning that AI capabilities should be designed so that personnel can detect and avoid unintended consequences

and disengage or deactivate deployed systems if they demonstrate unintended behavior. This demonstrates that control is not external to the AI system. It must be engineered into interfaces, escalation logic, supervisory modes, and command procedures from the outset. The fourth argument is that trustworthiness depends on governance and assurance across the full lifecycle. Recent defense documents emphasize implementation pathways, risk-guided responsible AI, and operationally realistic testing and evaluation of AI models in defense contexts. NATO has also established a Data and AI Review Board to operationalize responsible development and use of AI and is developing a responsible AI certification standard. This means that trusted AI cannot be secured by model design alone. It requires disciplined data management, red-teaming, operational testing, bias and harm mitigation, human factors assessment, and governance mechanisms able to evaluate whether the system remains suitable as missions and threat conditions evolve. The study also shows that the most realistic model for defense use is not unrestricted machine autonomy, but human-centered AI integration. UK defense guidance similarly frames military AI adoption around safe and responsible delivery, emphasizing human-centricity, responsibility, understanding, bias and harm mitigation, and reliability. In operational terms, the highest practical value arises when AI accelerates perception, analysis, and recommendation, while humans retain authority over mission interpretation, escalation decisions, and the use of force.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that trusted AI in defense systems emerges only when reliability, explainability, and control are treated as interdependent requirements embedded in the system architecture, operational doctrine, and governance process. Reliability without explainability may produce fragile overreliance, explainability without reliability has limited operational value, and both are insufficient without effective human and institutional control. The main conclusion is that trusted military AI should be designed as a controlled and assured capability rather than a purely computational instrument. Its practical significance lies in supporting the development of decision-support systems, autonomous functions, defense analytics platforms, and acquisition requirements that remain effective, reviewable, and governable in real operational conditions.

References

1. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

2. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

3. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

4. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

5. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

6. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

7. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

8. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

9. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

10. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

11. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

12. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

13. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

14. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

15. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

16. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

17. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

18. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

19. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

20. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

21. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

22. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

23. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

ADDITIVE MANUFACTURING IN THE DEFENSE INDUSTRIAL BASE: ACCELERATING REPAIR, IMPORT SUBSTITUTION, AND LOGISTICS RESILIENCE

Garayev M.F., Ismayil.I., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The growing complexity of military supply chains, the vulnerability of long logistics routes, and the increasing need for rapid equipment recovery have made additive manufacturing one of the most relevant technological directions for the defense industrial base. Official U.S. defense sources describe additive manufacturing as a means to increase readiness, save costs, and enable the military services to share data through common standards and processes. Recent Defense Logistics Agency materials also connect additive and advanced manufacturing with warfighter readiness and supply chain resilience, while current operational logistics assessments emphasize forward-positioned, on-demand production of critical parts in order to reduce dependence on contested supply lines. The purpose of this study is to determine how additive manufacturing can strengthen repair capability, reduce external dependence for selected components, and improve logistics resilience in military and defense-industrial systems.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based evaluation of defense sustainment processes. Additive manufacturing is examined not only as a production technique, but as an element of a broader sustainment and industrial architecture that includes digital design data, material qualification, certification procedures, distributed production capacity, and military logistics support.

The analytical framework uses four dimensions: repair acceleration, substitution of hard-to-source parts, reduction of logistics vulnerability, and contribution to operational readiness. The study compares conventional supply-based sustainment with hybrid models in which selected components can be produced through certified additive manufacturing at depot, industrial, or forward locations. The working hypothesis states that additive manufacturing improves defense resilience when it is integrated with common technical standards, quality assurance, and secure digital production workflows rather than used as an isolated prototyping tool. This interpretation is consistent with DoD and DLA materials emphasizing standardization, cross-service data sharing, and enterprise adoption of additive manufacturing.

The first argument of the study is that the defense value of additive manufacturing lies in time compression across the sustainment cycle. In conventional practice, repair of military equipment often depends on long

procurement chains, limited supplier availability, batch production schedules, and transportation delays. This is especially problematic when the required part is low-volume, legacy, geographically distant, or temporarily unavailable in the supply network. Additive manufacturing changes this logic by enabling production closer to the point of need and by reducing dependence on tooling-intensive processes for selected components. Defense sources note that the Joint Additive Manufacturing Working Group has sought to reduce acquisition and supportability costs, shorten manufacturing and repair cycle times, and transition manufacturing research into production. In practical terms, this means that additive manufacturing can support faster restoration of operational capability when conventional resupply is too slow or too fragile.

The second argument is that additive manufacturing strengthens logistics resilience by decentralizing selected production functions. Rather than relying exclusively on centralized factories and extended transportation corridors, defense organizations can use additive manufacturing to create a distributed sustainment network.

Recent DLA reporting on operational logistics under stressed conditions explicitly states that additive manufacturing enables forward-positioned, on-demand production of critical parts, thereby reducing reliance on contested supply lines. This is strategically important because military logistics is increasingly exposed to disruption from kinetic attack, cyber interference, transportation bottlenecks, and industrial fragility.

A more distributed production model does not eliminate the need for traditional industry, but it creates an additional layer of flexibility that can preserve sustainment continuity during crisis or conflict.

The third argument concerns import substitution and supply-chain independence. Recent U.S. defense and GAO materials continue to highlight foreign dependency and limited visibility into lower-tier suppliers as national security concerns within the defense industrial base. In this context, additive manufacturing has value not only because it prints parts quickly, but because it can reduce dependence on hard-to-source items and limited production lines for selected categories of components. Its practical relevance is greatest where technical requirements are stable, digital design authority is available, and certification procedures permit qualified local production. Therefore, additive manufacturing should be viewed as a selective substitution mechanism for approved components, repair items, tools, fixtures, and some sustainment parts rather than as a universal replacement for all conventional manufacturing processes.

The fourth argument is that military adoption of additive manufacturing depends on standardization, certification, and trustworthy digital data. DLA has repeatedly emphasized the need for common technology, standards, and processes that allow the military services to share additive manufacturing data and increase readiness.

This requirement is decisive because defense use of additively manufactured parts involves more than geometric reproduction. It requires validated material

properties, repeatable process control, digital model integrity, inspection criteria, and acceptance procedures aligned with mission risk. Earlier DoD oversight work on additive manufacturing for sustainment parts likewise identified the need for stronger coordination and implementation across the Department. Without such institutional foundations, additive manufacturing remains limited to demonstration value and cannot scale into a dependable sustainment capability.

At the same time, the study identifies several constraints. Additive manufacturing is not equally suitable for all materials, load-bearing parts, or mission-critical assemblies.

Its effectiveness depends on feedstock availability, machine qualification, operator competence, cybersecurity of design files, and the legal authority to reproduce technical data.

Defense-wide digital standards efforts and digital ecosystem planning indicate that the future of additive manufacturing in defense will be tied to broader digital engineering, secure data exchange, and lifecycle management rather than stand-alone printing capacity. Therefore, the most realistic military model is a controlled hybrid architecture in which additive manufacturing complements conventional production and repair systems, especially in cases of urgent need, obsolete parts, distributed operations, and constrained supply access.

Results and conclusions

The study supports the hypothesis that additive manufacturing can strengthen the defense industrial base by accelerating repair, enabling selective substitution of difficult-to-source components, and improving logistics resilience under disrupted supply conditions. Its greatest military value arises when it is embedded in a standardized, certified, and digitally connected sustainment architecture rather than treated as a stand-alone fabrication tool.

The main conclusion is that additive manufacturing should be regarded as a strategic enabler of defense readiness and industrial adaptability. Its practical significance lies in depot repair, expeditionary sustainment, tooling production, legacy-part replacement, and resilience planning for military supply systems operating under crisis or conflict conditions.

References

1. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

2. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

3. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

4. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

5. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

6. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

7. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

8. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

9. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

10. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

11. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

12. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

13. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

14. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

15. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

16. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

17. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

18. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

19. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025. Vol.4, p. 101-104

20. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

21. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

22. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

23. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

ADVANCED SENSOR TECHNOLOGIES AND MULTISENSOR DATA FUSION FOR INTELLIGENCE AND PROTECTION OF MILITARY FACILITIES

Mammadov E.S., Akhundov R.G.,
National Defense University, Baku, Azerbaijan
İsmayil, İ., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Introduction

The growing complexity of the operational environment around military installations has significantly increased the requirements for intelligence, surveillance, and force protection systems. Modern facilities must be protected against a wide spectrum of threats, including covert intrusion, low-signature aerial platforms, sabotage, perimeter breaches, and coordinated attacks that unfold under limited reaction time. NATO identifies Joint Intelligence, Surveillance and Reconnaissance as a key element of operations and a cornerstone of deterrence and defence, emphasizing the need to provide decision-makers with timely and accurate information. At the same time, NATO's Science and Technology Organization highlights military sensing technologies and multisensor fusion as a major research and capability area, while recent U.S. Army installation-security demonstrations report that AI-enabled sensing technologies improve threat detection, identification accuracy, and real-time decision support while reducing false alarms. The aim of this study is to determine how advanced sensor technologies and multisensor fusion can improve reconnaissance effectiveness and the protection of military facilities under contemporary threat conditions.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based assessment of facility protection and reconnaissance tasks. The analytical framework treats the security system of a military facility as an integrated sensing and decision environment composed of detection assets, communication channels, fusion mechanisms, operator interfaces, and response elements. The study examines the combined use of radar, electro-optical and infrared sensors, thermal imaging, acoustic and seismic sensors, passive radio-frequency detection, and AI-assisted analytics.

Effectiveness is evaluated through four criteria: detection probability, identification reliability, false-alarm reduction, and timeliness of operator response. The working hypothesis states that reconnaissance and protection effectiveness increase when heterogeneous sensors are connected through multisensor fusion and data analysis rather than used as separate surveillance tools. This approach is consistent with NATO technical work on military multisensor fusion engines and with official NATO policy that describes surveillance data fusion and analysis, potentially using AI and machine learning, as critical for producing a coherent and accurate picture of the battlespace.

The first argument of the study is that modern military facilities cannot be reliably protected by single-sensor surveillance architectures. A radar may provide area awareness and movement tracking, but may be limited in target discrimination at low altitude or in cluttered terrain. Optical and infrared systems improve visual confirmation, but depend on line of sight, weather, illumination, and viewing geometry. Acoustic, seismic, and passive RF sensors can reveal activity that is poorly visible to conventional imaging devices, but each of them remains incomplete when employed in isolation. NATO's Sensing Technology activities explicitly cover passive and active sensors across all warfare domains, while NATO's 2025 collaborative science programme identifies ISR, sensing, and multisensor fusion as a combined capability area. This indicates that the technological trend is moving toward integrated sensing rather than reliance on a dominant single modality.

The second argument is that the main operational value of multisensor fusion lies in the transformation of fragmented observations into a coherent and decision-relevant security picture. NATO policy on Integrated Air and Missile Defence states that surveillance data fusion and analysis methods are critical for providing a coherent and accurate picture of the battlespace. Although this principle is often discussed in the context of air and missile threats, its logic directly applies to military installation security, where the defender must correlate perimeter events, aerial observations, passive emissions, and anomaly indicators into one operational view. A fused system can compare signatures across sensors, eliminate contradictory readings, and assign higher confidence to detected events when they are confirmed by multiple channels. As a result, the operator does not receive disconnected alarms, but a prioritized assessment of probable threat type, location, trajectory, and urgency.

The third argument is that artificial intelligence significantly increases the practical value of multisensor architectures, but primarily as an analytical accelerator rather than an autonomous substitute for human judgment. U.S. defense guidance on AI-enabled operational platforms has linked emerging capabilities to real-time sensor data fusion, automated command-and-control tasking, and autonomous system integration. At the installation level, recent Army demonstrations reported that AI-supported security technologies reduce false alarms, improve identification accuracy, and enable real-time decision support for operators. In practical terms, AI helps classify patterns, correlate detections, distinguish normal background activity from suspicious behavior, and reduce the cognitive burden on security personnel. This is especially important for large facilities where continuous monitoring of multiple sectors and channels can overwhelm human operators if the data are not filtered and prioritized.

The fourth argument concerns the direct relationship between advanced sensing and reconnaissance quality. NATO describes JISR as a permanent system that provides information and intelligence to key decision-makers and helps them make timely and accurate decisions. For military facilities, this means that sensor systems should not be treated only as passive defensive barriers. They must also support reconnaissance functions such as threat characterization, route observation, anomaly tracking, and early warning before an intruder or hostile platform reaches

the critical zone of the object. In this sense, advanced sensing supports both immediate force protection and the broader intelligence preparation of the local operational environment.

At the same time, the study identifies several limitations. Sensor fusion effectiveness depends on interoperability, synchronization of data streams, calibration quality, communication reliability, and cybersecurity of the sensing architecture. A multisensor system may generate more data but not more security if fusion logic is weak or if the operator interface does not support rapid interpretation. Weather, electromagnetic interference, masking terrain, and deliberate deception can also degrade performance.

Therefore, the practical military value of advanced sensing is highest when the system is designed as an integrated architecture with resilient communications, disciplined fusion logic, and trained operator supervision rather than as a collection of disconnected technical devices.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that advanced sensor technologies and multisensor data fusion significantly improve both reconnaissance capability and protection effectiveness for military facilities. Their combined use increases detection reliability, strengthens target identification, reduces false alarms, and shortens the time between observation and security response. The greatest practical value arises when heterogeneous sensing channels are connected through fusion and AI-assisted analytics that provide operators with a coherent and prioritized threat picture rather than isolated sensor outputs.

The main conclusion is that the future of military facility protection lies in integrated sensing architectures that combine advanced sensors, multisensor fusion, and human-supervised analytical support. The practical significance of the study lies in its applicability to installation security, perimeter defense, local ISR, early warning, and the protection of critical military infrastructure under multidomain threat conditions.

References

1. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

2. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

3. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

4. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

5. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

6. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

7. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

8. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

9. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

10. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

11. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

12. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

13. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

14. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

15. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

16. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

17. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

18. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

19. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69

20. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

21. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

22. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

23. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

QUANTUM TECHNOLOGIES IN THE MILITARY DOMAIN: QUANTUM NAVIGATION, COMMUNICATION, AND THE PROSPECTS OF ADVANCED SENSOR SYSTEMS

Rustamov A.R.[12], Akhundov R.G.[2], Hashimov E.G.[12]
[1]Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
[2]National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

Quantum technologies are increasingly viewed as one of the most consequential emerging directions in defense science and military capability development. NATO's Quantum Technologies Strategy states that Allies and NATO must urgently accelerate the development of quantum technologies in order to augment capabilities and avoid new capability gaps as peer competitors adopt them. NATO's broader emerging and disruptive technologies agenda likewise identifies quantum technologies as a major factor changing the way the Alliance operates. In parallel, U.S. defense research and allied programs are actively linking quantum advances to positioning, navigation, and timing in GPS-denied environments, ultra-secure communications, and next-generation sensing. The purpose of this study is to determine the military significance of quantum navigation, quantum communication, and advanced quantum sensor systems, and to identify the conditions under which these technologies may produce operational rather than merely experimental value.

Methodology

The research is based on a systems approach, structural-functional analysis, and scenario-based assessment of military applications of quantum technologies. The analytical framework includes three interrelated directions: quantum navigation and timing, quantum communication, and quantum sensing. Quantum navigation is considered in relation to resilience under degraded or denied satellite navigation conditions.

Quantum communication is examined as a means of increasing security and integrity of information exchange. Quantum sensing is analyzed as a class of technologies designed to improve precision in the measurement of time, motion, fields, and other physical parameters relevant to defense tasks. The working hypothesis states that the military value of quantum technologies increases when they are integrated into operational architectures for navigation, sensing, and secure information exchange rather than treated as isolated laboratory capabilities. This interpretation is consistent with NATO's strategy, DARPA research priorities, and current defense investment documents that identify quantum sensing and related technologies as areas of direct national security interest.

The first argument of the study is that quantum navigation has major military relevance because modern operations remain highly dependent on positioning, navigation, and timing services that can be degraded, jammed, or spoofed. DARPA states that its quantum research has laid the foundation for next-generation military

capabilities such as positioning, navigation, and timing in GPS-denied environments. Recent UK defense reporting also notes the development of a quantum-enabled atomic clock intended to make military operations more secure by supporting resilient timing functions. In practical military terms, this means that quantum clocks, inertial technologies, and related sensing architectures may contribute to navigation and synchronization when satellite support is unreliable or unavailable.

Their strategic importance is especially high for aviation, naval operations, missile support, autonomous systems, and distributed command networks that depend on precise time and location references.

The second argument is that quantum communication is important not because it immediately replaces conventional military networks, but because it may enhance secure exchange and information assurance in selected high-value contexts. DARPA's network-oriented quantum efforts aim to enable quantum communications over classical infrastructures and to use quantum properties to strengthen communications, timing, and sensing functions. NATO's quantum strategy also treats quantum technologies as part of the Alliance's effort to preserve technological advantage in a competitive security environment. The operational implication is that quantum communication should be understood as a strategic layer for especially sensitive channels, timing integrity, and future secure networking rather than as a universal substitute for existing communications. Its military promise lies in strengthening trust in the transmission and timing environment, particularly where information compromise would produce disproportionate operational consequences.

The third argument concerns advanced quantum sensors. Recent DARPA materials emphasize that robust quantum sensing is being developed for use beyond the laboratory, including on the ground, at sea, in the air, and in space. DARPA has described its Robust Quantum Sensors program as an effort to make quantum sensing viable in real-world defense conditions, while other agency programs continue to support enhanced measurement tools for timing, fields, and related national security applications.

This is significant because the true barrier to defense use is no longer only scientific feasibility, but field readiness under vibration, motion, temperature variation, and operational stress. A militarily useful quantum sensor must maintain sensitivity while functioning on real platforms rather than in controlled laboratory settings.

The fourth argument is that the future value of quantum technologies lies in their integration with broader defense systems. NATO's 2025 science and technology reporting predicts that AI and quantum technologies will be at the center of strategic competition and will continue to transform defense and security sectors, while NATO's 2025 Science and Technology Strategy positions science and technology as a central pillar for preserving NATO's military and technological edge. This means that quantum capabilities should not be treated as isolated niche tools. Their practical military effect will depend on how they are incorporated into

navigation stacks, sensing architectures, command systems, and secure data infrastructures. Quantum technologies are therefore better understood as enabling layers that enhance resilience, precision, and decision support across multiple mission areas.

At the same time, the study identifies significant limitations. Many quantum technologies remain difficult to ruggedize, scale, certify, and deploy in harsh military environments. High sensitivity may be lost under operational stress, integration with legacy systems remains challenging, and cost and industrial capacity still constrain broad deployment.

The available official materials therefore suggest that the most realistic near-term path is not revolutionary substitution of existing systems, but gradual insertion of quantum capabilities into especially critical functions such as resilient timing, denied-environment navigation, and precision sensing.

Results and Conclusions

The study supports the hypothesis that quantum technologies can become strategically important military capabilities when applied to resilient navigation, secure communication, and advanced sensing. Their greatest practical value lies in strengthening operation under degraded satellite access, improving information assurance for sensitive missions, and increasing precision of military measurement systems under difficult operational conditions.

The main conclusion is that quantum technologies should be treated as a long-term but already operationally relevant direction of defense modernization. Their practical significance lies in supporting GPS-denied operations, protected timing and communication functions, and field-ready sensor systems for air, land, maritime, and space applications. The most effective development model is phased integration into existing defense architectures combined with continued research, industrial scaling, and operational testing.

References

1. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

2. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

3. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

4. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems.* 2026. 10(1), 66-71.

5. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

6. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

7. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

8. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

9. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

10. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

11. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

12. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

13. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

14. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

15. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

16. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025.Vol.4, p.101-104

17. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

18. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

19. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

20. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

21. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

22. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

23. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

24. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

ENERGY RESILIENCE OF MILITARY FACILITIES AND MOBILE PLATFORMS THROUGH ADVANCED POWER AND ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Aliyev A.M., Garayev M.F., Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Reliable energy has become a decisive condition of military effectiveness because command systems, communications, sensors, unmanned platforms, medical support, and sustainment functions all depend on continuous access to power. NATO defines resilience as the capacity to prepare for, resist, respond to, and quickly recover from shocks and disruptions, and it explicitly includes resilient energy supplies and backup plans among the baseline requirements of national resilience. At the same time, recent U.S. defense planning continues to treat installation energy resilience as a priority area, with microgrids, on-site generation, and backup power solutions identified as practical instruments for protecting critical missions against disruption. The purpose of this study is to determine how advanced power-generation and energy-storage technologies can strengthen the energy resilience of military facilities and mobile platforms under contemporary operational conditions.

For the purposes of this research, energy resilience is examined as a systems property linking generation, storage, distribution, control, and mission demand. The analytical framework combines structural-functional analysis with scenario-based assessment and considers two interconnected application areas: fixed military installations and mobile military platforms. In the first case, the focus is placed on microgrids, distributed generation, backup power, and protected supply of critical loads. In the second, attention is directed to hybrid power architectures, advanced batteries, fuel cells, hydrogen-supported systems, and compact energy solutions for tactically dispersed forces. The working hypothesis states that resilience increases when power generation, storage, and control are organized as adaptive and distributed architectures rather than as single-point dependencies on vulnerable external supply or fuel-intensive linear logistics. This approach is consistent with recent NATO and U.S. Army materials emphasizing location-independent on-demand power, high reliability, advanced storage, and hybrid energy applications for defense use.

A central feature of the current military environment is the growing dependence of both fixed and mobile forces on electricity-intensive systems. Recent U.S. Army analysis of the war in Ukraine notes that battlefield electricity has become a hidden lifeline of modern units and that command and control, intelligence, surveillance, reconnaissance, and other core functions rapidly degrade without power. The same analysis states that batteries deplete quickly, generators are vulnerable to detection, and fuel convoys become high-value targets for artillery and drones. This demonstrates that energy is no longer a secondary support issue. It has

become an operational variable directly linked to survivability, maneuver, and combat continuity.

From the perspective of military facilities, the most important shift is the movement from grid dependence toward installation-level resilience. DoD strategic planning documents state that installation energy plans identify resilience gaps and guide project prioritization, while microgrids are described as a key component of installation energy resilience. The Department also reports continued investment in microgrid projects and backup power solutions, including black-start exercises designed to test the ability of installations to restore and sustain critical loads independently when external supply is disrupted. In operational terms, this means that a resilient military installation must be able not merely to consume electricity efficiently, but to maintain mission-essential services during cyberattack, grid failure, severe weather, or deliberate interference with supporting infrastructure.

For mobile platforms and dispersed units, the logic of resilience is different but closely related. Instead of preserving a fixed critical-load architecture, the challenge is to sustain movement, sensing, communications, and local support under conditions where resupply may be delayed or exposed. Recent Army research and development documents identify advanced batteries, fuel reformers, and fuel cells as relevant to hybrid power sources, hybrid power vehicles, and soldier power applications. This indicates that the future of military mobility depends not only on propulsion or armor, but also on compact, high-density, and mission-adaptable energy systems capable of extending operational endurance while reducing logistic burden. In this context, improved storage technologies are strategically important because they can reduce generator dependence, decrease fuel demand, and support electrically intensive mission packages.

An especially important development is the rise of hybrid and modular power architectures that combine several energy technologies rather than relying on one source alone.

The U.S. Army's first hydrogen-powered nanogrid demonstration integrated a fuel cell, electrolyzer, hydrogen storage, battery energy storage, solar panels, and water generation in a compact mobile configuration designed as a self-sufficient power source. This example is significant because it shows the practical military value of combining generation and storage in a transportable energy node that can be deployed in austere environments. The broader implication is that resilience improves when power systems are modular, mobile, and capable of adapting to different operational contexts rather than optimized only for peacetime stationary efficiency.

At the installation level, advanced microgrids remain one of the most promising technical directions because they connect local generation, storage, and load management into a protected control architecture. U.S. Department of Energy budget materials state that advanced microgrid systems optimize the integration of local generation sources, energy storage, and loads in order to provide resilient electricity services, and they also note growing interest in architectures capable of serving defense critical loads. NATO DIANA's energy-and-power challenge similarly

emphasizes the need for location-independent on-demand power with high reliability and resilience for military applications. These developments suggest that the military value of microgrids lies not only in efficiency, but in their capacity to isolate critical functions, continue operation during external disruption, and support rapid restoration of service.

Another decisive issue is the relationship between energy resilience and logistics vulnerability.

The Ukrainian experience analyzed by the U.S. Army shows that tactical energy nodes themselves become targets because of their direct effect on communications, reconnaissance, and medical support. As a result, dispersed and mobile energy nodes, rather than large exposed power points, are increasingly relevant to operational survival. T

his observation is equally important for military facilities and mobile formations. A resilient energy architecture should therefore reduce signatures, avoid single points of failure, and support controlled distribution of loads across multiple local sources and storage devices.

The problem is not only how much power can be produced, but whether it can be generated, stored, and delivered without creating an unacceptable tactical vulnerability.

At the same time, energy resilience cannot be achieved by technology insertion alone. NATO's resilience framework stresses backup planning and recovery capacity, while DoD materials emphasize structured energy planning, mission prioritization, and exercises. This means that advanced batteries, fuel cells, nanogrids, and microgrids become truly militarily useful only when they are integrated into operational planning, infrastructure design, maintenance routines, and contingency procedures. Without such integration, even advanced energy systems may remain isolated demonstrations rather than dependable mission enablers.

The analysis confirms the hypothesis that the energy resilience of military facilities and mobile platforms increases when advanced generation and storage technologies are integrated into adaptive, distributed, and mission-oriented power architectures. For fixed installations, the most important instruments are microgrids, on-site generation, storage, and black-start capable backup systems that protect critical loads during grid disruption. For mobile platforms and dispersed units, the greatest value lies in advanced batteries, fuel cells, hybrid power sources, and transportable modular energy nodes that reduce dependence on vulnerable fuel logistics and exposed generators.

The main conclusion is that energy resilience should be treated as a core element of military readiness rather than as a secondary engineering issue. Its practical significance lies in sustaining command continuity, platform endurance, local autonomy, and operational survivability in contested environments. The most effective path forward is the phased integration of advanced storage, microgrids, hybrid systems, and resilient energy planning into both military infrastructure and tactical force design.

References

1. Zulfugarov B., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

2. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

3. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

4. Islamov, I., et al. Prospects for the use of robotic complexes in eliminating the consequences of environmental accidents at military facilities. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 301–311.

5. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

6. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

7. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

8. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

9. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

10. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

11. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

12. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124

13. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

14. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

15. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

16. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014.

17. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

18. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

TRUSTED MICROELECTRONICS AND THE COMPONENT BASE AS A FACTOR OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY IN THE DEFENSE SECTOR

Hasanov A.H., Akhundov R.G., Hashimov E.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

Technological sovereignty in defense increasingly depends on the ability to design, source, verify, and sustain trustworthy microelectronics. Modern weapons, communications, sensors, command systems, cyber infrastructure, and autonomous platforms all rely on semiconductor components whose compromise, disruption, or unavailability can directly degrade military readiness. U.S. defense planning and supply-chain reviews explicitly connect national defense resilience with domestic production capacity, industrial-base strengthening, and mitigation of vulnerabilities across critical supply chains.

At the same time, the GAO notes that the Defense Microelectronics Activity's Trusted Foundry program is intended to provide an assured chain of custody, mitigate supply-chain disruptions, prevent tampering and unauthorized reverse engineering, and ensure government access to advanced microelectronics services and intellectual property.

The purpose of this study is to determine why trusted microelectronics and a secure component base have become a decisive condition of defense technological sovereignty and how this condition should be translated into practical defense policy and capability development.

Methodology

Within this research, the microelectronics domain is interpreted not merely as an industrial sector, but as a strategic layer embedded in the entire defense capability chain.

The analytical framework combines structural-functional analysis with scenario-based assessment and examines five interrelated dimensions: secure design and fabrication, assured provenance, supply continuity, hardware assurance, and defense-system integration. The study compares dependence on opaque and externally exposed component chains with architectures supported by trusted manufacturing, traceable sourcing, secure design practices, and institutional verification mechanisms.

The working hypothesis states that defense technological sovereignty rises when microelectronics are treated as a protected national-security capability supported by trusted supply chains, domestic or allied production access, and hardware-assurance procedures rather than as a purely commercial procurement category. This interpretation is consistent with DoD supply-chain resilience guidance, the 2025 Defense Business Board report on supply-chain illumination, and current budget priorities that continue to resource trusted and assured microelectronics.

Main Part

At the core of the problem lies the fact that modern defense systems are inseparable from microelectronics. Precision-guided weapons, radars, secure communications, ISR nodes, cyber infrastructure, space systems, and autonomous platforms all depend on increasingly complex semiconductor content. Consequently, any weakness in the component base propagates into operational vulnerability. The DoD Strategic Management Plan stresses that enduring military advantage requires securing the right technology and building capabilities that can outpace competitors, while defense-critical supply-chain assessments emphasize the need to build domestic production capacity and mitigate threats and vulnerabilities in critical chains. In practical terms, this means that semiconductor dependence is no longer a narrow procurement issue. It is a strategic issue directly linked to defense competitiveness and operational continuity.

A second essential point is that trust in microelectronics must include both availability and integrity. A component may be delivered on time but still remain unsuitable for defense use if its provenance is uncertain, if it can be modified or tampered with, or if it creates unacceptable assurance risks. The GAO's 2025 semiconductor review explains that the DoD Trusted Foundry program accredits companies that commit to assured chain of custody, disruption mitigation, protection against tampering, and prevention of unauthorized reverse engineering. This makes clear that trusted microelectronics should not be understood simply as domestically produced chips. They must also be controllable, verifiable, and protected throughout the lifecycle. Such a definition is especially important for mission-critical systems, where hardware compromise can produce silent failure, covert degradation, or strategic loss of confidence in the system itself.

Another decisive consideration concerns supply-chain visibility. The 2025 Defense Business Board report states that geopolitical disruptions, evolving threats, and modern supply-chain complexity create an urgent need for transparency, risk identification, and proactive mitigation in order to maintain national security and operational readiness. The report defines supply-chain illumination as an analytical process that provides visibility into entities, products, parts, and raw materials so that risks can be identified before they result in disruption. Applied to defense microelectronics, this means that sovereignty is not achieved simply by owning a design or funding a production line. It also requires the capacity to understand lower-tier dependencies, bottlenecks, fragile suppliers, and hidden exposure points across the ecosystem. Without such illumination, even nominally secure programs may remain strategically brittle.

An additional layer of the problem is hardware assurance. Defense systems increasingly depend on reprogrammable and configurable devices, which create flexibility but also expand the attack surface. NSA technical guidance on FPGA security highlights the importance of security-focused device selection, internal configuration protection, and assurance processes for DoD microelectronics. Earlier NSA assurance guidance also framed overall hardware-assurance practices for programmable logic as part of a broader approach that can extend to other custom

hardware categories. The implication is that trusted microelectronics must include secure design choices, configuration protection, controlled update mechanisms, and verification procedures able to reduce the risk of hidden manipulation. For technologically sovereign defense systems, trust must therefore be engineered into the hardware layer rather than assumed after acquisition.

The industrial dimension is equally important. DoD's defense-critical supply-chain review and related industrial-base efforts emphasize resilience through domestic production capacity, collaboration with allies and industry partners, and strategic action across the supply chain. Current budget materials continue to identify trusted and assured microelectronics as a distinct funded priority, which signals that the Department treats this field as a sustained capability area rather than a temporary initiative. At the same time, recent defense investment strategy documents classify microelectronics among the critical technology and industry segments of interest for national-security finance and capacity building. These signals together indicate that trusted microelectronics are becoming a core pillar of defense-industrial policy, acquisition planning, and technology competition.

At the operational level, technological sovereignty does not require full autarky in every component category. A more realistic defense model is controlled sovereignty based on assured access, trusted fabrication pathways, allied industrial cooperation where appropriate, hardware-assurance mechanisms, and the ability to prioritize mission-critical nodes of the component base. The main risk is not simple globalization, but unmanaged dependence on opaque and potentially adversarial supply structures. The defense-critical supply-chain report explicitly frames resilience as a collaborative effort involving DoD organizations, the interagency, allies, and industry partners. This suggests that sovereignty in the microelectronics domain should be understood as strategic control over trusted access and assurance, not necessarily complete isolation from all international production networks.

Serious constraints nevertheless remain. Semiconductor ecosystems are capital-intensive, globally distributed, technologically specialized, and difficult to replicate quickly. Supply bottlenecks, talent shortages, lower-tier opacity, obsolescence, and cybersecurity risks all complicate the effort to build a secure component base. The Defense Business Board's 2025 study and DoD supply-chain reviews both imply that visibility and resilience remain incomplete and require continued institutional effort.

Therefore, the challenge is not solved by one program or one fabrication initiative. It requires a long-term architecture of trusted design, manufacturing access, assurance, supply-chain analysis, and lifecycle sustainment.

Results and conclusions

The findings support the hypothesis that trusted microelectronics and a secure component base are now decisive factors of technological sovereignty in the defense sector. Their value lies not only in supporting access to critical components, but in ensuring chain-of-custody assurance, resistance to tampering, supply continuity, and confidence in the hardware foundation of military systems. The strongest sovereignty effect is achieved when trusted fabrication, supply-chain illumination,

and hardware-assurance mechanisms are developed as a unified defense capability rather than as isolated industrial measures.

The principal conclusion is that trusted microelectronics should be treated as a strategic defense enabler equal in importance to software security, industrial resilience, and advanced weapons development. Its practical significance lies in safeguarding communications, ISR assets, autonomous systems, command infrastructure, precision weapons, and other defense systems whose reliability depends on assured semiconductor integrity and access. The most effective path forward is a long-term combination of trusted manufacturing pathways, supply-chain transparency, hardware assurance, and sustained investment in the protected component base.

References

1. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

2. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

3. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

4. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

5. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

6. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

7. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

8. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

9. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

10. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. In Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

11. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

12. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014.

13. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

14. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

INTEGRATION OF NEW TECHNOLOGIES INTO THE DEFENSE INDUSTRIAL BASE: FROM R&D TO SERIAL DEPLOYMENT AND MILITARY ACCEPTANCE

Musayev A., Muftiyev Z., Akhundov R.G., Hashimov E.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

A decisive challenge of modern defense development is not only the creation of new technologies, but their timely conversion into real military capability. Many promising solutions remain trapped between laboratory success, prototyping, limited demonstration, and delayed adoption by the armed forces. Recent NATO and U.S. defense documents show that this problem is now being addressed at the strategic level. NATO's 2025 Rapid Adoption Action Plan is explicitly designed to ensure that new technological products move more quickly from development to military use, while updated NATO production policy also links technological adoption with accelerated defense industrial growth. In parallel, U.S. defense reform documents emphasize acquisition transformation, speed over process, and faster fielding of urgently needed capabilities. The purpose of this study is to determine how new technologies can be integrated into the defense industrial base from the research stage to serial deployment and military acceptance, and to identify the institutional conditions that distinguish successful transition from chronic innovation delay.

Methodology

For this research, technology integration is treated as a full-cycle defense process that links scientific development, prototyping, testing, industrial scaling, procurement, acceptance, and operational fielding. The analytical framework combines structural-functional analysis with scenario-based assessment and examines five interconnected stages: generation of a technological concept, transition from prototype to validated product, industrialization and production readiness, acquisition and contracting, and military acceptance with operational feedback.

The working hypothesis states that integration becomes effective when these stages are organized as a connected defense ecosystem rather than as isolated institutional phases managed by separate communities with conflicting incentives. This approach is consistent with NATO's rapid-adoption model, DIANA's role in linking innovators with operational users, and current U.S. reform efforts that aim to accelerate fielding and reduce bureaucratic delay across the defense acquisition chain.

Main part

A defining feature of the current defense environment is that technological advantage now depends not only on invention, but also on the speed of adoption. NATO's recent policy documents and U.S. defense reform materials show that rapid transition from development to military use has become a strategic priority. This means that research value is limited if promising technologies remain at the

prototype stage and do not reach operational deployment in time to influence real capability.

One of the main obstacles is the transition gap between research, acquisition, industry, and military users. These communities often operate with different timelines, evaluation criteria, and institutional priorities. NATO's 2025 Rapid Adoption Action Plan directly addresses this problem by seeking to increase trust in tested products and speed their adoption across the Alliance. This shows that the movement from prototype to military capability is no longer viewed as a secondary administrative issue, but as a core defense challenge.

The acquisition system is equally decisive. Recent U.S. defense reform documents emphasize faster fielding, streamlined procurement, and reform of inefficient contracts. This is significant because even technically successful innovations may lose relevance if acquisition processes take longer than the pace of technological change. Effective integration therefore requires procurement structures able to contract, scale, and sustain new technologies without excessive procedural delay.

Industrial readiness forms another critical condition. NATO's Updated Defence Production Action Plan stresses the need to accelerate defense industrial growth and rapidly adopt new technologies. In practical terms, a prototype becomes militarily meaningful only if industry can produce it at the necessary scale, quality, and speed. Without manufacturing capacity, supplier support, and production planning, innovation remains limited to demonstration value.

Military acceptance is the next essential threshold. A technology cannot be considered integrated merely because it has passed laboratory trials. It must also be trusted by users, validated in realistic conditions, and incorporated into doctrine, training, and sustainment structures. NATO's rapid-adoption framework and DIANA's user-centered model both reflect this logic. Military acceptance should therefore be understood as a process of operational confidence-building through testing, feedback, interoperability assessment, and proof of mission usefulness.

Software-dependent technologies add further complexity. Many modern defense capabilities continue evolving after fielding through updates, data refinement, and digital integration. For this reason, serial deployment can no longer be treated as the endpoint of a fixed product cycle. Integration increasingly requires a lifecycle approach in which accepted capabilities remain adaptable, secure, and operationally relevant after initial deployment.

The overall conclusion from this analysis is that successful technology integration depends on institutional synchronization. Research organizations, acquisition structures, industrial producers, and military users must be connected from the outset. If these elements remain fragmented, even strong scientific results may fail to become real military capability.

Results and conclusions

The analysis confirms the hypothesis that integration of new technologies into the defense industrial base is most effective when the pathway from research to serial deployment and military acceptance is organized as a continuous and coordinated

defense ecosystem. The strongest practical effect arises when prototype development, industrial scaling, acquisition reform, operational testing, and user trust-building are linked from the outset rather than treated as separate bureaucratic episodes. Under this model, new technologies can move from R&D into deployable capability with greater speed, lower transition loss, and higher operational relevance.

The principal conclusion is that the decisive problem of defense innovation today is not invention in isolation, but the disciplined transition of invention into accepted military capability. Its practical significance lies in procurement modernization, accelerated fielding, production scaling, user-centered testing, and the creation of defense innovation mechanisms that connect laboratories, industry, acquisition structures, and warfighters. The most effective path forward is a synchronized architecture in which research, industrial readiness, contracting, validation, and military acceptance are treated as one strategic process of capability generation.

References

1. Dergachov, K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 75-78

2. Akhundov, R. et al. (2026). Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

3. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

4. Krikun, V. L. et al. Accelerating decision making and operational efficiency through C4ISR architecture. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.120-121

5. Barbashin, V. K. et al. Enhancement of operational readiness via predictive maintenance and network optimization. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p. 72-74

6. Hashimov, E. et al. Research of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*. 2026. 10(1), 66-71.

7. Rustamov, A. et al. (2025). Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103-111.

8. Valehov, S. A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

9. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.102-103

10. Kovalev V.A, et al. AI assisted control model for strike UAV swarms *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.108-109

11. Piriyev, H. et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. Матеріали конференцій МЦНД, (07.11. 2025; Дніпро, Україна), 246-256.

12. Huseynov, M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight. In Problems of Informatization. 2025. Vol. 2, p. 114-115.

13. Maharramov, R. R. et al. Impact of high-frequency electromagnetic fields on UAV swarms and countermeasures. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.122-123

14. Muradova E.E., et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems // Актуальні питання розвитку галузей науки: збірник науковихпраць з матеріаламиVIМіжнародної наукової конференції. 2025. p.351-360

15. Kartashov, O. S. et al. (2025). Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.118-119

16. Muradov, S. A. et al. (2025). System-level methods for enhancing UAV flight safety and resource efficiency. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.124-126

17. Javadov, J. M. et al. (2025). Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.116-117

18. Talibov, A. A. et al. (2025). Game theory enabled multi-level logistics planning. *In* Problems of Informatization. 2025. (Vol. 4, sections 5 and 6, pp. 105–107).

19. Huseynov, B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7..p.132-134

20. Mashaev E.T. et al. System of systems at war: UAV enabled sensing and strike integration. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.112-113

21. Petrovski, A. A. et al. A multi criteria AHP framework for hybrid renewable supply in suburban contexts. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 97-100).

22. Rustamov, A. R. et al. A systems approach to urban operations for the protection of critical infrastructure and the management of civilian risks. In *Problems of Informatization*. 2025. Vol. 4, pp. 80-82.

23. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

24. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

25. Bayramov A., Hashimov E. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

26. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // International scientific journal «Grail of Science». 2026. № 62. С. 873–889.

27. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

28. Bakhshali, V. I. et al. Hybrid energy systems in Azerbaijan: Resilience metrics and spatial constraints. *In* Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. 2025. (Vol. 4, pp. 94-96).

29. Sadiqli, A. B. et al. GIS-based evaluation of road traffic emissions and substantiation of control measures. *In* Problems of Informatization. 2025. Vol.4, p.101-104

30. Gasimov V. et al. Evaluation of alternative solutions for the effective structure of the cyber security system in critical information infrastructures by the hierarchical analysis method. Advanced Information Systems. 2026, Vol.10, No.2. p.87-99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.2.10

OPERATIONAL LATENCY AS A HIDDEN VULNERABILITY IN AIRFIELD PROTECTION SYSTEMS

Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Introduction

Airfields and airbases represent large-area, high-consequence facilities where physical protection must function under continuous movement, mixed access regimes, and rapidly changing operational states. In such environments, security performance is often judged by the presence of sensors, barriers, access control, and response forces, while the time-dependent behavior of the integrated system receives less explicit attention. However, for a deliberate adversary, time is the decisive resource. If the defender cannot detect, validate, decide, dispatch, and intervene before the adversary reaches a critical element, the system is operationally insufficient regardless of how extensive its hardware inventory appears. This thesis addresses operational latency as a hidden vulnerability: a system may be formally compliant and technically equipped, yet fail under realistic conditions because cumulative delays across the information-and-control chain consume the time reserve created by physical delay elements. The goal is to formalize the concept of operational latency for airfield protection, identify where it accumulates, and propose measurable acceptance criteria and evidence methods that prevent "compliant but insufficient" outcomes.

Methodology

The methodology combines scenario-oriented analysis with a structured decomposition of defender timelines. Representative airfield scenarios are defined to stress distinct delay mechanisms, including covert approach to apron areas, forced entry at gates, diversion plus main attack, insider-enabled access, multi-point coordination, and degraded communications during an incident. For each scenario, defender time is decomposed into measurable components: detection latency, alarm validation and fusion time, decision and authorization latency, dispatch and mobilization time, travel time, and engagement time. In parallel, operational conditions are treated as state variables, including surge tempo, staffing posture, concurrent events, and communications reliability. The analysis uses time-budget logic to relate these components to sufficiency as a time-conditioned acceptance requirement: intervention must occur before the adversary reaches the critical element, with an explicit margin that accounts for variability and uncertainty. Evidence strategy is specified a priori through instrumented timed drills, log-based measurement across SOC and dispatch systems, stress tests for overload and degraded communications, and simulation or hybrid evidence for rare multi-event conditions.

The key argument is that operational latency is not a secondary implementation detail but a system-level vulnerability that emerges at interfaces between subsystems. Airfield protection is typically organized as layered security: perimeter

detection, controlled entry, internal patrols, and response forces. Yet a layered architecture does not automatically create a usable time reserve. Delay elements create theoretical time, but only the information-and-control chain can convert that time into effective intervention. In practice, the greatest contributors to time loss are often located after the first alarm and before dispatch: validation, fusion of ambiguous signals, decision authorization within hierarchical command structures, and communications delivery under degraded conditions. These sources of delay are frequently invisible in traditional acceptance because they are treated as procedural or human factors rather than as measurable design constraints.

Airfields amplify this problem through operational noise. Legitimate movement patterns generate frequent alarms and anomalies that resemble hostile preparation. Under surge operations, alarm volume increases and operators experience queueing effects: when alert arrival rate approaches or exceeds processing capacity, validation time grows nonlinearly and prioritization becomes unstable. In such regimes, even correct detection may not lead to timely action. Moreover, adversaries can exploit this by using diversionary actions to saturate attention and resources, effectively increasing defender latency for the main event. This creates a specific failure mode: the system is present and active, but the defender chain is “late” at the decisive point. Traditional compliance cannot reveal this because it does not test the system under realistic concurrency and workload.

To address this, the thesis proposes treating operational latency as an engineered variable with explicit acceptance targets. The first step is to define critical elements and time-to-impact windows for airfield-specific assets: aircraft on apron, fuel nodes, ammunition handling, ATC and command nodes, and power/communications infrastructure. The second step is to bind latency components to these windows through scenario-conditioned time budgets. The thesis emphasizes that acceptance must focus on the end-to-end time to effective intervention, but also must be decomposable so that failures can be attributed to specific stages. Without decomposition, acceptance results are not actionable. With decomposition, bottlenecks can be isolated: excessive validation time due to false-alarm load, decision delays due to authorization hierarchy, dispatch delays due to resource contention, travel delays due to route constraints, or engagement delays due to insufficient coordination.

A practical acceptance approach is therefore built around a minimal metric set that is both measurable and directly tied to sufficiency. Core metrics include time from first indication to validated event status, time from validation to decision authorization, time from decision to dispatch, communications delivery success and latency, and total time to intervention. Workload indicators such as queue length and alert rate are treated as acceptance-relevant because they explain whether latency will remain bounded under surge conditions. Degraded-mode acceptance is critical for airfields because communications reliability is not guaranteed during crises; the thesis argues that degraded communications should be tested explicitly, since even small increases in message delivery latency can cascade into repeated validation cycles and delayed dispatch.

Evidence must be scenario-appropriate. Instrumented drills can measure dispatch and travel times with high fidelity, but they must be designed to include validation and decision steps rather than starting from an already-confirmed event. Log-based measurement is necessary to prove that performance holds under routine and surge operations, not only under staged exercises. Stress tests with alarm injection are required to reveal queue instability and prioritization failure under overload. Simulation is useful for exploring rare concurrency combinations, but only when calibrated against measured service times and validated using real operational logs. The thesis treats evidence mapping as part of acceptance design, ensuring that each latency target has a credible verification pathway.

Finally, the analysis yields actionable recommendations for reducing operational latency without creating new vulnerabilities. These include streamlined validation workflows for high-consequence zones, pre-authorized escalation rules for predefined threat patterns, redundancy and prioritization in communications channels, and governance mechanisms for surge-mode operations when workload exceeds thresholds. Importantly, the thesis emphasizes that speed must be balanced with correctness: reducing latency by suppressing alarms indiscriminately can increase miss probability, while excessive confirmation logic increases time loss. Therefore, acceptance must include both timeliness and quality indicators, ensuring that the system remains fast enough to intervene and accurate enough to avoid systematic misprioritization.

Results and conclusions

The thesis establishes operational latency as a measurable, scenario-conditioned vulnerability factor in airfield protection systems and proposes an acceptance framework that exposes and controls this factor. The analysis supports the hypothesis that “compliant but insufficient” outcomes are primarily driven by cumulative delays at the information-and-control interfaces, especially validation, decision authorization, and communications under overload and degradation, rather than by the absence of physical measures alone. The practical significance is that the proposed acceptance approach enables facilities to define measurable latency targets, test them under multi-event stress regimes, and trace failures to specific bottlenecks that can be corrected through process design, staffing posture, communications resilience, and response governance. This strengthens the defensibility of acceptance decisions, improves modernization prioritization, and enhances resilience of airfields and airbases to time-compressed, concurrent threat conditions.

References

1. Hashimov, E. et al. (2026). *Research* of the efficiency multiservice networks using MIMO technology. *Advanced Information Systems*, *10*(1), 66-71.

2. Elshan, H. et al. (2026). *Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities*. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

3. Akhundov, R. et al. (2026). Methodological limitations of normative design of physical protection systems for critical and military facilities in a dynamic threat environment // *International scientific journal «Grail of Science»*. 2026. № 62. С. 873–889.

4. Akhundov, R. et al. (2026). *Conceptual models of multi-level physical protection systems for special-purpose and critical infrastructure facilities*. Grail of Science, (61), 591–608. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.066

5.Suleymanov, J. F., et al. Modern approaches to technical safety in oil and gas pipelines. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 4: sections 6. p.40

6.Ismayilov, N. E., et al. Ensuring the integrity and safety of pipeline infrastructure. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Proceedings of 15-th International Scientific and Technical Conference Volume 4: sections 6. - Baku – Kharkiv – Žilina, april 24 – 25, 2025. -pp.41

7. Akhundov, R., Hashimov, E. G., & Islamov, I. (2026). *Adaptive modeling of multi-layer protection systems under time-constrained threat scenarios*. Grail of Science, (63), 410–422. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.18.03.2026.072

8. İsmayil, İsmayil (2025). Security and protection of Azerbaijan's oil and gas pipelines: cybersecurity and risk management approaches. *Матеріали конференцій МЦНД*, (11.07.2025; Львів, Україна), 136–144.

9. Akhundov, R., Hashimov, E. G., & Islamov, I. (2026). Methodological framework for adaptive risk-based zoning in multi-layer physical protection systems. Grail of Science, (62), 515–526. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.094

10. Akhundov, R., & Hashimov, E. (2026). *Enhancing the physical protection of critical facilities through the integration of physical process models and machine learning*. Grail of Science, (61), 722–731. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.01.2026.083

11. Hashimov, E., Akhundov, R., Talibov, A., & Islamov, I. (2026). Decision support for physical protection systems using route-level metrics and simulation-based evaluation. *Grail of Science*, (63), 531–542. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.06.03.2026.059

12. Akhundov, R., Hashimov, E. G., & Islamov, I. (2026). Scenario oriented sufficiency criteria for physical *protection* systems provide a traceable path from threat classes to design requirements. *International Scientific Journal «Grail of Science»*, (63), 687–699. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.06.03.2026.074

EPIGENETIC REGULATION OF THE HPA AXIS IN THE DEVELOPMENT OF POSTTRAUMATIC STRESS DISORDER UNDER MILITARY STRESS CONDITIONS

Rustamli B.P.
Military Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) is a relatively late addition to the diagnostic nomenclature and has been officially classified since 1980 [1]. Unlike other long-term mental illnesses such as schizophrenia and bipolar disorder, PTSD is primarily triggered by exposure to traumatic events. Military service and combat environments are among the highest risk factors in this regard [1].

Stressors in military settings are long-term, intense, and repetitive. Due to these characteristics, they differ from traumatic events observed in civilian life and affect biological mechanisms in addition to the psychological system [2]. Molecular and epigenetic studies conducted in recent years have shown that the main mechanisms

of individual susceptibility to traumatic stress are associated with long-term changes in gene expression [2].

According to modern approaches, PTSD is considered a complex disorder and is formed as a result of the interaction of genetic predisposition and environmental factors [3]. The fact that PTSD develops in only a portion of military personnel exposed to the same traumatic conditions indicates the existence of individual susceptibility mechanisms. DNA methylation and histone modifications play an important role in the long-term changes in stress adaptation mechanisms. These epigenetic changes may affect the consolidation of traumatic memory and the formation of persistence of emotional responses [4].

The main aim of this study is to investigate the role of epigenetic changes in genes associated with the Hypothalamic-Pituitary-Adrenal (HPA) axis in the development of post-traumatic stress disorder under military stress conditions and to evaluate these changes as potential biomarkers. In particular, the effect of functional changes in the HPA axis on stress adaptation processes and the formation of emotional memory was evaluated [5].

The Hypothalamic-Pituitary-Adrenal (HPA) axis is the main neuroendocrine system that regulates the body's biological response to stress. During stress, the secretion of corticotropin-releasing hormone (CRH) increases from the hypothalamus, which stimulates the secretion of adrenocorticotropic hormone (ACTH) in the anterior pituitary [6]. Under the influence of ACTH, cortisol is synthesized in the adrenal glands. During short-term stress, cortisol ensures the adaptation of the body and regulates energy balance. In addition, cortisol also affects neuronal plasticity and emotional memory processes in brain structures such as the hippocampus and amygdala [7].

In military conditions, the prolonged and repetitive nature of stress can lead to a disruption of the functional balance of the HPA axis. In a combat environment, the constant threat, high responsibility, and uncertainty lead to the prolonged activation of this system [6].

Under normal physiological conditions, an increase in cortisol levels reduces hormone secretion at the hypothalamus and pituitary levels through a negative feedback mechanism.

However, during chronic military stress, this regulatory mechanism weakens and the activity of the HPA axis becomes persistent [7].

As a result, the imbalance in cortisol levels is accompanied by pathological strengthening of emotional memory, increased fear reactions, and hypersensitivity to traumatic stimuli. These changes can lead to stronger consolidation of traumatic events in military personnel and an increase in the persistence of PTSD symptoms.

The effect of long-term military stress is manifested not only at the hormonal level, but also in the regulation of gene expression. Epigenetic modifications of genes associated with the HPA axis led to long-term changes in stress response mechanisms. In particular, changes in the methylation level of glucocorticoid receptor genes can lead to reduced sensitivity to cortisol and inadequate stress response [7]. These epigenetic changes play an important role in the formation of

individual sensitivity and psychological resistance in military personnel. Therefore, epigenetic markers associated with the HPA axis can be evaluated as promising biomarkers for early prediction of PTSD risk and development of personalized treatment strategies. Repeated traumatic events in military service and combat conditions can change the functional properties of the HPA axis in a long-term manner.

These changes lead to strong consolidation of traumatic memories, increased hyperreactivity to stress, and an increased risk of developing PTSD [8].

Thus, genetic and epigenetic regulation of the HPA axis is considered one of the main components of the mechanisms of adaptation to traumatic stress and individual susceptibility in the military environment. In future studies, longitudinal monitoring of epigenetic changes in military personnel and the creation of individual susceptibility models may allow the development of new approaches in the prevention of PTSD.

References

1. Wampold, B. E., Imel, Z. E., Laska, K. M., Benish, S., Miller, S. D., Flückiger, C., Del Re, A. C., Baardseth, T. P., & Budge, S. (2010). Determining what works in the treatment of PTSD. *Clinical Psychology Review, 30*(8), 923–933. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2010.06.005

2. Creamer, M., Wade, D., Fletcher, S., & Forbes, D. (2011). PTSD among military personnel. *International Review of Psychiatry, 23*(2), 160–165. https://doi.org/10.3109/09540261.2011.559456

3. Mehta, D., & Binder, E. B. (2012). *Gene × environment vulnerability factors for PTSD: The HPA-axis*. Neuropharmacology, 62(2), 654–662. https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2011.03.010

4. Broekman, B. F. P., Olff, M., & Boer, F. (2007). The genetic background to PTSD. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 31*(3), 348–362. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.001

5. Dunlop, B. W., & Wong, A. (2019). The hypothalamic–pituitary–adrenal axis in PTSD: Pathophysiology and treatment interventions. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry, 89*, 361–379. https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.010

6. Klaassens, E. R., Giltay, E. J., Cuijpers, P., van Veen, T., & Zitman, F. G. (2012). Adulthood trauma and HPA-axis functioning in healthy subjects and PTSD patients: A meta-analysis. *Psychoneuroendocrinology, 37*(3), 317–331. https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.07.003

7. Lehrner, A., Daskalakis, N. P., & Yehuda, R. (2016). Cortisol and the hypothalamic–pituitary–adrenal axis in PTSD. In J. Shiromani, T. Keane, & J. LeDoux (Eds.), *posttraumatic stress disorder* (pp. xx–xx). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118356142.ch11

8. Gates, M. A., Holowka, D. W., Vasterling, J. J., Keane, T. M., Marx, B. P., & Rosen, R. C. (2012). Posttraumatic stress disorder in veterans and military personnel: Epidemiology, screening, and case recognition. *Psychological Services, 9*(4), 361–382.

THE IMPACT OF CONTEMPORARY TECHNOLOGICAL INNOVATIONS ON ENHANCING THE EFFECTIVENESS OF ARTILLERY SYSTEMS

Huseynov Ya.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

The nature of modern combat operations has fundamentally changed due to the rapid development of information technologies and digital systems [1]. Traditionally, artillery has served as the primary firepower of ground forces, but its effectiveness for a long time relied mainly on mechanical calculations and human factors. However, in the 21st century, the widespread application of technological innovations has significantly expanded the functional capabilities of artillery systems [2].

In particular, the implementation of digital fire control systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), and artificial intelligence (AI)-based decision support mechanisms has enhanced the operational efficiency and accuracy of artillery [4]. In this context, modern artillery is now characterized not only by its firepower but also by the integration of advanced technological management systems.

The development of modern artillery systems is marked by a comprehensive technological transformation encompassing reconnaissance, decision-making, and strike execution [2].

The introduction of digital fire control systems has brought revolutionary changes to artillery, automating ballistic calculations and minimizing human error [5].

As a result, the execution time of fire missions is significantly reduced, while accuracy is substantially improved.

The integration of UAVs into artillery systems has created qualitatively new capabilities in reconnaissance and target designation [6]. Data obtained in real time through UAVs is rapidly transmitted to artillery units, increasing the effectiveness of fire. This plays a crucial role in shortening the "sensor-to-shooter" cycle [7].

Another important aspect is the use of precision-guided munitions. Guided shells and GPS/laser-guided systems allow for the destruction of targets with minimal deviation [8]. This ensures more efficient use of resources at both tactical and strategic levels.

The application of artificial intelligence in the military can be considered the beginning of a new phase in artillery management [3]. AI-based systems analyze large volumes of data to support optimal decision-making, performing functions such as target prioritization, risk assessment, and selection of firing positions.

Automated combat management systems also significantly enhance the coordination of artillery units [4].

These systems accelerate information exchange between units and ensure the synchronized execution of operations, thereby improving overall combat effectiveness.

Furthermore, automation reduces dependency on human factors and increases objectivity in the decision-making process [4], which is critical in modern combat environments.

The application of modern technologies directly affects the performance indicators of artillery systems [2]. First and foremost, firing accuracy is substantially improved.

The use of digital systems and precision-guided munitions minimizes the probability of target deviation.

The second key indicator is reaction speed. With UAVs and automated control systems, the time from target detection to destruction is sharply reduced [7], providing a significant advantage in combat situations.

Additionally, resource efficiency is enhanced. High accuracy allows for greater results with fewer munitions [8], reducing logistical burdens and increasing operational sustainability.

Finally, modern artillery systems exhibit higher adaptability. Technological integration enables faster and more effective adaptation to changing combat conditions.

Despite these advancements, certain challenges remain. Cybersecurity issues are of particular concern, as the widespread use of digital systems makes them vulnerable to cyberattacks [9]. Another significant challenge is the cost of high technologies.

The development and deployment of modern artillery systems require substantial financial resources, as well as highly trained personnel to ensure their effective use.

Future prospects are largely associated with the development of autonomous systems [3, 10-15].

Broader application of AI and the integration of multi-domain combat systems will further enhance the role of artillery.

Analysis indicates that modern technological innovations play a decisive role in increasing the effectiveness of artillery systems. The integration of digitalization, AI, and UAVs has transformed artillery into a more accurate, responsive, and flexible combat tool [16-24].

In conclusion, technological superiority serves as a key factor in the development of artillery systems for modern militaries, indicating that the application of innovative technologies will continue to expand in the future.

References

1. Singer, P.W., Brooking, E.T.: LikeWar: The Weaponization of Social Media. Houghton Mifflin Harcourt (2018)

2. Freedberg, S.J.: The Future of Artillery: Precision & Networks. Breaking Defense (2020). https://breakingdefense.com/

3. Russell, S., Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th edn. Pearson (2021)

4. NATO: Joint Fire Support Doctrine (AJP-3.3.2). NATO Standardization Office (2019). https://www.nato.int/

5. U.S. Department of the Army: Field Artillery Operations and Fire Support (FM 3-09). (2020)

6. Hashimov E., Sabziev E., Huseynov B. Targeting a rocket at a moving object using unmanned aerial vehicals (UAVs) //Journal of defense resources management. – 2023. – Т. 14. – №. 2.

7. Boulanin, V., Verbruggen, M.: Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems. SIPRI (2017). https://sipri.org/

8. Congressional Research Service: Precision-Guided Munitions: Background and Issues (2021). https://crsreports.congress.gov/

9. ENISA: Cybersecurity in the Defence Sector (2021). https://www.enisa.europa.eu/

10. Maharramov, R. et al. (2025). Application of C4ISR systems in military and security operations. *Матеріали конференцій МЦНД*, (15.08.2025; Харків, Україна), 125–134.

11. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

12. Bayramov A.A. et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

13. Hashimov E. G., Maharramov R. R. Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles //Проблеми інформатизації. Тези доповідей. – Т. 9. – С. 18-19.

14. Hashimov E.G. Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method //National Security and Military Sciences. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-132.

15. Hashimov E., Sabziev E., Muradov S. Development prospects and mathematical solution methods for integrating beacon systems into UAVs //Reliability: Theory & Applications. – 2025. – Т. 20. – №. SI 7 (83). – С. 66-73.

16. Bayramov A., Hashimov E. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

17. Garayev M.F. Analysis of the possibilities of the photogrammetry method in object detection. *In* Проблеми інформатизації. 2024. Т.2. с. 6.

18. Hashimov E. et al. Determination of coordinates of targets from unmanned aerial vehicles //Journal of Defense Resources Management. 2022. Т.13. №.2. С.107-112.

19. Bayramov A.A., et al. The supervisory control systems deployment in mountainous terrain //VIII Int. Conf.“Modern development trends of ICT and control methods. 2018. 3-4.

20. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв’язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

21. Bayramov A.A. Application SMART for small unmanned aircraft system of systems //Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2020. – С. 193-213.

22. Dergachov K. et al. Adaptive algorithm for visual positioning of UAVs in the local environment // Proceedings of the International Workshop on Computational Methods in Systems Engineering (CMSE 2025) Kyiv, Ukraine, June 12, 2025.

23. Hashimov E. Q., Talibov A. M., Gasanov A. G. Mathematical modeling of military systems. Lesson and routine //Baku: Military Publishing House. – 2018.

24. Piriyev H. K. The Second Karabakh War: military-political and military-technical aspects //Scientific Works. – 2023. – Т. 1. – №. 21. – С. 7-16.

THE INTELLIGENCE–LOGISTICS INTERFACE: A CRITICAL DIMENSION OF MILITARY EFFECTIVENESS

Tahirov R., Hasanov H.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Preparing for a potential armed conflict requires not only assessing the adversary's motives and strengths but also ensuring that logistics capabilities match operational needs determined by intelligence. Successful strategic decisions depend on the seamless integration of timely and accurate information into the planning, allocation, and maintenance of resources. In this scenario, the quality of military decisions is closely linked to both the reliability of intelligence and the effectiveness and capability of logistics systems, highlighting the importance of intelligence-logistics collaboration as a critical element for achieving military success.

According to Giangiuseppe Pili, Associate Professor in the Intelligence Analysis Program at James Madison University: *"Intelligence is the aggregate of functions, activities, and organizations involved in the planning, collection (investigation), processing, and dissemination of information of significance to national security"* [1]. Michael Herman, an expert in intelligence and author of Intelligence Power in Peace and War, argues that intelligence is primarily intended to reduce uncertainty for political leaders by providing structured knowledge about adversaries, opportunities, and risks. Its main role is not to prescribe immediate or short-term decisions but rather to gradually enhance decision-makers' understanding of both internal and external environments [2]. Similarly, Milton Diaz, an intelligence expert who served as an officer at the U.S. Defense Intelligence Agency, defines intelligence as "any process that generates knowledge for the purpose of decision-making" [3]. Sherman Kent, another seminal figure in the field and a pioneer of intelligence analysis, characterized intelligence as *"the body of knowledge that high-level civilian and military leaders should possess to ensure the welfare of the nation"* [4]. Collectively, these definitions present intelligence not merely as a mechanism for producing political recommendations, but as an epistemological practice integrated into decision-making processes. The primary function of intelligence is to shape how decision-makers perceive, interpret, and assess the strategic environment, thereby contributing over time to the reduction of existing uncertainty. Accurate and timely intelligence enables leaders to anticipate adversaries' intentions and capabilities, assess potential threats, and determine whether conflict can be avoided or must be confronted. The quality of strategic decisions is therefore closely tied to both the reliability of the intelligence collected and the rigor of its analysis and interpretation. In this context, intelligence functions as the foundational element upon which operational planning and resource allocation are based, shaping not only immediate tactical choices but also long-term strategic outcomes.

Another critical consideration during the preparation and planning stages of war is the establishment of a robust logistics system capable of sustaining long-term military operations. Only through an effective logistics existing resources and capabilities can be transformed into tangible operational effectiveness. Research and historical experience demonstrate that the ability to mobilize economic and financial

resources, organize and sustain national mobilization, ensure the security and continuity of supply chains during conflict, and manage scarce and critical assets—such as information systems, fuel, transportation infrastructure, and skilled personnel—directly influences both the tempo and the outcome of military operations. There are multiple definitions of logistics, most of which associate it with the management of material and information flows [5, p. 7]. These definitions typically emphasize the coordination and integration of activities necessary to ensure the efficient movement of resources within supply chain processes. To better understand the conceptual essence and theoretical foundations of logistics, this section examines definitions from both military and general contexts.

According to the definition presented in the article "The Evolution of Military Logistics", from a military perspective, logistics is understood as a field of activity aimed at ensuring the availability of the necessary resources to sustain the continuous operation of forces, leveraging existing technological capabilities and means, and delivering them at the required time and place. This field encompasses the systematic study, planning, management, and execution of support processes [6]. Similarly, a comparative literature review in the article "Comparative Analysis of Definitions in Logistics: General and Subcategory Definitions" provides a contemporary definition that enhances understanding of modern logistics. According to this definition, logistics constitutes a complex field encompassing processes such as production, procurement, transportation, warehousing, loading and unloading, processing, packaging, recycling, distribution, control, data processing, and traceability [7]. As these definitions illustrate, logistics should not be understood merely as a collection of discrete support functions. Rather, it represents a unified field of activity that systematically integrates production, supply, and distribution processes across the full lifecycle of material and information flows, emphasizing its strategic coordination function. From the perspective of military planning and execution, logistics constitutes the continuous provision of personnel, resources, equipment, weapons, food, and ammunition necessary to sustain and enhance combat power. To ensure the uninterrupted execution of these functions, it is essential to maintain or develop nationwide infrastructure, transportation and mobility capabilities, production capacity.

In conventional linear planning approaches, intelligence and logistics are addressed independently, often depicting intelligence as a preliminary step that defines the operational context, followed by logistical planning to facilitate the operation's execution. Another critical weakness of the linear model is the absence of a systematic feedback mechanism. Changes in the operational landscape during the war can significantly influence intelligence, logistics requirements and collection priorities. When intelligence and logistics are treated as separate or insufficiently coordinated functions, particularly during the preparation and execution phases of military operations, the probability of failure increases significantly. Over time, under the influence of what Carl von Clausewitz described as the "fog of war," such misalignment may deepen, reducing both the flexibility and precision of military operations. Historical examples such as Napoleon's 1812 Russian Campaign,

Operation Barbarossa in 1941, and Operation Market-Garden in 1944 demonstrate that misalignment or inadequate synchronization between intelligence and logistics can produce catastrophic operational consequences, highlighting the enduring importance of their integration in military effectiveness.

Taking into account the limitations identified in linear planning models, the feedback-based Intelligence–Logistics Interaction Model (Fig. 1) is proposed.

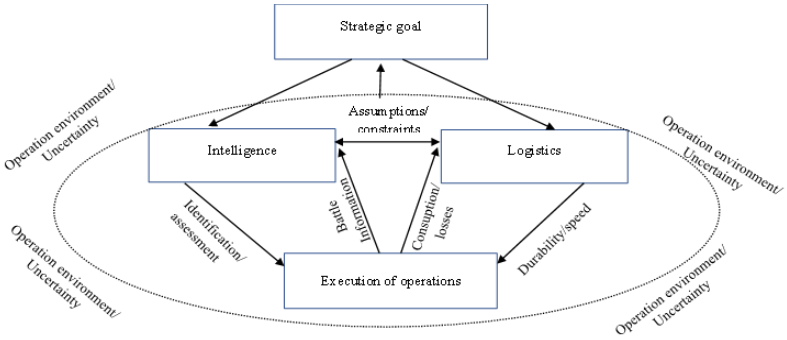


Figure 1. Intelligence–Logistics Interaction Model

The proposed framework conceptualizes the relationship between intelligence and logistics as a dynamic and iterative process. Within this model, intelligence assessments initially inform logistical planning, while logistical constraints simultaneously reshape intelligence priorities and collection efforts. Operational outcomes, in turn, generate continuous feedback that influences both intelligence assessments and logistical planning, creating a reciprocal cycle of adjustment and learning. The model highlights the critical dimensions of the intelligence–logistics interaction. If intelligence assessments are not continuously aligned with existing logistical capabilities during operational planning, the planned courses of action become non-adaptive and less reliable. Changes in logistical capacity during the course of an operation can significantly influence intelligence requirements and collection priorities. For instance, if logistical analysis indicates that only 500,000 artillery rounds remain available, intelligence efforts may shift toward identifying the most critical and vulnerable enemy targets in order to maximize the operational impact of the remaining resources. Conversely, when logistical planning is conducted without continuous feedback from real-time intelligence, particularly in rapidly evolving operational environments, delays and disruptions in resource allocation are likely to occur. When logistics fails to deliver the required resources in a timely manner, even the most accurate intelligence cannot guarantee operational success.

Ultimately, operational success depends on the effective integration of accurate intelligence assessments with reliable logistical capabilities. The uncertainty inherent in the operational environment can be mitigated when intelligence and logistics are continuously and proportionally adjusted in response to changing conditions, thereby enhancing the overall coherence and effectiveness of military operations.

References

1. Pili, G. Toward a philosophical definition of intelligence // - Philadelphia, PA: The International Journal of Intelligence, Security, and Public Affairs, – 2019. – T. 21. – №. 2, – P. 162-190;

2. Chappuis, F. The Place of Intelligence in the State's Monopoly on the Legitimate Use of Force: [Electronic resource]/ Friedrich-Ebert-Stiftung, Global Policy and Development. – 2016. URL: https://collections.fes.de/publikationen/ident/fes/12968;

3. Falode, A. Found: A defınıtıon of ıntellıgence: [Electronic resource]/ Journal of Social Sciences IV(1):70-73. –2021. https://www.researchgate.net/publication/350456288;

4. Holeındre, J., Oudet, B. Intellıgence studıes ın France: [Electronic resource]/ Institut de recherche stratégique de l'École militaire. – November 27, 2018. URL: https://www.irsem.fr/storage/file_manager_files/2025/03/rp-irsem-67.pdf;

5. Həmidova A.M. Logistikanın əsasları. (Dərs vəsaiti). Bakı: "ZƏNGƏZURDA" Çap Evi, 2025, – 196 səh;

6. Serrano, A., Kalenatic, D., López, C., Montoya-Torres, J,R. Evolution of Military Logistics : [Electronic resource]/ Logistics, 7(2), 22. – April 5, 2023. URL: https://www.mdpi.com/2305-6290/7/2/22?utm_source;

7. Kukovič, D., Topolšek, D., Rosi, B., & Jereb, B. A comparative literature analysis of definitions for logistics: between general definition and definitions of subcategories: [Electronic resource]/ 14th International Scientific Conference - Osijek, Croatia, Business Logistics in Modern Management. – 2014. URL: https://scispace.com/pdf/a-comparative-literature-analysis-of-definitions-for-53dn51i0gg.pdf;

THE PERSPEKTIVES OF APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MILITARY FIELD

Gasanov A.G., Abdullayeva A.
Military Scientific Research Institute, National Defense University,
Baku, Azerbaijan

Artificial intelligence is considered a key technological factor radically changing the strategic environment of military operations in the 21st century. The application of AI significantly improves the speed of battlefield decision-making, the accuracy of intelligence, the reduction of human casualties, and the effectiveness of modern weapons systems. This article provides an overview of research on artificial intelligence, machine learning, and deep learning, statistical indicators of the application of artificial intelligence in the military, the capabilities and future prospects of applying artificial intelligence in the military, and weapons systems created based on artificial intelligence in foreign countries. Thus, the integration of artificial intelligence into military operations opens significant opportunities for improving operational effectiveness, decision-making, and technological superiority. It plays a significant role in enhancing functions such as autonomous operations, command and control, logistics, and threat detection, mitigating human risks, and increasing efficiency. It will play a significant role in shaping future military strategies, necessitating the assessment and adaptation to new developments and challenges. It improves military effectiveness, accelerates decision-making, reduces risks, and

accelerates armament, and therefore, future development must be balanced. Artificial intelligence has fundamentally changed the nature of modern warfare, enabling precision, speed, and information superiority in military operations. Therefore, international cooperation is crucial to managing global security risks.

References

1. Tajammul Pangarkar. Artificial Intelligence in Military Statistics and Facts.: [Electronic resource] /New York, URL: https://scoop.market.us/artificial-intelligence-in-military-statistics/, 2025.

2. P.K. Mallick. Artificial intelligence in armed forces: an analysis. New Delhi, CLAWS Journal, Vol. 11 No. 2 (2018): Winter 2018, pp. 63-79.

3. Balayev F.R et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.102-103

4. Elsa B. Kania. Artificial intelligence in China's revolution in military affairs. Journal of Strategic Studies, 2021, 28 p., https://doi.org/10.1080/01402390.2021.1894136.

5. Dergachov K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.75-78

6. Bayramov A.A. The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition. *Advanced Information Systems* 2017. 1(2), 70–73. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.12

7. Jahangirov V.A., et al. Mathematical modeling of tactical operations. *In* Problems of informatization. Proceedings of 12-th International Scientific and Technical Conference. 2024. Vol. 2. p.15.

8. Aliyev K. Cyberspace as a Fifth Domain of Military Operations //9th Int. Scientific and Technical Conference "Problems of Informatization", Ukraine. – 2021. – С. 104-105.

9. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

10. Hasanov A., Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy stor //Modeling, control and information Technologies. – 2023.

11. Ibrahimov B. G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. – 2023.

12. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

13. Gasanov A. G. Solving problems of mathematical modeling of military systems //Textbook. Baku: Military Publishing House. – 2018.

14. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment //14th international conference science and technology Conf., 25-26 April 2024, Baku–Kharkiv–Zhilina. – 2024. – С. 47-48.

15. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Effective application of telemetry systems in unmanned aerial vehicles //Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April. – 2024. – С. 25-26.

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE AZERBAIJAN ARMY

Gasanov A.G., Abdullayeva A.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Ensuring the technological superiority of the Armed Forces is one of the priority directions in the strategy of the national security of the Republic of Azerbaijan. In the modern combat environment, fast data processing and flexible decision-making capabilities require the application of artificial intelligence technologies in the military sphere.

The article examines the possibilities, levels of application and prospects of artificial intelligence in the decision-making process in the ground forces of Azerbaijan and concludes the strategic importance of using AI-based decision-making systems at the tactical and operational levels to increase combat capability.

It is known that modern naval operations take place in a complex information environment and, therefore, require quick and accurate decisions by the commander. In the VMF, opportunities for the application of artificial intelligence, increased situational awareness, decision support systems, control of unmanned aerial vehicles and optimization of resources are needed.

AI can be used as a strategic tool to improve operational efficiency and safety in the VMF.

Also, the perspectives of applying artificial intelligence-based decision support systems in the Air Force and potential areas of artificial intelligence application in decision-making processes are analyzed. It is necessary to use artificial intelligence in the areas of operational planning, control of unmanned aerial vehicles, modeling and risk analysis.

At the same time, the importance of AI, ethical issues and security issues, as well as its prospects in the context of the national strategy of Azerbaijan, were considered.

References

1. Azərbaycan Respublikasının milli təhlükəsizlik konsepsiyası.: [Elektron resurs] / URL: https://e-qanun.az/framework/13373 , Bakı, 2007,

2. Esmira Cəfərova, Vasif Hüseynov, Orxan Bağırov, Şahmar Hacıyev, Roza Əsgərova. 44 günlük qarabağ müharibəsi: mülahizə və nəticələr.: [Elektron resurs] / Bakı, URL: https://www.aircenter.az/uploads/files/44-Gunluk%20QM_az.pdfş, 2021, 36s.

3. Günel Fərzəliyeva. Süni intellekt artıq qərarvermə mərhələsinə keçir – bu, insan faktorunu zəiflədir, yoxsa daha effektiv edir?.: [Elektron resurs] / Bakı, URL: https://sia.az/az/news/social/1308264.html

4. Barkhudarov R., Hashimov E.G., Talibov A.M. Artificial intelligence and autonomous weapons systems. National security and military sciences, – Baku: – 2021. No. 2(7), – pp. 7-14.

5. Dergachov K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.75-78

6. Valehov S.A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

7. Bayramov A.A. The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition. *Advanced Information Systems* 2017. 1(2), 70–73. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.12

8. Jahangirov V.A., et al. Mathematical modeling of tactical operations. *In* Problems of informatization. Proceedings of 12-th International Scientific and Technical Conference. 2024. Vol. 2. p.15.

9. Aliyev K. Cyberspace as a Fifth Domain of Military Operations //9th International Scientific and Technical Conference "Problems of Informatization", Ukraine. – 2021. – С. 104-105.

10. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

11. Hashimov E. G. Destruction of enemy combat power in indeterminacy condition // Proc. of Vth International Scientific Technical conference "Modern development directions of data communication technology and control means. – 2015. – С. 23-24.

12. Hasanov A., Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy stor //Modeling, control and information Technologies. – 2023.

13. Ibrahimov B. G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. – 2023.

14. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

15. Bayramov A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. 2016. Т. 4. №. 2. С. 61-66.

16. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.

17. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

18. Ahmadov A. I. et al. Calculation of the Energy of the Interelectron Interaction in Molecules in a Basis of Slater Functions //Russian Physics Journal. – 2019. – Т. 61. – №. 10. – С. 1848-1854.

19. Gasanov A. G. Solving problems of mathematical modeling of military systems //Textbook. Baku: Military Publishing House. – 2018.

20. Rustamov A. R., et al. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment //14th international conference science and technology Conf., 25-26 April 2024, Baku–Kharkiv–Zhilina. – 2024. – С. 47-48.

21. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Effective application of telemetry systems in unmanned aerial vehicles //Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April. – 2024. – С. 25-26.

APLICANION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE MILITARY FIELD

Gasanov A.G., Abdullayeva A., Rustamli B.P.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

Artificial neural networks (ANNs) play an important role in modern military technologies as one of the main directions of artificial intelligence. Inspired by the principles of human brain processing, these technologies are used to analyze large volumes of data, recognize patterns and automate decision-making processes. In the military, ANNs are mainly applied in intelligence, surveillance, security logistics and decision support systems.

ANNs show high efficiency in areas such as processing images obtained from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs), object recognition and risk prediction.

In addition, these technologies are used to detect anomalies in cybersecurity systems and identify potential threats. In logistics and resource management, neural networks are used to improve optimization and planning processes. At the same time, the military application of ANNs gives rise to ethical, legal and security discussions.

The use of automated decision-making systems without human control can create potential risks.

Therefore, a responsible approach and compliance with international norms are of paramount importance. In conclusion, although artificial neural networks create technological advantages in the military field, their use must be carried out within a balanced, controlled and ethical framework.

References

1. Mallick, P. K. (2018). Artificial intelligence in armed forces: An analysis. CLAWS Journal, 11(2), 63–79.

2. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

3. Dergachov K. et al. AI based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.75-78

4. Valehov S.A. et al. AI-based efficiency model in university governance. *In* Problems of informatization. Proceedings of Thirteenth International Scientific and Technical Conference. 2025. Vol. 1., section 1,2. p.26-28.

5. Bayramov A.A. The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition. *Advanced Information Systems* 2017. 1(2), 70–73. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.12

6. Jahangirov V.A., et al. Mathematical modeling of tactical operations. *In* Problems of informatization. Proceedings of 12-th International Scientific and Technical Conference. 2024. Vol. 2. p.15.

7. Aliyev K. Cyberspace as a Fifth Domain of Military Operations //9th International Scientific and Technical Conference. *In* Problems of Informatization. 2021. c.104-105.

8. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

9. Hasanov A., Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy stor //Modeling, control and information Technologies. – 2023.

10. Ibrahimov B. G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. – 2023.

11. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

12. Ahmadov A. I. et al. Calculation of the Energy of the Interelectron Interaction in Molecules in a Basis of Slater Functions //Russian Physics Journal. – 2019. – Т. 61. – №. 10. – С. 1848-1854.

13. Gasanov A. G. Solving problems of mathematical modeling of military systems //Textbook. Baku: Military Publishing House. – 2018.

14. Rustamov A. R., et al. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment //14th international conference science and technology Conf., 25-26 April 2024, Baku–Kharkiv–Zhilina. – 2024. – С. 47-48.

15. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Effective application of telemetry systems in unmanned aerial vehicles //Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April. – 2024. – С. 25-26.

16. Aliyev K. Cyberspace as a Fifth Domain of Military Operations //9th International Scientific and Technical Conference "Problems of Informatization", Ukraine. – 2021. – С. 104-105.

17. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

18. Hashimov E. G. Destruction of enemy combat power in indeterminacy condition // Proc. of Vth International Scientific Technical conference "Modern development directions of data communication technology and control means. – 2015. – С. 23-24.

19. Hasanov A., Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy stor //Modeling, control and information Technologies. – 2023.

20. Ibrahimov B. G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. – 2023.

21. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

22. Bayramov A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. 2016. Т. 4. №. 2. С. 61-66.

23. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.

24. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

3D COMBINED BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR THE BIANCHI EQUATION WITH NONSMOOTH COEFFICIENTS AND ITS APPLICATION IN MODERN ROCKET DEVICES

Mamedov I.G.
Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan.
Gasanov A.G., Huseynov A.G., Abdullayeva A.J.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

The motion of a rocket is the principle of motion of bodies of different masses. Of course, during the motion, the rocket consists of several stages, and these stages are divided into parts during the motion. At this time, the energy obtained through chemical reactions is used as fuel for the rocket engine. During the motion of the rocket, vibrations occur, the study of which is also of great importance. Note that these vibrations in nature and technology are adequately described by the Bianchi integro - differential equation. This paper considers a boundary value problem for the Bianchi equation. The problem under consideration is closely related to military radio-technical weapons. There is energy in vibration. In particular, 3D mathematical modeling was used in the work. In addition, the energy of the hull, the rocket launcher in modern military equipment, the manifestation of vibration processes in radio waves are discussed. The paper shows the possibility of creating equipment adapted to individual needs using 3D printing technology. This paper considers a combined boundary value problem for the Bianchi integro - differential equation. The famous physicist and engineer Nikola Tesla said that if we knew three things, we would tame nature: Vibration, energy, particles. At the beginning of the 20th century, the great physicist and Nobel Prize laureate Albert Einstein clarified the above idea and came to the conclusion that, "Everything is energy! That's all!" Let's return to Nikola Tesla's idea, if we are talking about vibration, then we are talking about vibration and therefore there is movement here. A moving object has energy (kinetic). Energy is embedded in vibration. So what is the relationship between energy and particles? Now let's talk about the energy of Nikola Tesla's word particles in nature.

One of the branches of physics that studies elementary particles is Nuclear Physics. Nuclear Physics is the branch that studies the processes occurring inside the nucleus, which is the inexhaustible source of energy that humanity aspires to. There are two types of nuclear reactions, controlled and uncontrolled chain nuclear reactions (cepochnye). Examples of uncontrolled nuclear reactions include atomic bombs and neutron bombs. Examples of controlled nuclear reactions include nuclear reactors. (There is energy here). So, the 3DBianki equation adequately describes vibrational processes. Vibrational processes mainly manifest themselves in radio waves. It is no coincidence that the scientist who invented the radio was neither the Russian scientist Alexander Popov nor Marconi. The US Department of Energy confirms that the inventor of radio before Marconi was Nikola Tesla himself. Therefore, it is no coincidence that the word Bianki, from which the equation is named, is associated with the research of the famous Italian scientists Luigi Bianchi and Oneratta Nicoletti. It was during the time of Nikola Tesla in 1895 that vibrational processes began to be

studied. (3-dimensional mathematical modeling). We know from the laws of physics that "energy is neither lost nor created, it is not converted into anything, it is transformed from one form to another". Where does it go when you type and erase on a computer or smartphone? Of course, it is only converted into energy released from the monitor (We have all seen that the monitor of a computer or phone heats up). The equation below is the 3DBianchi equation describing a blast wave

$$(V_{1,1,1}u)(x,y,z) \equiv u_{xyz}(x,y,z) + \sum_{\substack{i+j+k<3 \\ i,j,k=\overline{0,1}}} A_{i,j,k}(x,y,z) D_x^i D_y^j D_z^k u(x,y,z)) +$$

$$+ \int_{\frac{x_0+x_1}{2}}^{x} \int_{\frac{y_0+y_1}{2}}^{y} \int_{\frac{z_0+z_1}{2}}^{z} \sum_{\substack{i+j+k<3 \\ i,j,k=\overline{0,1}}} K_{i,j,k}(\tau,\xi,\eta\,;x\,,y,z) D_x^i D_y^j D_z^k u(\tau,\xi,\eta) \times d\tau d\xi d\eta$$

$$\times\, d\tau d\xi d\eta = \varphi_{1,1,1}(x,y,z)$$

where $u = u(x,y,z)$ the required function is defined in the domain G; functions $A_{i,j,k}(x,y,z)$ are given measurable functions in the domain $G = G_1 \times G_2 \times G_3$ and functions $K_{i,j,k}(\tau,\xi,\eta\,;x\,,y,z)$ are given measurable bounded functions in $G \times G$ where $G_1 = (x_0, x_1)$, $G_2 = (y_0, y_1)$, $G_3 = (z_0, z_1)$, $z_{1,1,1}(x,y,z) \geq 0$ the given measurable function is in G.

References

1. Mamedov, I., Gasanov, A., Huseynov, A., Abdullayeva, A. (2025). On a four-dimensional combined boundary problem for Bianchi-type hyperbolic equations with non-smooth coefficients. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025, T. 4: section 6, c.42.
2. Abdullaeva, A.J., Huseynov, A.G., Gasanov, A.G., Suleymanov, I.I., Nasirov, E.V. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. T.4: секція 6, c.80-81.
3. Abdullayeva, A. Mamedov, I. Huseynov, A., Gasanov, A. Non-classical boundary value formulation for 4D bianchi-type hyperbolic equations with irregular coefficients. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. T. 1: секції 1, 5, c.24.
4. Mamedov, I., Abdullayeva, A., Gasanov, A., Huseynov, A. A 4D combined boundary problem for loading-type bianchi hyperbolic equations with non-smooth. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. T. 1: секції 1, 5, c.20.
5. Mamedov, I., Gasanov, A., Huseynov, A., Abdullayeva, A. (2025). 3D combined boundary value problem for the bianchi equation and its application in modern rocket devices. Azərbaycan Respublikasının inkişaf strategiyası: potensial imkanlar və yeni çağırışlar adlı konfransın materialları, s.224-230.
6. Abdullaeva, A.J., Huseynov, A.G., Gasanov, A.G., Suleymanov, I.I., Nasirov, E.V. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025, T. 4, section 6, c.80-81.
7. Rüstəmov, Ə., Hüseynov, Ə., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Passiv radiolokasiya sistemində akustooptik qəbuledicilərin tətbiqinin aktual aspektləri. Azərbaycan

Respublikasinin inkişaf strategiyasi: potensial imkanlar və yeni çağırışlar adlı konfrans materialı, s.214-219.

8. İslamov, İ., Axundov, R., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Radioelektron sistemlərin ifrat yüksək tezlikli elektromaqnit şüalanmadan qorunmasi problemləri. Heydər Əliyevin dövlət təhlükəsizliyi siyasəti: tarixi nailiyyətlər və müasir çağırışlar adlı respublika elmi-praktik konfrans, Vol. 2, s.25-29.

9. Abdullayeva, A. Mamedov, I. Huseynov, A., Gasanov, A. Non-classical boundary value formulation for 4D bianchi-type hyperbolic equations with irregular coefficients. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025, T. 1: section 1, 5, c.24.

10. Rüstəmov, Ə., Hüseynov, Ə., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Passiv radiolokasiya sistemində akustooptik qəbuledicilərin tətbiqinin aktual aspektləri. Azərbaycan Respublikasinin inkişaf strategiyasi: potensial imkanlar və yeni çağırışlar adlı konfrans materialı, s. 214-219.

11. İslamov, İ., Axundov, R., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Radioelektron sistemlərin ifrat yüksək tezlikli elektromaqnit şüalanmadan qorunmasi problemləri. Heydər Əliyevin dövlət təhlükəsizliyi siyasəti: tarixi nailiyyətlər və müasir çağırışlar adlı respublika elmi-praktik konfrans, Vol. 2, s.25-29

12. Ibrahimov B. G., & Hashimov E. G. (2025). Special purpose machine learning and data mining methods. *In* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 2: sections 2. -pp.90

13. Ibrahimov B.G. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

14. Arzuman Həsənov, Aynurə Abdullayeva. (2025). Telekommunikasiya qurğularında kütləvi partlayışların baş verməsi səbəblərinin tədqiqi. Bakı, Milli təhlükəsizlik və hərbi elmlər jurnalı, cild 11, № 2, s. 68-78.

15. Ahmadov A. I. et al. Calculation of the Energy of the Interelectron Interaction in Molecules in a Basis of Slater Functions //Russian Physics Journal. – 2019. – Т. 61. – №. 10. – С. 1848-1854.

16. Gasanov A. G. Solving problems of mathematical modeling of military systems //Textbook. Baku: Military Publishing House. – 2018.

17. Rustamov A. R., et al. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment //14th international conference science and technology Conf., 25-26 April 2024, Baku–Kharkiv–Zhilina. – 2024. – С. 47-48.

18. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Effective application of telemetry systems in unmanned aerial vehicles //Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April. – 2024. – С. 25-26.

19. Ibrahimov B.G. et al. Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.10-11

20. Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30

21. Ibrahimov B.G. Research quality of functioning of the efficiency optical telecommunication systems using spectral technologies. *In* Проблеми інформатизації. 2023. Т.1. – С. 29-30.

IDENTIFYING PERSONS WHO VIOLATED THE STATE BORDER BY ARTIFICIAL NEURAL MODEL

Gasanov A.G., Huseynov A.G., Abdullayeva A., Rustamli B.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

In the modern era, ensuring the security of state borders is one of the main directions of national security of countries. The rapid development of technologies has created the opportunity to apply new and more effective methods in the field of border control. For instance, artificial neural models have the ability to analyze large amounts of information and detect complex patterns. These models can identify suspicious actions by processing information obtained from video surveillance cameras, drones, sensor systems and satellite images. Through neural networks, it is possible to recognize a human silhouette, analyze the direction of movement and detect unusual behavior. The study examined the use of an artificial neural model in identifying individuals who violate the state border. For this purpose, scientific studies on shoe and height measurements were investigated and it was determined that there is a relationship between foot measurements and height measurements. An artificial neural model was used to find the relationship between foot measurements and height measurements. The Delta rule was used to determine the weight coefficients in this model. The values of the initial weight coefficients were found by applying the least squares method. The initial input data were used to determine the foot and height measurements of 23 women and 30 men through a survey. As a result, a true relationship between the shoe and height measurements for women and men was found. These results can be used to identify individuals who violate the state border and also commit criminal acts.

References

1. Komlos, J. (1991). Anthropometric history: What is it? Journal of Social and Biological Structures, 14(3), 353–356. https://doi.org/10.1016/0140-1750(91)90006-C

2. Sanli, S. G., Kizilkanat, E. D., Boyan, N., Ozsahin, E. T., Bozkir, M. G., Soames, R., Erol, H., & Oguz, O. (2005). Stature estimation based on hand length and foot length. Clinical Anatomy, 18(8), 589–596.

3. Sen, J., & Ghosh, S. (2008). Estimation of stature from foot length and foot breadth among the Rajbanshi: An indigenous population of North Bengal. Forensic Science International, 181(1–3), e55–e56. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.08.009

4. Ozden, H., Balci, Y., Demirüstü, C., Turgut, A., & Ertugrul, M. (2005). Stature and sex estimate using foot and shoe dimensions. Forensic Science International, 147(2–3), 181–184.

5. Ahmadov A. I. et al. Calculation of the Energy of the Interelectron Interaction in Molecules in a Basis of Slater Functions //Russian Physics Journal. – 2019. – T. 61. – №. 10. – C. 1848-1854.

6. Gasanov A. G. Solving problems of mathematical modeling of military systems //Textbook. Baku: Military Publishing House. – 2018.

7. Rustamov A. R., et al. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment //14th international conference science and technology Conf., 25-26 April 2024, Baku–Kharkiv–Zhilina. – 2024. – C. 47-48.

8. Rustamov A. R., Gasanov A. G., Azizullayev M. G. Effective application of telemetry systems in unmanned aerial vehicles //Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April. – 2024. – С. 25-26.

9. Aliyev K. Cyberspace as a Fifth Domain of Military Operations //9th International Scientific and Technical Conference "Problems of Informatization", Ukraine. – 2021. – С. 104-105.

10. Rustamov A. et al. Analysis of antenna system modeling with the help of simulation technology of navigation equipments //Advanced Information Systems. – 2025. – Т. 9. – №. 2. – С. 36-43.

11. Hashimov E. G. Destruction of enemy combat power in indeterminacy condition // Proc. of Vth International Scientific Technical conference "Modern development directions of data communication technology and control means. – 2015. – С. 23-24.

12. Hasanov A., Hashimov E., Zulfugarov B. Comparative analysis of the efficiency of various energy stor //Modeling, control and information Technologies. – 2023.

13. Ibrahimov B. G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology. – 2023.

14. Hashimov E. G. About one method of navigation task solution //AHMC after H. Aliyev. Scientific Review. – 2013. – Т. 1. – №. 20. – С. 45-49.

15. Bayramov A. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. 2016. Т. 4. №. 2. С. 61-66.

16. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.

17. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

18. Hashimov E. G. et al. Development of the multirotor unmanned aerial vehicle //National security and military sciences. – 2017. – Т. 3. – №. 4. – С. 21-31.

19. Gasanov, A.G. (2018). Solving problems of mathematical modeling of military systems. Textbook. -Baku: Military Publishing House, 120 p.

20. Hashimov E.G, Talibov A. M., Gasanov A. G. Mathematical modeling of military systems. Lesson and routine //Baku: Military Publishing House. – 2018.

RADIO COMMUNICATION FOR THE AUTONOMOUS COMPLEX

Bayramov A.A., Suleymanov S.S.
Republican Seismic Survey Center, Baku, Azerbaijan

The development of autonomous measurement and control systems for remote monitoring of geophysical and environmental parameters requires reliable wireless communication, low-power operation, stable data acquisition, and intelligent analytical support. In this context, the present study addresses the design and functional justification of a GPRS radio communication modem intended for use in an autonomous measurement and control complex based on Artificial Intelligence. The proposed solution is designed to ensure continuous collection, transmission, and processing of heterogeneous monitoring data in conditions where conventional wired communication infrastructure is unavailable or impractical.

The developed hardware and functional architecture is centered on the GSM/GPRS SIM900A communication chip, which supports quad-band GSM networks and enables wireless data transmission, voice communication, SMS exchange, and GPRS-based packet data transfer. The circuit diagram reflects a modular system structure consisting of detector units, an interface unit, a control unit, an Internet channel unit, a unit for receiving data from a seismic center, a unit for obtaining information on the current state of solar activity, an Artificial Intelligence based analysis and decision-making unit, and an autonomous power supply subsystem implemented on solar panels. The detector layer includes a radon radioactive gas detector and magnetometer devices for measuring magnetic field strength in a given observation area, thereby enabling the registration of potentially significant precursor and environmental signals.

Particular attention is given to the communication subsystem, whose stable operation is ensured through protected SIM card interfacing, power supply stabilization, LED-based operating mode indication, and full support of GPRS communication functions. Interaction between the SIM900A module and the external microcontroller is organized through the UART interface, while service management is implemented using standardized AT commands. These commands provide flexible control over calls, SMS services, Internet connectivity, TCP/IP transmission, and auxiliary communication procedures, with command execution confirmed through standard OK or ERROR responses.

The proposed modem architecture is suitable for wide application in remote monitoring systems, distributed data acquisition networks, Internet of Things platforms, and wireless supervisory control systems. The practical significance of the developed solution lies in its ability to integrate intelligent analysis, autonomous energy supply, and robust wireless communication within a unified hardware and software framework. The purpose of the report is to present the results of the development of a GPRS radio communication modem for an autonomous Artificial Intelligence based measurement and control complex.

References

1. Suleymanov S.S., Bayramov A.A., Abdullayev F.N. Study of seismic processes using Aİ technology. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Proceedings of 15-th International Scientific and Technical Conference. Xarkov, 2025. April 24–25, Vol.1: P.47.

2. Bayramov A.A., Suleymanov S.S. GPRS Radio Communication For AI-Based Measurement And Control Complex. Modeling, control and information technologies. 2025. N8, pp. 353-356.

3. Bayramov A. A., Hashimov E. G. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

4. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.

5. Bayramov A. A. et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

6. Bayramov A., Hashimov E. Seismic location station for detection of unobserved moving military machineries //Journal of Management and Information Science. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 61-66.

7. Huseynov M. et al. Integrated application of remote sensing in defense and environmental oversight //Problems of Informatization: Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference. – 2025. – Т. 2. – С. 114-115.

8. Hashimov E. G. et alş Detection of Unobserved Ground Targets by Use of Seismic Location Stations //Advances in Military Technology. – 2019. – Т. 14. – №. 1. – С. 133-139.

9. Kartashov O. S. et al. Hybrid acoustic seismic approach for the identification of moving targets. – 2025.

10. Dergachov K. et al. Aİ based physical and cyber defense for energy grids and transportation systems. – 2025.

11. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

The work was carried out under a grant from AEF-BQM-BRFTF-4-2024-5(53).

YOLOV8-ENABLED MILITARY DRONE SURVEILLANCE IN MODERN COMBAT ENVIRONMENTS

Radovanović M.[1], Hashimov E.G.[23], Talibov A.M.[2], Akhundov R.G.[2],
[1]University of Defence, Military Academy, Belgrade, Serbia
[2]National Defense University, Baku, Azerbaijan
[3]Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

This article presents an expanded analysis of the integration of artificial intelligence driven drones into modern military strategy, with particular emphasis on autonomous functionality, battlefield surveillance, real time target detection, and decision support within complex operational environments. The relevance of the study is determined by the growing transformation of contemporary warfare, in which unmanned aerial vehicles are no longer limited to basic reconnaissance roles but are increasingly becoming intelligent operational systems capable of collecting, processing, and transmitting information with minimal delay. In modern combat conditions, military effectiveness depends heavily on the speed of situational awareness, the accuracy of target recognition, and the interoperability of surveillance, command, and response systems. Against this background, the article considers AI enabled drones as an essential component of contemporary military capability, especially when integrated into C5IRS and GIS supported environments that require rapid adaptation to dynamic battlefield conditions.

The study combines conceptual military analysis with an applied machine vision framework. First, it examines the place of drones in current military doctrine, including their classification, operational roles, and importance in both combat and noncombat missions. The article shows that AI driven drones enhance surveillance, reconnaissance, tactical flexibility, and command support by enabling near autonomous operation and

faster interpretation of battlefield information. Second, the paper develops a real time military object detection approach based on the YOLOv8 architecture. The selected model is justified by its lightweight structure, efficient inference speed, and strong object detection performance under operational constraints. Its architecture, built around CSP Darknet, PANet, and multi scale prediction layers, is considered suitable for drone-based surveillance tasks that require both precision and rapid processing. For model development, a unified dataset of approximately 10,000 annotated images was compiled from several public and indigenous sources. The dataset includes a wide range of military targets, such as tanks, armored personnel carriers, military trucks, artillery systems, rocket launchers, command posts, and other vital objects, represented across diverse terrains and scenarios, including forests, deserts, urban zones, and varying day and night conditions. The training process relied on transfer learning from a pretrained model and included multiple augmentation techniques, such as HSV augmentation, color space transformations, mosaic composition, and image scaling, in order to improve generalization and strengthen robustness in heterogeneous environments. The system architecture also incorporates drone mounted surveillance cameras, real time video transmission, filtered image preprocessing, and a monitoring interface that allows operators to receive rapid alerts, assess detections, and support further refinement through human feedback.

The experimental results indicate a high level of model effectiveness. On the selected validation setup, the system achieved an average mAP@0.5 value of 0.922, while precision, recall, classification accuracy, and localization performance remained at consistently high levels. The confusion matrix and validation curves further confirm that the model accurately distinguishes between military target classes with limited category overlap and strong predictive stability. The study therefore concludes that YOLOv8 can be effectively used for near real time detection of military targets during drone surveillance missions. At the same time, the article notes that operational effectiveness remains dependent on image quality, environmental conditions, and the quality of the incoming video stream. Accordingly, weather resilient preprocessing, including dehazing and rain related filtering, is identified as an important direction for improving deployment reliability. Overall, the article provides a broader military and technical perspective on the integration of AI driven drones into modern operations and demonstrates that the combination of autonomous aerial platforms and advanced detection algorithms can substantially strengthen surveillance, reconnaissance, and decision support capabilities in future military environments.

References

1. Radovanović M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

2. Javadov J.M. (2025) Application of UAV in the protection of state borders: GIS integration and risk management. *In* Інноваційні тенденції сьогодення в сфері природничих, гуманітарних та точних наук. (15.08.2025; Харків, Україна). p.115-124. DOI https://doi.org/10.62731/mcnd-15.08.2025.003

3. Dergachov K. et al. Adaptive algorithm for visual positioning of UAVs in the local environment // Proceedings of the International Workshop on Computational Methods in Systems Engineering (CMSE 2025) Kyiv, Ukraine, June 12, 2025.

4. Piriyev H. K., Hashimov E. G. The Second Karabakh War: military-political and military-technical aspects //Scientific Works. – 2023. – Т. 1. – №. 21. – С. 7-16.

5. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.

6. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

7. Javadov, J. M. et al. Integrating UAV imagery with GIS-based spatial analytics to forecast border risks. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.116-117.

8. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.

9. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11

10. Hasanov A.H., et al. About detecting moving objects. *In* Problems of informatization. 2024. Vol. 3. p.114-115.

11. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

12. Hasanov A. H., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 3. – С. 74-80.

13. Nasibov Y.A. et al. Modelling of the rationally deployment of observing systems //Advanced İnformation Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 10-13.

14. Huseynov, M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.

15. Islamov, I., et al. Prospects for the use of robotic complexes in eliminating the consequences of environmental accidents at military facilities. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 301–311.

16. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.

17. Zulfugarov B. et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.

18. Bayramov A.A. Application SMART for small unmanned aircraft system of systems //Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2020. – С. 193-213.

19. Hashimov E.G. et al. About some aspects of using a flock of UAVs. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023. Т. 1.секція 1,3,4. С. 4-5.

20. Huseynov B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. – 2025.

21. Balayev F.R, et al. Methodology and applications of Aİ enabled image recognition in UAVs. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.102-103

22. Atayev S.U., et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., sec/ 3,7. p.100-101

QUANTITATIVE DECISION FRAMEWORK FOR TECHNOLOGY-ENABLED COMBAT OPERATIONS PLANNING

Marko Radovanović[1], Kovtun A.V.[2], Akhundov R.G.[3], Hashimov E.G.[3]
[1]Military Academy, University of Defence in Belgrade, Belgrade, Serbia
[2]National Academy of the National Guard of Ukraine, Ukraine
[3]National Defense University, Baku, Azerbaijan

This article develops a conceptual and quantitative framework for integrating modern technologies into combat operations planning under conditions of time pressure, information uncertainty, and cyber vulnerability. The relevance of the study is determined by the fact that in contemporary operational environments, the effectiveness of planning depends not only on command experience and procedural discipline, but also on the ability to rapidly collect, verify, process, and transform heterogeneous data into coordinated decisions. In classical planning models, delays in information flow, fragmentation of intelligence inputs, and the prolonged duration of the decision cycle increase operational risk, raise resource consumption, and reduce the ability to preserve tactical initiative. Against this background, the study aims to systematize the role of modern technologies in planning and command processes, to link technological capabilities with measurable indicators of planning effectiveness, and to present digitalization-related risks through a structured evaluation model.

The methodology is based on conceptual systematization and the construction of an integrated quantitative assessment scheme. Technologies are grouped into functional categories including automated command and decision support, geographic information systems and spatial analytics, sensor and surveillance architectures, artificial intelligence and data analytics, resilient communication and data exchange infrastructure, and cybersecurity mechanisms. These categories are aligned with the main phases of the planning cycle, namely data collection and verification, situational-picture construction, generation of alternatives, constraint analysis, decision selection, execution control, and adaptive adjustment through feedback. To evaluate effectiveness, the study introduces an indicator vector composed of decision-cycle duration, information delay, decision quality, situational awareness, operational risk, and cyber-resilience. These variables are incorporated into an integral evaluation function in which benefit-oriented indicators are maximized, while time, delay, and risk are minimized under explicit operational, resource, and cybersecurity constraints. In addition, a matrix-based risk score is proposed using the probability and impact of adverse events together with detection capability and recovery time, thereby supporting the prioritization of countermeasures.

The discussion demonstrates that technology integration should not be interpreted as a linear accumulation of tools, but as a compromise-oriented optimization process. For example, geographic information systems and advanced analytics improve situational awareness and decision quality, yet an excessive

expansion of data sources can increase information delay if filtering and prioritization mechanisms are insufficient. The results also show that introducing cybersecurity as a minimum-threshold constraint prevents analytically strong but weakly protected architectures from being assessed as operationally preferable. Scenario-based reasoning further confirms that technology choices are context-dependent: as the operational time window narrows or the probability of sensor failure rises, the relative value of different technology packages changes. Sensitivity analysis of weight coefficients indicates that the comparative advantage of packages is unstable across priorities, which means that weighting should be justified not only by expert judgment but also by scenario validation. Overall, the proposed framework provides a scientifically grounded basis for comparing technology packages in combat planning, balancing effectiveness with risk and cyber-resilience, and guiding future calibration using real operational data and uncertainty-aware formulations.

References

1. Marko Radovanovich, et al. Application of the new hybrid model LMAW-GEDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army. Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing, -2024. Vol. 4 issue 1. p.16-31.
2. Huseynov, M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.
3. Islamov I., et al. Innovative approaches to environmental recovery in conflict-affected areas //Матеріали конференцій МЦНД. – 2025. – №. 24.10. 2025; Житомир, Україна. – С. 180-190.
4. Rustamli B. et al. Prospects and challenges of bio-nano remediation of military-contaminated lands //Матеріали конференцій МЦНД. – 2025. – №. 24.10. 2025; Житомир, Україна. – С. 227-237.
5. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.
6. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *SCIENTIA*, 2025; Strasbourg, France), 103–111.
7. Hashimov E., Khaligov G. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
8. Nasibov Y. A. O. et al. Modelling of the rationally deployment of observing systems //Advanced İnformation Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 10-13.
9. Hashimov, E.G. et al. (2016). Terrain orthophotoplanes making for military objects revealing. *National security and military sciences*, *2*(4), 14-20.
10. Hashimov, E.G. (2017). GIS technology and terrain orthophotomap making for military application. *Journal of Defense Resources Management*, *8*(2), 81-90.
11. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116
12. Hashimov, E.G. (2021) Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles. *Проблеми інформатизації. Тези доповідей*, *9*, 18-19.
13. Muradov S. et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons. *In* Modeling, Control and Inform. Techn. 2023, 6. c.54-56.

AI-ENABLED UNMANNED AERIAL VEHICLES: SECURITY, RELIABILITY, AND RISK MANAGEMENT

Allouch O.[1], Ismayil I.A.[2]
[1] University of El Manar, Tunis, Tunisia
[2]Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

This study examines the application of artificial intelligence technologies in unmanned aerial vehicles and analyzes the associated security aspects within a unified scientific framework. The relevance of the topic is determined by the growing role of UAVs in modern surveillance, monitoring, and decision-support systems, where the increasing complexity of operational environments, the growth of data flows, and stricter reaction-time requirements have exposed the limitations of purely operator-controlled platforms. In this context, the integration of artificial intelligence enables a qualitative transformation of UAVs from passive data collection tools into intelligent platforms capable of real-time sensor-data processing, automatic object recognition, adaptive risk assessment, and support for response selection. At the same time, the expansion of functional capability is accompanied by new challenges related to algorithmic reliability, data security, cyber interference, and the distribution of operational responsibility. The aim of the article is to systematically analyze these interrelated issues and to evaluate the scientific and applied significance of AI-based UAV systems in both military and environmental domains.

The methodological basis of the study relies on a systems approach in which the UAV is treated as an integrated set of functionally and informationally interconnected subsystems. The methodological structure is organized into three principal phases. The first phase involves multi-channel data acquisition and initial preprocessing, including noise reduction, data normalization, and spatiotemporal alignment of information obtained from optical, thermal, and positioning sensors. The second phase concerns the application of artificial intelligence algorithms for automatic object recognition, situation classification, and extraction of potential threat indicators. At this stage, the operational consequences of false positive and false negative decisions are explicitly considered as critical input variables for risk formation. The third phase is devoted to multi-level risk assessment and management, where technical risks, data-security risks, and governance-related risks are classified into separate categories and linked to corresponding countermeasure packages intended to strengthen the overall reliability and resilience of the UAV system.

The analysis demonstrates that the application of artificial intelligence substantially improves UAV effectiveness, especially by shortening the decision-making cycle and enhancing situational awareness. In military scenarios, this synergy strengthens surveillance and reconnaissance, improves anomaly detection and route-security assessment, and reduces dependence on direct human presence in high-risk environments. However, under electronic countermeasures and cyber

influence, algorithmic behavior requires additional validation and restrictive safeguards. In environmental applications, AI-enabled UAVs support continuous monitoring of pollution hotspots, fire hazards, soil erosion, and infrastructure damage through automated processing of optical, thermal, and gas-sensor data. Nevertheless, long-duration monitoring missions remain sensitive to environmental variability, background instability, and model generalization problems.

The study concludes that the sustainable and secure use of AI-enabled UAV systems requires an integrated approach in which functional efficiency is inseparable from algorithmic robustness, cyber protection, and scientifically grounded risk management.

References

1. Tabunenko V., et al. The dynamics of UAV flight integrated with route planning. *Collection of Sc. Papers «SCIENTIA»*, (10/10/2025; Antwerp, Belgium), 46–56.

2. Rustamov A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.

3. Muradova E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.

4. Marko Radovanovich, et al. Application of the new hybrid model LMAW-GEDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army. Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing, -2024. Vol. 4 issue 1. p.16-31.

5. Huseynov M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.

6. Hashimov E. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.

7. Babayev S. et al. The impact of unmanned aerial vehicles on the strategy and tactics of modern warfare. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (October 10, 2025; Antwerp, Belgium), 28–36.

8. Ibrahimov B., et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

9. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116

10. Akhundov R., Hashimov E. Enhancing the efficiency of the military environmental security system through the implementation of advanced technical means //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2025. – №. 8. – С. 348-352.

11. Piriyev H., et al. Optimizing intelligence, surveillance, and assessment in urban environments. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 246–256.

12. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11.

13. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

CLOUD MODEL-BASED ASSESSMENT OF VULNERABILITIES IN INTELLIGENT WEAPON SYSTEMS

Lui Zhang
Institute of Systems Engineering, Beijing, China
Jahangirov V., Nasirov E.V.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

This article examines the problem of vulnerability assessment in intelligent weapon systems under conditions of the rapid integration of artificial intelligence capabilities into military platforms. The relevance of the study is driven by the fact that algorithmic uncertainty, limited interpretability, insufficient training-data diversity, adversarial manipulation, and weaknesses in human-machine interaction can directly affect the reliability, stability, and operational effectiveness of such systems. In contrast to conventional reliability and risk-management approaches, which often emphasize either technical failures or external threats separately, the vulnerability perspective makes it possible to evaluate the internal susceptibilities and resilience limits of an intelligent weapon system within a unified analytical framework. The purpose of the article is to develop a methodological approach that allows the vulnerability level of intelligent weapon systems to be assessed in a more systematic, quantitative, and uncertainty-sensitive manner. To achieve this objective, the study proposes an integrated assessment framework based on a combined weighting method and a cloud model.

Methodologically, the research is organized in several consecutive stages. First, on the basis of literature review and expert consultation, a hierarchical assessment index system is constructed, including five primary indicators and fourteen secondary indicators. The indicator structure covers such dimensions as security controllability, adversarial attack defense capability, ethics, credibility, and human-machine collaboration capability. Second, the subjective weights of indicators are determined through the Analytic Hierarchy Process, while objective weights are obtained by the entropy method. These two sets of results are then integrated through a combined weighting procedure in order to reduce excessive dependence on purely subjective judgment or purely data-driven dispersion. Third, because most assessment indicators are qualitative or semi-qualitative in nature, the cloud model is used to convert ambiguous expert evaluations into numerical cloud characteristics through expected value, entropy, and hyperentropy. This makes it possible to capture not only the average assessment tendency, but also the uncertainty and randomness embedded in expert judgments. The vulnerability scale is defined across five levels: negligible, low, medium, high, and very high.

To verify the feasibility of the proposed framework, the study applies the model to the assessment of a specific unmanned aerial vehicle system and incorporates the judgments of ten domain experts. The results show that the comprehensive assessment cloud has the greatest similarity to the standard cloud corresponding to the “high” vulnerability level. The analysis further indicates that comparatively

influential vulnerability factors include vulnerability analysis and repair capability, training-data diversity, and interpretability and technical transparency. These findings suggest that the most critical directions for reducing vulnerability in future intelligent weapon systems include improving algorithmic transparency, increasing the diversity and quality of training data, strengthening redundancy and repair mechanisms, and enhancing the robustness of human-machine interaction. Overall, the article provides a practical methodological basis for the assessment of complex, uncertain, and multi-attribute military systems and offers useful guidance for the safer development of AI-enabled weapon platforms.

References

1. Hasanov A. H., et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 3. – С. 74-80.

2. Radovanović M. et al. Application of the new hybrid model LMAW-G-EDAS multi-criteria decision-making when choosing an assault rifle for the needs of the army //Journal of decision analytics and intelligent computing. – 2024. – Т. 4. – №. 1. – С. 16-31.

3. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.

4. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

5. Islamov I., et al. Innovative approaches to environmental recovery in conflict-affected areas //Матеріали конференцій МЦНД. – 2025. – №. 24.10. 2025; Житомир, Україна. – С. 180-190.

6. Nasibov Y. A. O. et al. Modelling of the rationally deployment of observing systems //Advanced İnformation Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 10-13.

7. Hasanov A.H., et al. About detecting moving objects. *In* Problems of informatization. 2024. Vol. 3. p.114-115.

8. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.

9. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.

10. Huseynov, M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.

11. Islamov, I., et al. Prospects for the use of robotic complexes in eliminating the consequences of environmental accidents at military facilities. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 301–311.

12. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116

13. Hashimov, E.G. About some aspects of using a flock of UAVs. *İn* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023, 1, 4-5.

PROBABILISTIC BEARING IDENTIFICATION AND MULTI-TARGET TRACKING IN UAV SWARMS

Gasimov V.A., Islamov I.J.
Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan
Hashimov E.G.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

This article examines the problem of bearing identification and multi-target tracking in unmanned aerial vehicle (UAV) swarms within the framework of modern probabilistic tracking theory. The relevance of the study is determined by the rapid expansion of UAV applications in surveillance, reconnaissance, electronic warfare, and counter-UAV operations, where targets increasingly operate not individually but in coordinated groups or swarm formations. Under such conditions, the reliable association of measurements with specific targets becomes one of the central scientific and technical challenges. In conventional bearing-only observation schemes based on azimuth or azimuth-elevation measurements from multiple stations, the growth in the number of closely spaced UAVs significantly complicates correct association. As a result, classical triad-based and combinatorial methods tend to generate a large number of false hypotheses, while their real-time processing capability deteriorates as swarm density increases.

The article aims to reformulate the bearing identification problem not as a purely geometric task, but as a probabilistic measurement-to-target association problem. The literature analysis demonstrates that existing approaches can be grouped into two main directions. The first includes deterministic and semi-deterministic methods focused on geometric matching of bearings, triad selection, and rejection of false combinations. Although these approaches may be effective in simple scenarios, their combinatorial complexity grows rapidly with the number of targets. The second direction is based on probabilistic multi-target tracking, where association uncertainty is modeled statistically. In this context, probabilistic data association, multi-hypothesis tracking, and Random Finite Set based filters such as PHD, LMB, and GLMB provide a mathematically consistent framework for handling varying target numbers, false alarms, and missed detections.

Methodologically, the study proposes a staged architecture that includes preprocessing of angular measurements, statistical modeling of noise, spatial and angular gating, and subsequent probabilistic association through JPDA, LMB, or GLMB-type filtering depending on target density and scene dynamics. A key component of the proposed framework is multisensory fusion.

The integration of optical bearing measurements with RF direction finding, radar, and other complementary sensing channels significantly reduces association ambiguity and strengthens the practical robustness of the tracking process. In the proposed architecture, incoming data are filtered for consistency and reliability and then fused through a Kalman filtering stage to obtain more accurate and continuous state estimates.

The study concludes that classical triad-based approaches remain applicable only under limited and idealized conditions, whereas reliable UAV swarm tracking in realistic environments requires an integrated architecture combining probabilistic association, RFS-based filtering, and multisensory fusion. Such an approach offers greater robustness, scalability, and adaptability, and therefore represents a promising direction for further Scopus-level research in UAV swarm monitoring and counter-swarm systems.

References

1. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11
2. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.
3. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116
4. Dergachov K. et al. Adaptive algorithm for visual positioning of UAVs in the local environment // Proceedings of the International Workshop on Computational Methods in Systems Engineering (CMSE 2025) Kyiv, Ukraine, June 12, 2025.
5. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.
6. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.
7. Bayramov A.A. Application SMART for small unmanned aircraft system of systems //Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2020. – С. 193-213.
8. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.
9. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.
10. Muradov S., et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.
11. Hashimov E. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
12. Hashimov E. et al. Determination of coordinates of targets from unmanned aerial vehicles //Intelligence. – 2022. – Т. 2. – №. 5.
13. Zulfugarov B. et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.
14. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

DRONE WARFARE AND THE STRATEGIC RECONFIGURATION OF MODERN CONFLICT

Gogiashvili Givi, Hasanov A.H.
Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia
Hashimov E.G., Akhundov R.G.
National Defense University, Baku, Azerbaijan

The rapid development of unmanned aerial vehicle technology has become one of the most influential drivers of transformation in modern warfare. Originally designed primarily for reconnaissance and surveillance, UAVs have evolved into multifunctional military systems capable of precision strike, persistent intelligence collection, real-time battlefield monitoring, and support for operational decision-making. This article examines how the tactical and strategic transformation of UAV technology is reshaping the character of contemporary armed conflict. The study focuses on the growing role of UAVs in reducing direct force exposure, increasing operational flexibility, improving strike accuracy, and accelerating the tempo of combat actions.

The analysis shows that UAVs have fundamentally altered battlefield tactics by enabling remote engagement, continuous observation, and high-precision targeting with reduced risk to personnel. Their ability to provide real-time intelligence and conduct surgical strikes has increased the effectiveness of operations in both conventional and asymmetric conflict environments. The experience of recent conflicts, particularly the 2020 Nagorno-Karabakh war, as well as operations in Syria and Ukraine, demonstrates that UAVs can significantly influence combat outcomes by enhancing situational awareness, supporting rapid command decisions, and weakening enemy defensive positions. As a result, the role of traditional direct engagement is increasingly complemented, and in some cases partially replaced, by remotely executed and technology-intensive combat methods.

At the strategic level, UAV technology changes the balance between military capability, cost, and force projection. States with more limited conventional resources can use drones to generate operational effects previously associated with larger and more expensive airpower systems. This tendency increases the accessibility of advanced military capabilities and modifies the logic of deterrence, escalation, and battlefield superiority. At the same time, the integration of artificial intelligence into UAV systems is expanding their autonomy, speed of reaction, and target-processing capacity. AI-assisted UAVs are expected to play a growing role not only in reconnaissance and strike missions, but also in adaptive decision support and dynamic battlefield management.

Particular attention is also given to the emergence of drone swarms as a new stage in military innovation. Coordinated groups of UAVs can distribute tasks, strike multiple targets, overload enemy defenses, and create new offensive and defensive challenges. However, these developments also generate ethical, legal, and humanitarian concerns, especially regarding civilian protection, autonomous

decision-making, and compliance with international humanitarian law. The study concludes that UAVs are no longer auxiliary tools of warfare but central components of modern military strategy whose further evolution will shape the structure, speed, and logic of future conflicts.

References

1. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.
2. Dergachov K. et al. Adaptive algorithm for visual positioning of UAVs in the local environment // Proceedings of the International Workshop on Computational Methods in Systems Engineering (CMSE 2025) Kyiv, Ukraine, June 12, 2025.
3. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.
4. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116
5. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.
6. Bayramov A.A. Application SMART for small unmanned aircraft system of systems //Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2020. – С. 193-213.
7. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.
8. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11.
9. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.
10. Muradov S., et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.
11. Hashimov E. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
12. Hashimov E. et al. Determination of coordinates of targets from unmanned aerial vehicles //Intelligence. – 2022. – Т. 2. – №. 5.
13. Zulfugarov B. et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.
14. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.
15. Javadov J. Application of UAV in the protection of state borders: GIS integration and risk management. *Матеріали конференцій МЦНД*, (15.08.2025; Харків, Україна), 115–124. https://doi.org/10.62731/mcnd-15.08.2025.003

PROTECTION OF DRONES FROM ELECTRONIC WARFARE

Nasirov E.V., Huseynov M., Zakaryayev Z.
Heydar Aliyev Military Institute, Baku, Azerbaijan

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become one of the most important technological tools in modern military operations. Initially, drones were mainly used for civilian purposes such as aerial photography, monitoring of public events, and sports competitions. However, with the rapid development of modern technologies, their application has expanded significantly, particularly in the military sphere.

The ongoing Russia–Ukraine war clearly demonstrates the increasing role of drones in modern combat operations. UAVs are widely used for aerial reconnaissance, artillery fire correction, surveillance, and precision strikes against armored vehicles and personnel. Due to their relatively low cost, high maneuverability, and minimal risk to operators, drones have become an essential element of modern warfare.

The growing effectiveness of UAVs has led to the development of various countermeasures designed to neutralize them. One of the most effective approaches is the use of electronic warfare (EW) systems that disrupt the control and navigation of drones.

The Impact of Electronic Warfare on Drones

Electronic warfare systems affect drones by interfering with radio signals used for communication, control, and navigation. This interference may include signal jamming, signal interception, or manipulation of satellite navigation signals.

The primary objective of EW systems is to disrupt the connection between the drone and its operator. When this communication link is interrupted, the drone may lose control, deviate from its route, or perform an emergency landing.

One of the most common EW techniques is GPS jamming, which blocks satellite navigation signals. As a result, the drone cannot determine its position accurately. Another widely used method is GPS spoofing, where false navigation signals are transmitted to mislead the drone about its actual location. In such cases, the drone may automatically land or change its course based on incorrect coordinates.

Methods of Protecting Drones from Electronic Warfare

To counteract the effects of electronic warfare, modern UAVs incorporate several protective technologies. One important method is the use of encrypted communication channels. Advanced cryptographic algorithms protect control signals from interception or manipulation.

Another widely used method is frequency hopping. In this technique, the communication frequency between the drone and the operator changes rapidly within a wide frequency spectrum. This makes it significantly more difficult for electronic warfare systems to jam the signal effectively.

Autonomous navigation is another important protection method. In this mode, the drone follows a pre-programmed flight route stored in its onboard computer without relying on GPS signals.

This approach allows the drone to continue its mission even in environments with strong electronic interference.

Additionally, modern drones may use special anti-jamming devices. These systems utilize technologies such as Controlled Reception Pattern Antennas (CRPA) to filter out interference and focus on legitimate satellite signals.

As a result, navigation accuracy and operational stability are significantly improved.

FPV Drones and Their Operational Characteristics

First Person View (FPV) drones represent a special category of UAVs widely used in modern combat operations. In FPV systems, the operator receives real-time video from the drone's onboard camera through specialized goggles or screens. This allows the operator to control the drone as if viewing the environment from the drone's perspective.

FPV drones typically consist of a camera, transmitter, receiver, flight controller, and electric motors.

Video signals are commonly transmitted using the 5.8 GHz frequency band. In environments with heavy electronic interference, additional transmitters operating at 1.3 GHz may be used to improve signal stability.

Due to their small size, high maneuverability, and relatively low cost, FPV drones are particularly effective in reconnaissance missions and precision strike operations.

Unmanned aerial vehicles have become an indispensable component of modern military operations. However, their effectiveness is significantly influenced by electronic warfare systems designed to disrupt communication and navigation signals.

Although it is currently impossible to completely eliminate the effects of electronic warfare, modern technological solutions significantly increase drone survivability.

Encryption technologies, frequency hopping communication, autonomous navigation systems, and anti-jamming devices play a crucial role in protecting drones from electronic interference.

The continuous development of counter-electronic warfare technologies will further enhance the operational effectiveness and reliability of UAV systems in future military conflicts.

References

1. Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment. Wiley, 2010.

2. Gupta S., Ghonge M., Jawandhiya P. Review of Unmanned Aircraft System (UAS). International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 2013.

3. Bendett S. The Role of Drones in the Russia–Ukraine War. Center for Naval Analyses, 2022.

4. Hashimov E. G., Maharramov R. R. Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles //Проблеми інформатизації. Тези доповідей. – Т. 9. – С. 18-19.

5. Kopp C. Electronic Warfare and UAV Operations. Defence Today Journal, 2020.

6. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.

7. Muradov S. et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Моделювання, керування та інформаційні технології. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.

8. Ibrahimov B. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

9. Hashimov E.G. et al. About some aspects of using a flock of UAVs. *In* Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023. Т. 1, секція 1, 3, 4. С. 4-5.

10. Abdullaeva A. J. et al. Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. – 2025.

11. Асадов Ю. Г., Насиров В. И., Насиров Э. В. Морфология роста кристаллов при превращении II III в нитрате рубидия //Физика (Баку). – 2008. – №. 2. – С. 214.

12. Nasirov V. I., Bairamov R. B., Nasirov E. V. Morphology and kinetics of polymorphic transformations in K0. 965Rb0. 035NO3 single crystals //Crystallography Reports. – 2015. – Т. 60. – №. 7. – С. 1155-1159.

13. Nasirov E. V., Asadov Y. G. Kinetics of the II→ III polymorphic transformation in KNO3-RbNO3 solid solutions //Inorganic Materials. – 2010. – Т. 46. – №. 8. – С. 885-888.

14. Asadov Y. G., Nasirov V. I., Nasirov E. V. Effect of the II→ III Phase Transformation on the Growth Morphology of Rubidium Nitrate Crystals //Fizika (Baku). – 2008. – №. 2. – С. 214.

15. NATO Standardization Office. Counter-UAS Systems and Electronic Warfare. NATO Publications, 2021.

16. Hashimov E., Khaligov G. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.

17. Muradova, E. et al. (2025). Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350

18. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11.

19. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

20. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

21. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.

THE ROLE OF NETWORKS, INFRASTRUCTURE, AND CYBERSECURITY IN THE DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Agayeva U., Niftaliyev M.
Heydar Aliyev Military Institute, Baku

The future of information technology is shaped by the development of software, artificial intelligence, machine learning, cloud technologies, networking, and cybersecurity systems, which play a crucial role in creating faster, more secure, and agile systems.

In order to maintain competitiveness in the modern world and become a strong state, it is important to follow the dynamics of this technological world, use them effectively and develop them at the state level.

Information technology (IT), which collects, stores, processes and transmits data, is one of the most important and in-demand large-scale areas of our time [1,4]. The most talked about and controversial information technologies in society are not only computers, smartphones, programs, social networks, but also the technological ecosystem behind them.

Interest in the field of information technology has given impetus to its rapid development, encouraging specialists to constantly work in various areas of this field, to reveal innovations that will surprise users. Here we are talking about providing our work with more flexible and high-quality technologies compared to previous years, and their security.

Information technology, with its wide range of directions and application areas, works with its own tools and technologies. Due to the application of information technology in various fields, there is a need for information technology specialists in this field, while in some fields such specialists are lacking or are trained in this field.

Network and infrastructure, cybersecurity - design of network devices and infrastructure, network management (Cisco Systems, an American company founded in 1984, which produces network products, is a world leader in network equipment and telecommunications systems), security and optimization, servers, data centers, information security (Firewall, Antivirus, Ethical Hacking), cryptography and data encryption, blockchain (Blockchain stores data in the form of "blocks" and each block is sequentially ordered, related to the previous block) and prevention and management of cyberattacks are intended [2,3].

5G technology in terms of network and infrastructure provides reliable and faster and higher quality connections. New technologies are being developed that will offer faster, more reliable and wider network capabilities than 5G.

Network security – a firewall security system used to ensure network security and protect data, protection against DDoS attacks, and network traffic protection are provided by more advanced technologies [1,4]. Cloud-based data protection and network security issues are in the spotlight.

The use of artificial intelligence and automation technologies is expanding to make networks easier to manage, increase accuracy and reliability. Cyber security specialists who protect systems, data and networks from hacker attacks, security analysts who collect information about risks and threats and take appropriate measures, and encryption specialists who protect and securely encrypt data work in this field.

The Strategy of the Republic of Azerbaijan on Information Security and Cybersecurity for 2023–2027 defines the main goals, principles, directions and priority tasks of activities in the field of information security and cybersecurity. In addition to networks, infrastructure, and cybersecurity, software also plays a crucial role in the development of information technologies. Software - consists of system software, application programs, and programming units and controls the computer system [1].

The system software of the computer, such as Microsoft Windows, Linux, MacOS, Unix operating systems, mobile software - Android, such as operating systems written for Sumsung, Xiomi, and iOS, i.e. operating systems and applications written for iPhones, includes the development of application programs, such as text, spreadsheet, graphics processors, computer game programs, websites and web applications.

The Android operating system is mainly written in Java, JavaScript and Kotlin programming languages, and the iOS mobile operating system developed by Apple is written in Objective C, Swift (created to replace Objective-C) languages .

The Windows kernel (Windows NT Kernel) is mainly written in C. The user interface and other components are developed in C++ and C#. Although the Linux kernel is written entirely in C, Assembly code is used in some low-level parts. The graphical interface and some system tools are developed in C++ and Python. Microsoft Office suite applications (Word, Excel, PowerPoint, etc.) – C++, C#, some scripts are written in Visual Basic for Applications. Software used in networks is one of the key components of information technologies, playing a crucial role in network management, security, and overall efficiency.

Network software includes various types of systems, such as operating systems (e.g., server operating systems), network management tools, and security applications.

These programs allow administrators to monitor network devices, manage data transmission, and detect faults in a timely manner. Additionally, network software facilitates communication between users, simplifies data sharing, and enables system integration.

Examples include server software, database management systems, and cloud-based applications, which are integral to modern networks. From a cybersecurity perspective, network software is also essential. Antivirus programs, firewalls, and other protective tools help safeguard networks against external threats and ensure the confidentiality of information. In conclusion, software used in networks is a fundamental factor that ensures networks operate reliably, securely, and efficiently. İn addition to managing network operations and security, network software often

interacts closely with databases and analytics tools, enabling efficient data storage, retrieval, and real-time analysis for informed decision-making.

Databases and analytics - database management systems (SQL, PostgreSQL, relational and NoSQL, MongoDB non-relational databases), big data (Big Data), data analytics are included. Database administrators manage, optimize and take security measures on databases, Big Data, data analysts and business intelligence analysts, data engineers perform analysis on big data. Python data analysis, R language is widely used for statistical analysis and research. Data analytics is also widely applied in the military field. Data analytics is a very important field for military operations, security and strategic decision-making. Big Data and Hadoop Technologies are used, for example, when analyzing data received from missiles, aircraft, robots and other military systems.

In fields where information technologies are applied, the involvement of multidisciplinary teams of specialists is essential. Among these specialists, **cybersecurity experts** play a critical role in analyzing network security, detecting cyberattacks, and ensuring that sensitive military and operational data is protected and securely stored. Their work is fundamental to maintaining the integrity and confidentiality of information systems, preventing unauthorized access, and supporting the safe operation of IT infrastructures in high-risk environments. Bot operations refer to coordinated actions carried out by automated software programs, commonly known as bots, within a network. While some bots serve legitimate purposes, such as network monitoring or automated data processing, malicious bots can pose serious security threats. These threats include Distributed Denial of Service (DDoS) attacks, unauthorized access to sensitive information, propagation of malware, and disruption of network services. Analyzing bot activities is essential for network security specialists to identify abnormal traffic patterns, prevent cyberattacks, and protect both infrastructure and sensitive data. Advanced cybersecurity measures, including intrusion detection systems, firewalls, and behavioral analytics, are used to mitigate the risks associated with bot operations in networks. For example, during the Second Karabakh War, the well-known Tavush bot operation was carried out through social media bots. The opposing side exploited information technologies to influence public opinion internationally, drawing attention to themselves and presenting themselves as the aggrieved party. In response, Azerbaijan conducted the Tavush bot operation as a counter-information campaign, using social media bots to intervene in enemy information channels and to ensure that accurate information reached the Armenian side. The team responsible for this operation was specially awarded by the President.

In conclusion the modern development of information technologies, network infrastructure and cybersecurity play a central role. Networks ensure the reliable and seamless transmission of data, facilitate system integration, and provide high-speed connectivity. A strong network infrastructure also supports the efficient operation of data centers, servers, and cloud platforms, enhancing the overall resilience of IT systems. Cybersecurity is crucial for protecting information, preventing unauthorized access, and detecting network attacks. Tools such as antivirus

programs, firewalls, network monitoring, and predictive analytics form robust mechanisms that safeguard information systems in both civilian and military contexts. This capability provides a strategic advantage, especially in high-risk environments and information warfare scenarios. Key areas for further development include centralized network management and automated monitoring, the implementation of 5G and next-generation network technologies, and the enhancement of predictive and AI-based cybersecurity tools. Advancing these areas will strengthen the resilience of networks, ensure more secure data protection, and create strategic advantages for future digital infrastructures.

Overall, a strong and modern network infrastructure combined with effective cybersecurity measures ensures the continuous development of information technologies and provides critical advantages in both civilian and military domains.

References

1. Ağayeva Ü.H. İnformasiya texnologiyaları. Bakı, 2025, 203 s.
2. Ağayeva Ü.H. Xaker hücumları və onların nəticələri. H.Əliyev ad. AAHM "Elmi Əsərlər Məcmuəsi", 2015, №1(24)
3. Darko Brodic, Alessia Amelio. The Captcha: Perspectives and Challenges: Perspectives and Challenges in Artificial Intelligence, 2019, 123 p.
4. Simon Rodgers. Использование облачных технологий для ускорения интеллектуального анализа данных. Control engineering. 2020 #1(85)
5. Ibrahimov B., et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.
6. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.
7. İbrahimov, B.G. Research and analysis of fiber-optic communication lines based on wave multiplexing technology // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Тези доповідей тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції, - Харків: 2023, Том 2: - pp.4-5.
8. Hasanov M. H., et al. Research and analysis performance indicators NGN/IMS networks in the transmission multimedia traffic //2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
9. Valiyev V. M., et al. About one resource control task and optimization throughput in multiservice telecommunication networks //T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2020. – Т. 14. – №. 6. – С. 48-52.
10. Hashimov E., Khaligov G. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
11. Muradov S., et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Моделювання, керування та інформаційні технології. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.
12. Islamov, I.J. (2025). prospects for the use of robotic complexes in eliminating the consequences of environmental accidents at military facilities. *Матеріали конференцій МЦНД*, (07.11.2025; Дніпро, Україна), 301–311.

PROBABILISTIC BEARING IDENTIFICATION AND MULTI-TARGET TRACKING IN UAV SWARMS

Vasil Nicolas[1], Salamov N.O.[2]
[1]Technical University of Cluj-Napoca, Romania
[2]Ganja Technology University, Ganja, Azerbaijan

This article examines the problem of bearing identification and multi-target tracking in unmanned aerial vehicle (UAV) swarms within the framework of modern probabilistic tracking theory. The relevance of the study is determined by the rapid expansion of UAV applications in surveillance, reconnaissance, electronic warfare, and counter-UAV operations, where targets increasingly operate not individually but in coordinated groups or swarm formations. Under such conditions, the reliable association of measurements with specific targets becomes one of the central scientific and technical challenges. In conventional bearing-only observation schemes based on azimuth or azimuth-elevation measurements from multiple stations, the growth in the number of closely spaced UAVs significantly complicates correct association. As a result, classical triad-based and combinatorial methods tend to generate a large number of false hypotheses, while their real-time processing capability deteriorates as swarm density increases.

The article aims to reformulate the bearing identification problem not as a purely geometric task, but as a probabilistic measurement-to-target association problem. The literature analysis demonstrates that existing approaches can be grouped into two main directions.

The first includes deterministic and semi-deterministic methods focused on geometric matching of bearings, triad selection, and rejection of false combinations. Although these approaches may be effective in simple scenarios, their combinatorial complexity grows rapidly with the number of targets.

The second direction is based on probabilistic multi-target tracking, where association uncertainty is modeled statistically. In this context, probabilistic data association, multi-hypothesis tracking, and Random Finite Set based filters such as PHD, LMB, and GLMB provide a mathematically consistent framework for handling varying target numbers, false alarms, and missed detections.

Methodologically, the study proposes a staged architecture that includes preprocessing of angular measurements, statistical modeling of noise, spatial and angular gating, and subsequent probabilistic association through JPDA, LMB, or GLMB-type filtering depending on target density and scene dynamics. A key component of the proposed framework is multisensory fusion. The integration of optical bearing measurements with RF direction finding, radar, and other complementary sensing channels significantly reduces association ambiguity and strengthens the practical robustness of the tracking process. In the proposed architecture, incoming data are filtered for consistency and reliability and then fused through a Kalman filtering stage to obtain more accurate and continuous state estimates.

The study concludes that classical triad-based approaches remain applicable only under limited and idealized conditions, whereas reliable UAV swarm tracking in realistic environments requires an integrated architecture combining probabilistic association, RFS-based filtering, and multisensory fusion. Such an approach offers greater robustness, scalability, and adaptability, and therefore represents a promising direction for further Scopus-level research in UAV swarm monitoring and counter-swarm systems.

References

1. Huseynov B. S. Characteristics of UAVs application during the second Karabakh war //İn Problems of informatization. – 2023. – Т. 3. – С. 10-11
2. Radovanovic M. et al. Unleashing autonomous forces: Integrating AI-driven drones in modern military strategy //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 3. – №. 77. – С. 55-69.
3. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116
4. Dergachov K. et al. Adaptive algorithm for visual positioning of UAVs in the local environment // Proceedings of the International Workshop on Computational Methods in Systems Engineering (CMSE 2025) Kyiv, Ukraine, June 12, 2025.
5. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350.
6. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.
7. Bayramov A.A. Application SMART for small unmanned aircraft system of systems //Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2020. – С. 193-213.
8. Hashimov E. et al. Mathematical aspects of determining the motion parameters of a target by UAV //Advanced Information Systems. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 18-22.
9. Rustamov, A., et al. Application of artificial intelligence in the command and control system of naval forces. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (November 7, 2025; Strasbourg, France), 103–111.
10. Muradov S., et al. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 54-56.
11. Hashimov E. The issue of training of the neural network for drone detection //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-58.
12. Hashimov E. et al. Determination of coordinates of targets from unmanned aerial vehicles //Intelligence. – 2022. – Т. 2. – №. 5.
13. Zulfugarov B. et al. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages //Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference. – 2023. – №. 6. – С. 42-45.
14. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

RESEARCH ON NOISE IMMUNITY OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Ibrahimov B.G., Ismailova S.R.
Azerbaijan Technical University; Baku, Azerbaijan
Yakhyaev B.M.
National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

The development civilization is accompanied by a rapid increase in information flows within human society. This requires the constant improvement of radio systems and telecommunications networks based on modern technologies to enable high-speed and highly reliable message transmission with a relatively simple technical implementation of the main components such radio communication systems- modulators, demodulators, encoders, and decoders.

Therefore, the problem of developing new methods for transmitting messages and optimal methods for processing them at reception in radio engineering systems has remained relevant for many decades. Significant contributions to this solution have been made by many researchers who have created effective modulation and coding methods and proposed optimal methods for demodulating received signals and decoding messages.

When designing radio engineering systems, the selection of a signal ensemble is of particular importance. This ensemble must ensure the required message transmission rate V_b and its reliability, which is determined by the probability P_{BER} of error when receiving messages transmitted using these signals. $i = \overline{1,n}$

One of the key elements of a continuous channel that significantly impacts the noise immunity of signal reception in radio engineering systems is the radio wave propagation environment. The influence of the propagation environment manifests itself primarily in the occurrence of general and frequency-selective signal fading.

In terms of assessing the potential achievable noise immunity, we will consider:

-signals in an absolute modulation code with a Hamming distance between adjacent symbols equal to the density;

-fading depth, slow, one-sided, normal fading with a distribution density of the form:

$$p(\chi) = \frac{1}{\sigma_\chi \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\chi^2/(2\sigma_\chi^2)\right], \quad (1)$$

where χ is the fading depth.

In general, the degree of influence of fading on the noise immunity of reception in radio engineering systems can be determined using the following expressions:

$$P_{BER} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{BER}(\chi) \cdot p(\chi) d\chi, \quad (2)$$

where P_{BER}, $P_{BER}(\chi)$ probability and conditional probability of bit error.

By inserting expression (1) into expression (2) and taking into account that the probabilities of errors per bit P_{BER} and per symbol P_S for the considered method modulation coding are related by the relation, we obtain the formula for the conditional probability of error per bit:

$$P_S = 2P_{BER} \log_2 L, \tag{3}$$

where $erfc(y)-$ complementary error function and equal to:

$$erfc(y) = 2Q(\sqrt{2}y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} \exp(-x^2)dx .$$

Based on numerical calculations, the equivalent energy losses of reception of signals QAM-16, QAM-64, QAM-256, QAM-1024 from the standard deviation of the fading depth for bit error probabilities of 10^{-7}, 10^{-5}, 10^{-3}, calculated using expressions (1), (2) and (3) are presented.

Thus, an analytical expression for the probability of a bit error has been obtained, which makes it possible to estimate the degree of influence of general fading on the noise immunity of the reception of multi-position QAM signals.

References

1. Ibrahimov, B. G. (2021). Telecommunication systems and technologies. Textbook for technical higher schools. AzTU, Baku. 354 p.

2. Yusifbayli, N., Guliyev, H. Intellectual voltage management in electrical networks. Isgt Innovative smart grid technologies europa 2011, IEEE, PES, Manchester UK, 05-07 December 2011.pp.235-246.

3. Ibrahimov, B., Nabieva, A., & Hamidova, A. (2024). Research Efficiency Functioning Wireless Cellular Networks Taking into Account Modern Energy Saving Technologies. *Engineering Headway*, *7*, 149-155.

4. Ibrahimov, B. G. (2025, November). Research Quality of Communication in Multiservice Telecommunication Networks. In *2025 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1-5). IEEE.

5. Ibrahimov B.G. et al. Research of multi-service communication networks taking into account dynamically emerging security threats. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., section 3,7. p.10-11

6. Ibrahimov B.G. et al. Research throughput multiservice telecommunication networks. *In* Сучасні напрями розвитку інформацийно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2020. Том 1. с.30

7. Ibrahimov B.G. Research quality of functioning of the efficiency optical telecommunication systems using spectral technologies. *In* Проблеми інформатизації. 2023. Т.1. – С. 29-30.

8. Ibrahimov B.G. et al. Research and analysis of efficiency indicators of critical infrastructures in the communication system //Advanced Information Systems. – 2024. – Т. 8. – №. 2. – С. 58-64.

INTEGRATED ASSESSMENT OF MECHANICAL PARAMETERS AND OPERATIONAL RELIABILITY IN OIL AND GAS TRANSPORTATION EQUIPMENT

Bakhshiyev K.A., Abbasli A.A., Aliyev A.M., Hashimov E.G.
Azerbaijan Techical University, Baku, Azerbaijan

The operational reliability of equipment used in oil and gas transportation systems is determined to a significant extent by the correctness with which its mechanical parameters are identified, interpreted, and monitored throughout the service life. Pipelines, pump and compressor units, valve assemblies, flange joints, support structures, and associated connecting components operate under the simultaneous influence of internal pressure, temperature variation, flow instability, vibration, hydraulic shock, support displacement, residual stresses, material aging, and local degradation processes. Under such conditions, technical reliability cannot be adequately explained by a single strength indicator or by nominal design parameters alone. A broader engineering perspective is required in which stress state, deformation behavior, stiffness characteristics, vibration response, fatigue resistance, and wear processes are analyzed in a unified framework. This article addresses that need by examining the principal mechanical parameters of the main equipment used in oil and gas transportation and by analyzing their effect on operational reliability from a comprehensive methodological standpoint.

The relevance of the study lies in the fact that modern oil and gas transportation infrastructure functions in increasingly demanding operating environments. Mechanical loading is no longer limited to static pressure action. Instead, transportation systems are exposed to variable internal loads, transient hydrodynamic phenomena, thermal expansion and contraction, fluctuating support conditions, corrosion-induced geometry changes, and the cumulative effects of cyclic service. As a result, local stress concentrations, plastic zones, micro-fatigue cracks, loss of stiffness, seal degradation, and progressive wear may develop even when the equipment formally satisfies nominal design requirements. This makes the correct assessment of mechanical parameters an essential prerequisite for safe operation, accurate diagnostics, residual life prediction, and rational maintenance planning. The article therefore seeks to move beyond simplified isolated calculations and to establish a systematic interpretation of how different groups of mechanical parameters jointly influence technical reliability.

The study is based on a comprehensive methodological approach in which the principal mechanical parameters are grouped into several interrelated categories. These include strength parameters, deformation parameters, stiffness indicators, dynamic characteristics, and service-life related indicators. Strength parameters comprise such measures as yield strength, ultimate strength, contact stress, and critical failure stress. Deformation-related parameters include elastic deformation, residual deformation, local settlement, and relative elongation. Stiffness indicators express the ability of structural and machine elements to preserve stability under

load, while dynamic parameters are represented by vibration amplitude, frequency response, resonance tendencies, and sensitivity to impulse loading. Service-life indicators include fatigue resistance, wear resistance, and those characteristics that determine the long-term stability of the equipment under repeated or combined loading. The classification adopted in the article makes it possible to evaluate mechanical behavior not as a set of unrelated variables, but as an interacting system of reliability-relevant indicators.

Special attention is given to the mechanical behavior of pipelines as the main structural carriers of transported media. For pipeline elements, the article emphasizes the importance of hoop stress, longitudinal stress, radial stress, and thermally induced stress components. Under internal pressure, hoop stress usually becomes the dominant factor in strength assessment, but in real operating conditions it interacts with longitudinal stresses caused by pressure end effects, support constraints, and thermal gradients. Where temperature changes are significant and support movement is restricted, additional thermal stresses arise and may substantially alter the stress distribution. Abrupt changes in flow regime and hydraulic shock also create short-term dynamic stress impulses that increase the probability of local damage. The study shows that even structurally identical pipeline sections may exhibit different mechanical responses depending on soil conditions, external support reactions, vibration environment, and flow nonstationarity. This confirms that the evaluation of mechanical parameters must be tied to the actual operating environment rather than to standard design assumptions only.

In pump and compressor equipment, the mechanical picture becomes even more strongly associated with dynamic phenomena. Here, the article identifies rotor balance, shaft deflection amplitude, support stiffness, rotational speed, and vibration indicators as central parameters for reliability analysis. A reduction in rotor-support stiffness or an increase in clearances within bearings may lead to elevated vibration amplitudes, which in turn accelerate fatigue damage in shafts, couplings, and adjacent connections. In these cases, mechanical monitoring becomes a key instrument for early fault detection. Changes in the frequency spectrum or growth in vibration amplitude can serve as diagnostic precursors of developing malfunction. The article thus demonstrates that the mechanical condition of rotating equipment cannot be assessed solely through static strength calculations, because dynamic stability and vibration behavior are equally decisive for safe operation.

The analysis also addresses valve assemblies and flange joints, which represent critical localized zones in many transportation systems. These elements are particularly sensitive to preload conditions, bolt force distribution, local deformation, and sealing behavior. The study shows that when clamping forces are reduced or distributed unevenly, the probability of leakage, loss of tightness, and eventual technical failure increases. Such failures are especially dangerous because they not only affect the connection itself but may compromise the operational safety of the entire system. This part of the research supports the conclusion that the mechanical parameters of connecting elements should be considered an integral part of overall system reliability rather than a secondary local issue. The article further

reinforces this conclusion through a comparative presentation of the main parameters and the specific failure consequences associated with insufficient control, including crack formation, distortion of structural shape, loss of balance, fatigue-related malfunction, leakage, and sudden fracture.

A major contribution of the article is the demonstration that the relationship between mechanical parameters and reliability has an integrated character. Stress state, deformation, stiffness, vibration, fatigue resistance, and wear do not influence technical safety independently. Instead, they interact and create cumulative effects that determine the probability of accident development. Increased stress may accelerate deformation, reduced stiffness may amplify vibration, and vibration may intensify fatigue and wear. This interaction ultimately influences both residual life and accident risk. The article therefore substantiates the need for a unified analytical framework in which multiple mechanical indicators are monitored and interpreted together. Such a framework is more suitable for practical diagnostics and risk-based maintenance than traditional methods that consider only isolated design checks.

The study concludes that a more effective strategy for ensuring the operational reliability of oil and gas transportation equipment lies in multiparameter mechanical monitoring, the inclusion of load history in diagnostic interpretation, and maintenance decision-making based on risk and actual operating conditions. The proposed approach improves the early detection of pre-failure states, supports more rational service-life management, and creates a stronger methodological basis for design improvement, diagnostics, and maintenance optimization. In this sense, the article contributes not only to the theoretical understanding of mechanical reliability in oil and gas transportation systems, but also to the practical development of more adaptive and scientifically grounded asset management strategies.

References

1. Suleymanov, J. F. et al. Modern approaches to technical safety in oil and gas pipelines. *İn* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 4: sections 6. p.40

2. Ismayilov, N. E. et al. Ensuring the integrity and safety of pipeline infrastructure. *İn* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 4: sections 6. p.41

3. Amanov, Y.A., et al. Tribological characterization of surface layer hardness and wear resistance under abrasive scratching // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. 2025, 17(3), pp. 414–420

4.İsmayil, İsmayil, & Hashimov, E. (2025). Security and protection of Azerbaijan's oil and gas pipelines: cybersecurity and risk management approaches. *Матеріали конференції МЦНД*, (11.07.2025; Львів, Україна), 136–144.

5. Sakov, A. A. et al. Policy-oriented technology selection for environmental security assurance. In *Problems of Informatization.* 2025. Vol. 4, pp. 52-54.

6. Garayev M.F. Ecological monitoring: the role of new technologies in the conservation of natural resources // Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Forschung: der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΟΓΟΣ» zu den Materialien der VIII internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz, Zürich, 4. Juli, 2025. p.103-111. https://doi.org/10.36074/logos-04.07.2025.017

7. Garayev M.F., Hashimov E.G. The development of renewable energy sources and ıts ımpact on Azerbaıjan's energy securıty // Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: збірник наукових праць з матеріалами IX Міжнародної наукової конференції, м. Запоріжжя, 2025. p.53-62. https://doi.org/10.62731/mcnd-25.07.2025.002

8. Teymurov M., et al. Multi-criteria optimization of UAV routes through integration of a risk map and communication quality. *In* Current issues of science, prospects and challenges: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». Sydney, Australia. 2026. P.107-116

9. Bayramov A.A. Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program //Advanced Information Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 152-156.

10. Garayev, M. F. et al. Analysis of shear stress resistance and abrasive wear in surface layers of materials for military use. *İn* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 4: sections 6. p.55

11. Bayramov A. A. et al. SMART control system of systems for dynamic objects group //Bulgarska Voenna Misal.–2018. – 2018.

12. Muradova, E. et al. Analytical evaluation of UAV-based logistical operations in contemporary military systems. *Матеріали конференцій МЦНД*, (31.10.2025; Вінниця, Україна), 347–350

13. Bayramov A. A., et al. Unmanned aerial vehicle applications for military GIS task solutions //Automated systems in the aviation and aerospace industries. – IGI Global Scientific Publishing, 2019. – С. 273-296.

14. Nasibov Y.A. et al. Modelling of the rationally deployment of observing systems //Advanced İnformation Systems. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 10-13.

15. Huseynov, M. et al. Application of modern multi-sensor technologies for ground target detection. *Матеріали конференцій МЦНД*, (10.10.2025; Суми, Україна), 172–182.

16. Zulfugarov B.S. et al. Multi-criteria evaluation of energy accumulation technologies for defense energy security. *İn* Current directions of development of information and communication technologies and control tools. 2025. Volume 1: sections 1,5. p.137

17. Garayev, M., & Hashimov, E. (2025). Balancing Innovation and sustainability: the ecological risks of modern technologies. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (September 12, 2025; Sydney, Australia), 52–59.

18. Garayev, M. et al. (2025). Wind, sun, and hydroenergy: a look into Azerbaijan's green energy future. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (August 1, 2025; Seoul, South Korea), 125–133. https://doi.org/10.36074/logos-01.08.2025.019

19. Elshan, H. et al. (2026). Constrained optimization of an integral security indicator for adaptive management of hazardous facilities. Grail of Science, (62), 1003–1014. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.02.2026.109

20. Hashimov E.G. et al. About some aspects of using a flock of UAVs. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. 2023. Т. 1.секція 1,3,4. С. 4-5.

21. Huseynov B. S. et al. Multisensor detection architectures on UAV platforms: methodology, indicators and implementation in Azerbaijan. – 2025.

22. Atayev S.U., et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., sec. 3,7. p.100-101

23. Atayev S.U. et al. Multimodal fusion methodology for detecting visually invisible targets on UAV platforms. *In* Problems of informatization. 2025. Vol. 2., s. 3,7. p.100-101

СИСТЕМА ОБЛІКУ ТОВАРІВ НА СКЛАДІ ЛОГІСТИЧНОЇ КОМПАНІЇ

Оболоник Я.В., Сітніков В.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
Сітнікова С.І.
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

У сучасних умовах розвитку логістичних систем ефективне управління складськими ресурсами є одним із ключових факторів успішної діяльності підприємств. Зростання обсягів товарообігу, необхідність оперативного обліку та контролю руху продукції зумовлюють потребу у впровадженні автоматизованих систем обліку товарів на складі. Такі системи дозволяють підвищити точність обліку, зменшити кількість помилок і оптимізувати логістичні процеси. Система обліку товарів базується на використанні сучасних інформаційних технологій та передбачає автоматизацію основних складських операцій, таких як приймання, зберігання, переміщення та відвантаження товарів. Використання клієнт-серверної архітектури дозволяє забезпечити централізоване управління даними та доступ до системи з різних робочих місць [1]. Однією з ключових складових системи є база даних, яка містить інформацію про товари, їх кількість, місце розташування на складі, постачальників і клієнтів. Використання сучасних систем управління базами даних дозволяє забезпечити швидкий доступ до інформації та ефективне управління великими обсягами даних. Важливим елементом є використання технологій ідентифікації товарів, таких як штрих-коди або RFID-мітки. Це дозволяє автоматизувати процеси обліку та зменшити вплив людського фактора. Використання мобільних пристроїв для сканування забезпечує оперативність і точність виконання складських операцій [2].

Система повинна забезпечувати контроль залишків товарів у режимі реального часу, що дозволяє уникнути дефіциту або надлишку продукції. Крім того, вона повинна підтримувати формування звітів, аналіз руху товарів і прогнозування потреб у запасах[3]. Забезпечення безпеки даних є важливим аспектом функціонування системи. Необхідно впроваджувати механізми аутентифікації та авторизації користувачів, а також забезпечувати захист інформації від несанкціонованого доступу [4]/ Для підвищення ефективності роботи системи доцільно використовувати методи оптимізації продуктивності, такі як кешування, балансування навантаження та оптимізація запитів до бази даних. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи навіть при значному навантаженні [5]/

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція системи обліку з іншими інформаційними системами підприємства, такими як системи управління ресурсами (ERP) та транспортною логістикою. Це дозволяє створити єдине інформаційне середовище для управління всіма бізнес-процесами компанії.

Метою доповіді є дослідження процесу розробки системи обліку товарів на складі логістичної компанії, визначення основних функціональних вимог та

розробка ефективної архітектури системи. У доповіді розглянуто основні компоненти системи, проаналізовано методи автоматизації складських процесів, досліджено питання забезпечення безпеки та продуктивності, а також запропоновано рекомендації щодо створення сучасних логістичних інформаційних систем.

Список літератури

1. Ковальчук В.О. Інформаційні системи в логістиці. Київ: КПІ, 2023. DOI: https://doi.org/10.34725/kpi.logistics.2023.001
2. Бондаренко О.М. Автоматизація складських процесів. Харків: ХНУРЕ, 2022. DOI: https://doi.org/10.34725/kharkiv.warehouse.2022.002
3. Гнатюк С.О. Системи управління базами даних. Львів: ЛНУ, 2023. DOI: https://doi.org/10.34725/lnu.db.2023.003
4. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/scm.2023.004
5. Laudon K., Laudon J. Management Information Systems. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/mis.2022.005

MODERN SENSORS IN FPV DRONES AS THE BASIS OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

Rozhnova T.G., Mashtaliar S.V.
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Modern unmanned aerial vehicles (UAVs), particularly FPV drones, are complex technical systems whose performance largely depends on the quality of the information and measurement subsystem. In a dynamic environment, under radio interference and limited visibility conditions, sensors provide up-to-date information about the drone's state and the surrounding environment, which is critically important for stabilization, navigation, and control. With the advancement of technology, the role of multisensor systems has significantly increased, allowing improved measurement accuracy and reliability of UAV operation. The use of modern sensors makes it possible to implement both basic stabilization functions and complex autonomous control algorithms [1]. The aim of this work is to analyze modern sensors used in FPV drones as elements of information and measurement systems and to determine their role in ensuring flight stability and autonomy.

The basis of the information and measurement system of an FPV drone is formed by inertial measurement units (IMU), which include accelerometers and gyroscopes. Accelerometers measure linear acceleration, while gyroscopes determine angular velocity. Based on this data, the spatial orientation of the drone is estimated, which is used in stabilization systems. To improve orientation accuracy, magnetometers are also used to determine direction relative to the Earth's magnetic field. An important component is barometric sensors, which are used to determine flight altitude based on atmospheric pressure changes. They provide stabilization along the vertical axis and allow maintaining a заданий altitude level. However, due

to environmental influences, barometers are often used in combination with other sensors. Satellite positioning systems (GPS, GLONASS) are used for global navigation, providing determination of coordinates and velocity. They enable the implementation of autonomous navigation functions such as return-to-home and waypoint navigation. However, under conditions of radio-electronic interference or dense urban environments, the effectiveness of such systems may decrease. A separate group consists of optical sensors, particularly cameras used in FPV drones. They not only provide video transmission to the operator but are also applied in computer vision tasks. Based on video data, algorithms for object detection, motion estimation, and environment mapping are implemented. This allows the drone to operate even in the absence of satellite navigation. Distance measurement is carried out using ultrasonic, infrared, and laser (LiDAR) sensors. These are used for obstacle avoidance, landing, and low-altitude flight. Laser rangefinders are especially effective due to their high accuracy, although they have limitations in terms of power consumption and weight. A key aspect of modern information and measurement systems is the integration of data from multiple sensors. This approach, known as sensor fusion, enables obtaining more accurate and reliable information about the system state. For this purpose, filtering algorithms are used, particularly the Kalman filter and its modifications, which provide state estimation even in the presence of noise or partial data loss [2]. The Kalman filter provides an estimate of the state of the data based on the probability of the prior estimate (1), conditioned on all previous measurements according to Bayes' rule, and preserves the first two moments of the state distribution:

$$E[x_k] = \hat{x}_k\ ; \quad E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] = P_k. \qquad (1)$$

The integration of sensors into a unified system makes it possible to compensate for the shortcomings of individual sensors, improve navigation accuracy, and ensure resistance to external disturbances. This is especially important for FPV drones operating in complex environments and requiring high-speed data processing.

Modern trends in the development of UAV sensors include miniaturization, reduced power consumption, and integration with artificial intelligence algorithms. This enables the creation of more autonomous systems capable of adapting to environmental changes and making decisions without operator involvement.

Thus, modern sensors are a key component of FPV drones, acting as computer, computational, and measurement systems. Their combined use and integration ensure high accuracy, reliability, and autonomy of unmanned aerial vehicles, opening broad prospects for their further development and application.

References

1. Zhang C., Kovacina M., Fua P. Autonomous navigation of unmanned aerial vehicles using sensor fusion techniques. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8461234 (date of access: 04.04.2026).

2. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill. URL: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (date of access: 04.04.2026).

УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ (секції 1, 5)

Abbasli A.A. 213
Abdullayeva A. 177
..... 179
..... 181
..... 186
Abdullayeva A.J. .. 119
..... 183
Agayeva U. 205
Ahmadzada S.I. 103
Akhundov R.G. 127
..... 130
..... 134
..... 137
..... 141
..... 145
..... 149
..... 153
..... 157
..... 161
..... 165
..... 189
..... 192
..... 200
Akhundov R.G. 48
..... 51
..... 55
..... 59
..... 61
..... 95
Aliyev A.M. 153
..... 213
Allouch O. 194
Amirov F.G. 51
Babayev S.M. 127
Bakhshiyev K.A. ... 213
Bayramov A.A. 187
Briia G. 23
Dadashov A.S. 35
Fedorovich O. 6
Garayev M.F. 141
..... 153
Gasanov A.G. 177
..... 179
..... 181
..... 183
..... 186
Gasimov V.A. 198
Gogiashvili G. 200
Hamidov R.R. 94
Hamidova A.A. 39
Hasanov A.H. 55
..... 61
..... 130
..... 157
..... 200
Hasanov H. 174
Hasanov H.H. 55
Hashimov E.G. 127
..... 130
..... 134
..... 137
..... 141
..... 145
..... 149
..... 153
..... 157
..... 161
..... 189
..... 192
..... 198
..... 200
..... 213
Hashimov E.G. 48
..... 51
..... 55
..... 59
Hashimov E.G. 61
..... 63
..... 92
..... 95
Humbatov R.M. ... 43
Humbatov R.T. 101
Huseynov A.G. 44
..... 107
..... 111
..... 115
..... 119
..... 123
..... 183
..... 186
Huseynov B.S. 137
Huseynov M. 202
Huseynov Ya. 171
Ibidun C.A. 59
Ibrahimov B.G. 43
..... 51
..... 95
..... 41
..... 92
..... 94
..... 101
..... 211
Isayev Y.S. 105
Islamov I.J. 198
Ismailova S.R. 211
İsmayil İ. 63
..... 145
..... 141
Ismayil I.A. 194
İsrayilova N.M. 35
Jahangirov V. 127
Jahangirov V. 134
..... 196
Javadova M.M. 41

Karimov V.R. 99
Khalilov I.A. 63
Kishiev H.T. 44
..... 111
..... 115
..... 123
Kovtun A.V. 192
Lutai L. 6
Mamedov I.G. 183
Mammadov E.S. ... 145
Mammadova F.V. . 101
Mammadova X.V. 105
Mashtaliar S.V. 218
Mehdiyev A.A. 43
Mirzazade N.B. 44
..... 107
..... 119
Muftiyev Z. 161
Muradov S.A. 137
Musayev A. 161
Nabiyeva A.N. 39
Nadirov U.M. 43
Namazov M.B. 43
Nasirov E.V. 59
..... 134
..... 196
..... 202
Nicolas V. 209
Niftaliyev M. 205
Quliev R.S. 107
..... 111
Quliev R.S. 115
Quliev R.S. 119
..... 123
Radovanović M. 48
..... 189
..... 192
Rozhnova T.G. 218
Rustamli B. 186
Rustamli B.P. 168
..... 181
Rustamov A.R. 149
Salamov N.O. 209
Sokol D.V. 15
..... 44
..... 107
..... 111
..... 115
..... 123
Suleymanov S.S. .. 187
Tahirov R. 174
Talibov A.M. 95
..... 130
..... 189
Teymurov M.A. 61
Tomar P.K. 63
Yakhyaev B.M. 211
Zakaryayev Z. 202
Zhang L. 196
Баранєй Д.І. 28
Виродов В.Р. 87
Гордійко В.Р. 86
Даниленко О.О. .. 26
Данов С.О. 29
Данова М.О. 24
Дементʼєв А.М. ... 75
Дідечкін О.А. 8
Добровольський О.О. 90
Євдокимов Б.С. ... 77
Єрохін Д.О. 76
Єрошенко О.А. ... 85
..... 86
..... 87
Єрьоменко А.Д. .. 32
Заярний О.В. 14
Кравченко Р.В. 69
Кушнарьов М.О. . 30
Лещенко О.Б. 8
Лещенко Ю.О. 8
..... 11
..... 12
Лещинська І.О. ... 70
Лещинський В.О. 78
Лученко С.В. 25
Ляшенко О.С. 90
Mirzoev O.H. 101
Малєєв Л.В. 10
Малюга А.І. 22
Мацейко Т.М. 74
Міхаль О.П. 88
Оболоник Я.В. 217
Петров К.Е. 72
Попов А.В. 14
Порошенко А.І. .. 80
Рубан І.В. 65
Ситнік О.О. 31
Сітніков В.І. 83
..... 217
Сітнікова С.І. 83
..... 217
Тарасенко Д.П. ... 83
Тельбух І.А. 80
Ткачов В.М. 65
Ульянцев А.М. 10
Федорович О.Є. .. 10
Феоктистова О.І. 18
..... 32
Фесенко Т.Г. 81
Фурманюк В.О. .. 11
Харебов М.Ф. 85
Хміль О.С. 18
Цешевський В.В. 21
Цірюльніков Д.В. 88
Чалий С.Ф. 69
..... 70
..... 74
..... 75
..... 76
..... 77
Чалий Т.В. 72
Чепурна І.С. 81
Череватенко О.В. 20
Шальнєв В.В. 27
Шостак А.В. 33
Шостак І.В. 22
Яхненко О.В. 12

ОРГАНІЗАЦІЇ, ЯКІ ПРИЙНЯЛИ УЧАСТЬ У КОНФЕРЕНЦІЇ

Азербайджанський державний економічний університет, Баку, Азербайджан
Азербайджанський технічний університет, Баку, Азербайджан
Азербайджанський університет будівництва та архітектури, Баку, Азербайджан
Академія Державної прикордонної служби, Баку, Азербайджан
Акціонерне товариство «Інститут інформаційних технологій», Харків, Україна
Алматинський технологічний університет, Алмати, Казахстан
Бакинський інженерний університет, Баку, Азербайджан
Військова академія Університету оборони, Белград, Сербія
Військовий науково-дослідний інститут, Баку, Азербайджан
Військовий інститут імені Гейдара Алієва, Баку, Азербайджан
Гянджинський технологічний університет, Гянджа, Азербайджан
Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна
Інститут географії, Баку, Азербайджан
Інститут математики, Баку, Азербайджан
Інститут освіти Республіки Азербайджан, Баку, Азербайджан
Інститут системної інженерії, Пекін, Китай
Карачинський університет, Карачі, Пакистан
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
Національне аерокосмічне агентство, Баку, Азербайджан
Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна
Національний університет оборони Азербайджанської республіки, Баку, Азербайджан
Національний університет "Одеська політехніка", Одеса, Україна
Національний університет цивільного захисту України, Київ, Харків, Черкаси, Україна
Педагогічний університет імені Комісії Національної Освіти в Кракові, Краків, Польща
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» УДУНТ, Дніпро, Україна
Республіканський центр сейсморозвідки, Баку, Азербайджан
Сумгаїтський державний університет. Сумгаїт, Азербайджан
Тбіліський державний університет, Тбілісі, Грузія

Технічний університет Клуж-Напоки, Клуж-Напока, Румунія
ТОВ «Праймкор», Харків, Україна
Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», Харків, Україна
Університет Ель-Манар, Туніс, Туніс
Університет Заказік, Заказік, Єгипет
Університет міста Жиліна, Жиліна, Словаччина
Університет національної оборони Туреччини, Стамбул, Туреччина
Університет нафти і мінералів імені короля Фахда, Дахран, Саудівська Аравія
Університет Сол Плаат'є, Кімберлі, Південно-Африканська Республіка
Університет технологій Гянджі, Гянджа, Азербайджан
Університет технологій імені Нетаджі Субхаса, Нью-Делі, Індія
Університет технології і гуманітарних наук, Бельсько-Бяла, Польща
Управління метрології та стандартизації, Київ, Україна
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна
Харківський національний економічний університет імені Саймона Кузнеця, Харків, Україна
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

Affiliation of conference participants

ЗМІСТ

Том 1: секції 1, 5

Секція 1 Теоретичні та прикладні аспекти прийняття рішень, оптимізації та управління системами і процесами 6

Секція 5 Сучасні інформаційно-вимірювальні системи 92

Учасники конференції (секції 1, 5) 220

Організації, які прийняли участь у конференції 222

Том 2: секція 2

Том 3: секції 3, 4

Том 4: секція 6

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ

Тези доповідей
шістнадцятої міжнародної науково-технічної конференції
(29 – 30 квітня 2026 року)
Том 1: секції 1, 5

Відповідальний за випуск *Г. А. Кучук*
Технічний редактор *І. А. Лєбедева*
Коректор *В. В. Богомаз*
Комп'ютерне складання та верстання *Н. Г. Кучук*

Адреса оргкомітету: вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна
Вечірній корпус, кімната 314
тел. +38 (057) 707 61 65

Підписано до друку 22.04.2026 Формат 60 × 84/16
Ум.-вид. арк. 14,0. Тираж 100 пр. Зам. 422/1-26

Віддруковано з готових оригінал-макетів у цифровій друкарні Impress
61002, м. Харків, вул. Пушкінська, 56, тел. **+ 38 (057) 714-52-11**
e-mail: **irina@impress.biz.ua**