

ISSN 3083-6573 Print
ISSN 3083-6581 Online

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

IT&S INFORMATION TECHNOLOGIES SYSTEMS

6⁽⁶⁾
2025

TOPICS

- **MODELLING
EVOLUTIONARY CYBERNETICS**
- **DIGITAL-ANALOGUE
PROGRAMMABLE
MYOELTRIC STIMULATOR**
- **NEXT-GENERATION INTERNET
TRANSPORT PROTOCOLS**

Editor-in-Chief: O.M. KHIMICH, (Kyiv, Ukraine)

Deputies Editor-in-Chief: O.Ye. VOLKOV, (Kyiv, Ukraine),
Ye.A. SAVCHENKO-SYNIKOVA, (Kyiv, Ukraine)

Editorial Board: Ali Abbasov Mammad oglu (Baku, Azerbaijan); O.Yu. Azarkhov (Dnipro, Ukraine); I.Ye. Andrushchak (Lutsk, Ukraine); A.V. Anisimov (Kyiv, Ukraine); I. Vlahavas (Thessaloniki, Greece); W. Wojcik (Lublin, Poland); D.O. Volosheniuk (Kyiv, Ukraine); A.M. Hlibovets (Kyiv, Ukraine), O. Gorbunovs (Riga, Latvia); V.F. Gubarev (Kyiv, Ukraine); L.F. Gulyanytskyi (Kyiv, Ukraine); A.M. Gupal (Kyiv, Ukraine); V.V. Zosimov (Odesa, Ukraine); P.I. Kohut (Dnipro, Ukraine); L.M. Kozak (Kyiv, Ukraine); S.L. Kryvyu (Kyiv, Ukraine); V.I. Lytvynenko (Kherson, Ukraine); R. Martínez Béjar (Murcia, Spain); O.V. Palagin (Kyiv, Ukraine); S.L. Pogorilyu (Kyiv, Ukraine); N. Prokofyeva (Riga, Latvia); B. Savchynskyy (Heidelberg, Germany); A.-B. M. Salem (Cairo, Egypt); K.M. Synytsa (Kyiv, Ukraine); V.S. Stepashko (Kyiv, Ukraine); I.V. Surovtsev (Kyiv, Ukraine); L.S. Fainzilberg (Kyiv, Ukraine); A.O. Chykriy (Kyiv, Ukraine); M.I. Schlesinger (Kyiv, Ukraine)

Responsible Executor: H.O. Pezentsali

Editors: N.A. Charchiyan, A.Yu. Vitchenko, O.O. Lysenko

Computer Group: O.V. Tupalskiy, N.S. Stashkova

Media ID R30-05899

Editorial address: Institute of Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Hlushkova Akd. ave., Kyiv, 03187
phone: +380 (44) 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
<https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its>

Головний редактор: О.М. ХІМІЧ (Київ, Україна)

Заступники головного редактора: О.Є. ВОЛКОВ (Київ, Україна),
Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА (Київ, Україна)

Редакційна колегія: Алі Аббасов Маммед огли (Баку, Азербайджан); О.Ю. Азархов (Дніпро, Україна); І.Є. Андрущак (Луцьк, Україна); А.В. Анісімов (Київ, Україна); І. Влахавас (Салоніки, Греція); В. Войчик (Люблін, Польща); Д.О. Волошенко (Київ, Україна); А.М. Глібовець (Київ, Україна); О. Горбуновс (Рига, Латвія); В.Ф. Губарев (Київ, Україна); Л.Ф. Гуляницький (Київ, Україна); А.М. Гупал (Київ, Україна); В.В. Зосімов (Одеса, Україна); П.І. Когут (Дніпро, Україна); Л.М. Козак (Київ, Україна); С.Л. Кривий (Київ, Україна); В.І. Литвиненко (Херсон, Україна); Р. Мартінес Бежар (Мурсія, Іспанія); О.В. Палагін (Київ, Україна); С.Л. Погорілий (Київ, Україна); Н. Прокоф'єва (Рига, Латвія); Б. Савчинський (Гейдельберг, Німеччина); А.-Б. М. Салем (Каїр, Єгипет); К.М. Синиця (Київ, Україна); В.С. Степашко (Київ, Україна); І.В. Суровцев (Київ, Україна); Л.С. Файнзілберґ (Київ, Україна); А.О. Чикрій (Київ, Україна); М.І. Шлезінґер (Київ, Україна)

Відповідальний виконавець: Г.О. Пезенцалі

Редактори: Н.А. Чарчян, А.Ю. Вітченко, О.О. Лисенко

Комп'ютерна група: О.В. Тупальський, Н.С. Сташкова

Ідентифікатор медіа: R30-05899

Адреса: Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ,
Просп. Акад. Глушкова, 40, 03187
Телефон: 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
Сайт: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its/>

Підп. до друку 18.12.2025 р. Формат 70 × 108/16. Гарн. Book Antiqua.
Ум. друк. арк. 7,70. Обл.-вид. арк. 7,81. Тираж 86 пр. Зам. № 7916

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України
01024, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS
V.M. GLUSHKOV INSTITUTE OF CYBERNETICS

INFORMATION TECHNOLOGIES & SYSTEMS

6⁽⁶⁾
2025

ACADEMIC AND RESEARCH JOURNAL
FOUNDED IN JANUARY 2025
PUBLISHED 6 TIMES PER YEAR
KYIV

CONTENTS

Theory of Information Technologies and Systems Construction

Palagin O.V., Symonov D.I., Chervynskiy M.V. Modelling Evolutionary Cybernetics: Ontology, Invariants and Design Principles 3

Digital Technologies in Learning

Synytsya K.M., Savchenko-Syniakova Ye.A., Savchenko M.Yu., Zaritskaya S.I., Tokova O.V. Preparation of Recommendations on the Selection of Educational Resources for Different Learning Styles 30

Popov I.V., Kolesnik D.I., Simakhin V.M., Semenoh R.V., Suslova T.Yu. Analysis of the Current State and Directions of Transformations of High-Tech Education in Scientific Institutions 43

Information and Communication Technologies

Bondar O.M. Analysis of Next-Generation Internet Transport Protocols: QUIC, WebTransport, HTTP/3 52

Digital Medicine

Kutsiak O.O., Matsaenko A.M., Balashov S.V., Pezentsali H.O. Digital-Analogue Four-Channel Programmable Myoelectric Stimulator "TrenKorSyntez-D" to Recover Motor Activity 64

Alphabetical Index of Authors, 2025 82

System Index of Papers Published in 2025 83

Author Guidelines 85

ЗМІСТ

Теорія побудови інформаційних технологій та системи

Palagin O.V., Symonov D.I., Chervynskiy M.V. Modelling Evolutionary Cybernetics: Ontology, Invariants and Design Principles 3

Цифрові технології в навчанні

Синиця К.М., Савченко-Синякова Є.А., Савченко М.Ю., Зарицька С.І., Токова О.В. Підготовка рекомендацій щодо вибору навчальних ресурсів з урахуванням різних стилів навчання 30

Попов І.В., Колесник Д.І., Сімахін В.М., Семенов Р.В., Суслова Т.Ю. Аналіз сучасного стану та напрями трансформацій висикотехнологічної освіти в наукових установах 43

Інформаційно-комунікаційні технології

Bondar O.M. Analysis of Next-Generation Internet Transport Protocols: QUIC, WebTransport, HTTP/3 52

Цифрова медицина

Куцяк О.А., Мацаєнко А.М., Балашов С.В., Пезенцалі Г.О. Цифро-аналоговий чотириканальний програмний міоелектростимулятор «ТренКорСинтез-D» для відновлення рухової активності 64

Алфавітний іменний покажчик авторів за 2025 рік 82

Системний покажчик статей, опублікованих у 2025 році 83

Керівництво для авторів 85

THEORY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS CONSTRUCTION

ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.003>
UDC 004.8

O.V. PALAGIN, DSc (Engineering), Professor,
Academician of the NAS of Ukraine, Deputy Director for Research,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3223-1391>
palagin_a@ukr.net

D.I. SYMONOV, PhD (Phys.-Math.),
Head of the Applied Informatics Problems Laboratory,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6648-4736>
denys.symonov@gmail.com

M.V. CHERVYNSKYI, PhD Student,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-3425-4357>
mchervynskiy@gmail.com

MODELLING EVOLUTIONARY CYBERNETICS: ONTOLOGY, INVARIANTS AND DESIGN PRINCIPLES

Evolutionary cybernetics (EC) is presented as a general discipline for steering change in technical, biological and socio-technical systems under uncertainty. Unlike classical control with fixed goals and architectures, EC assumes that goals, constraints and structures may themselves evolve. The paper contributes: (i) an ontology of EC with four levels (object, process, mechanism, meta-control) and a two-loop organization (operational vs. evolutionary); (ii) a set of cybernetic invariants-information, resource constraint, regulation, structural organization, temporality, integrity/openness, teleonomy – that summarize cross-domain regularities; (iii) a formal model of an evolutionary cybernetic system and operators for meta-level updates; (iv) methodological principles and functional requirements for engineering EC systems (modularity, guided diversity, pace orchestration, default safety, ex-ante verification

Cite: Palagin O.V., Symonov D.I., Chervynskiy M.V. Modelling Evolutionary Cybernetics: Ontology, Invariants and Design Principles. *Information Technologies and Systems*, Kyiv, 2025, Vol. 6 (6), 3–29. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.003>

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. The article is published under an open access license CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

and post audits); and (v) application tracks in socio-cybernetics, bio-/neuro-interfaces, infrastructure, and sustainability governance. Modern AI (safe RL, control-theoretic shields) and digital twins are positioned as one practical realization of the evolutionary loop rather than its essence. EC thus provides a coherent conceptual and engineering framework for the directed evolution of complex systems.

Keywords: evolutionary cybernetics; directed evolution; meta-control; two-loop control; cybernetic invariants; co-evolution; digital twins.

Introduction

The development of universal theories of control throughout the 20th century initiated the formation of an interdisciplinary approach to analyzing systems of different natures – from technical and biological to socio-technical and hybrid. A landmark event in this process was the emergence of cybernetics, formulated by Norbert Wiener as the science of control and communication in living and nonliving systems [1]. The methodological core of cybernetics was based on modeling information flows, feedback loops and invariant regulatory principles [2]. Classical cybernetic models effectively described processes of stabilization and optimization, but relied on a fixed controller architecture and predetermined objective functions [3]. In such models, changes in a system's structure were viewed as external influences rather than the result of its internal dynamics.

A significant contribution was made by Victor M. Glushkov, who developed the concept of automated control systems due to integration of cybernetic principles and algorithmic adaptation methods. His approach initiated a transition from deterministic schemes to flexible architectures. This made possible to make such systems capable of modifying their own configuration during operation. Even though this expanded the adaptive potential of technical systems, the question of evolutionary mechanisms of control structures was still outside the scope of systems analysis.

In parallel, biology formed an evolutionary paradigm based on the combination of Darwinian selection, genetics and population dynamics. This paradigm conceptualized the role of variation, heredity and selection in shaping the fitness of organisms, but it did not envision the possibility of purposeful management of evolutionary processes by the system itself. Biological models of evolution remained limited to the domain of living entities and did not account for the existence of goals in the cybernetic sense, which made their direct application to technical or socio-technical systems difficult.

An attempt to transfer evolutionary principles into the context of engineering and computer science [4–6] occurred in the second half of the 20th century thanks to the works of John Holland. The genetic algorithms he proposed and their subsequent modifications (evolutionary strategies, genetic programming) became a powerful tool for search and optimization in complex solution spaces, especially where analytical methods proved impractical and the topology of the space was highly complex. However, even in modern implementations these algorithms are oriented

primarily toward solving fixed problems, not encompassing changes in the very principles of control or the evolution of a system's goals [7–8].

In the Ukrainian intellectual tradition, the ideas of Vladimir I. Vernadsky played a significant role [9]. He viewed the noosphere as a new state of the biosphere in which scientific and engineering activity become factors of planetary evolution. Despite its philosophical character, this concept created a methodological context for studying the interaction of biological and technical processes within a single system. A further step toward establishing the theoretical foundations of evolutionary cybernetics as a new, timely branch of general cybernetic science was taken by the followers of Glushkov's and Vernadsky's ideas – scientists of the world-renowned V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine – whose research in the field of intelligent systems and hybrid control models demonstrated the possibilities of integrating logical formalisms, artificial intelligence methods and cybernetic principles in order to create systems with a high level of autonomy and coadaptation [10–13].

All of these historical facts and theoretical positions form a rich but fragmented knowledge base regarding problems of control, adaptation and optimization of systems. At the same time, a methodological niche remained open: the specification and control of goal changes, architectures and regulatory principles of the controlling structures themselves in response to variability of the external environment and the controlled object.

Therefore, the knowledge accumulated over recent decades, that includes classical control models, natural evolutionary mechanisms and artificial optimization methods, shows high effectiveness in their individual domains. However, none of these approaches managed to provide a holistic theoretical and methodological foundation, where evolutionary changes of control structures, goals and regulatory principles would be integrated elements of system dynamics. This creates prerequisites for the formation of a new level of interdisciplinary synthesis capable of overcoming existing methodological gaps and ensuring the adaptability of systems in the context of uncertainty and long-term evolutionary interaction.

1. Interdisciplinary Synthesis and Methodological Limitations of Modern Approaches

Modern science is in a stage of deep integration, where traditional disciplinary boundaries between the natural, technical and information sciences are becoming less rigid. Modeling tools initially created for describing physical or technical systems today are successfully applied in biology, cognitive sciences and economics, and methods from bioinformatics, machine learning, and network theory are increasingly implemented in the design of engineering and socio-technical systems. This process can be characterized as structural convergence – not only the borrowing of individual methods, but also the convergence of research paradigms at the

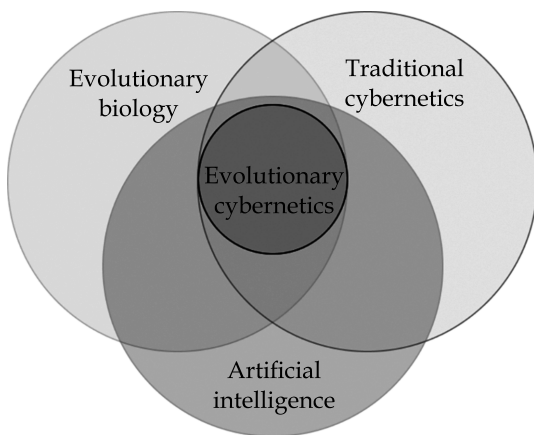


Fig. 1. The interdisciplinary position of evolutionary cybernetics in the landscape of related sciences

level of models, ontologies and types of abstractions.

Despite an intensive exchange of ideas, there is an absence of a single formalism for describing systems, capable of changing their own goals, regulatory principles and control architectures in

response to the environment. Existing approaches cover only separate aspects of this problem:

- Network models of complex systems effectively represent structural interconnections and the spread of influences, but for the most part ignore the dynamic change of the rules by which the network operates [14].
- Synergetics describes self-organization, interdisciplinary interaction and transitional processes, but does not include developed mechanisms for purposeful restructuring of system parameters [15–16].
- Evolutionary computation demonstrates high efficiency in searching for solutions in complex spaces, but its dynamics are usually constrained by predefined optimality criteria, a limitation by early structure-generating models of self-reproducing automata [17].

Fig. 1 illustrates the conceptual spot of evolutionary cybernetics among related disciplines. Evolutionary cybernetics located at the intersection of three fundamental fields: traditional cybernetics, which provides the theoretical apparatus for describing and controlling information processes; evolutionary biology, which provides mechanisms of variation, heredity and selection; artificial intelligence, which provides algorithmic and computational methods for realizing adaptive changes. The integration of these fields creates an unified formalism for modeling and controlling evolutionary processes in technical, biological, social, hybrid systems, stopping treating them as individual disciplines and forming a new scientific paradigm.

A comparison of the key characteristics of existing approaches versus the proposed direction of evolutionary cybernetics is outlined below in Table 1.

Thus, even in the interdisciplinary field of knowledge there is no unified approach that would consider the evolution of control structures as an independent, relevant scientific subject of research. This creates a methodological gap between control theories and theories of purposive change.

To fill this gap, a framework concept of directed evolution of systems is proposed, in which:

Table 1. Comparison of key features of existing approaches

Category	Traditional cybernetics	Evolutionary biology	Evolutionary algorithms (AI)	Evolutionary cybernetics (emerging field)
Object of study	Control systems and feedback loops in technical, biological and social systems	Living organisms, populations and genetic and phenotypic changes	Algorithmic models of optimization and search	Evolutionary processes in control structures, information flows and regulatory loops of systems of any nature
Type of changes analyzed	Changes in system states under a fixed structure and fixed goals	Changes in genetic information and phenotype	Changes in parameters or solution structure for a fixed problem	Changes in the control architecture, principles of regulation and the system's own goals
Scale of application	Primarily technical or bio-technical systems.	The biosphere and individual populations	Algorithmic problems and computer simulations	Technical, biological, socio-technical, bio-hybrid systems within a unified formalism
Role of evolution	Secondary, as a factor of external changes	The natural mechanism of the development of life	A method of optimization	A central control process in cybernetic terms
Goal rigidity	Goals are usually specified in advance	Goals are absent as a cybernetic concept	The objective function is fixed	Goals can evolve together with the system
Methodological foundation	Control theory, information theory	Genetics, ecology, paleontology	Computational models and stochastic methods	Integration of control theory, network dynamics, information theory, concepts of directed evolution
Unique research problems	Stability, robustness, optimal control	Description and explanation of natural evolutionary processes	Search for an optimum in a given solution space	Meta-evolution of control algorithms, symbiotic cyber-biological systems, evolutionary resilience of control loops, evolution across multiple temporal scales

- The object of research is the processes of intentional change of control structures in systems of any nature (technical, biological, socio-technical, hybrid).

- The subject is the mechanisms and algorithms for modifying control architectures, goal functions and principles of regulation under changing environments.

- The methodological basis is the integration of models from control theory, evolutionary algorithms, synergetics, network dynamics and information theory.

The key difference of this approach lies in embedding evolutionary operators (variation, selection, coadaptation, symbiosis) directly into the system's regulatory loops, making them instruments of purposeful design.

The practical implementation of this concept involves:

1. Developing a formal apparatus for describing and forecasting the dynamic change of control architectures and their goals.

2. Designing universal evolutionarily managed models suitable for technical, biological and hybrid systems.

3. Integrating with experimental platforms that allow hypotheses to be verified in multi-level environments.

Thus, the task of this new scientific field is to shift from the analysis and modeling of adaptation to the systematic design of processes of directed evolution, which opens possibilities for creating self-developing, autonomous and long-lived systems.

2. Structure and Research Trajectories of Evolutionary Cybernetics

Evolutionary cybernetics is emerging as a distinct interdisciplinary domain. Its primary objective is the synthesis of control methodologies, evolutionary mechanisms and adaptive algorithms into an unified body of knowledge. This comprehensive framework is designed to both model and facilitate the development of directed evolution across systems of diverse character. The discipline's theoretical foundation is established by integrating concepts from cybernetics, the theory of complex systems, evolutionary biology, artificial intelligence and synergetics. Unlike classical paradigms, evolutionary cybernetics regards variation, selection, coadaptation, and symbiosis as deliberately designed operators integrated into the regulatory loops of a system, rather than as spontaneous or external processes.

Structurally, the scientific field of "evolutionary cybernetics" can be presented as a set of interrelated subdivisions, each corresponding to a certain level or domain of controlled evolution:

1. Theoretical foundations of evolutionary cybernetics – the development of mathematical formalisms and conceptual models that describe the dynamics of goalchanges, architectures and principles of regulation in control structures. Particular attention is paid to informational-entropic criteria of efficiency of evolutionary processes.

2. Cognitive cybernetics – the management of processes of knowledge extraction, transformation, and use in artificial, biological, hybrid systems. Its tasks include simulating the development of cognitive architectures and decision-making protocols, harmonizing diverse knowledge streams and refining the cooperation between artificial and biological intellects. For example, the creation of intelligent agents that can learn and support during the decision-making is a part of cognitive cybernetics. Advances in this sphere allow purposeful influence on the evolution of knowledge and consciousness of both individuals and society as a whole.

3. Socio-cybernetics and organizational evolution – the study of the dynamics of social and socio-technical systems. Specifically, this research investigates the co-evolutionary patterns of agents operating in networks, the modification of governing frameworks and the use of algorithmic methods to manage collective thought processes. In terms of evolutionary cybernetics, social cybernetics is responsible for socio-cultural evolution: how societies change under the influence of new technologies, knowledge and values, and how these changes can be steered for the common good. Models of social dynamics, decision-support systems for governance, and scenarios of civilization development are developed to enable guided social transformations that take into account feedback between the economy, ecology, demography and other subsystems of society.

4. Bio-cybernetics with an evolutionary loop – the implementation of controlled evolutionary mechanisms in biological and bio-hybrid systems, including managing the evolution of microorganisms, adaptive biomedical technologies and modeling “human-machine symbiosis” systems. Bio-cybernetics also considers possibilities for the purposeful intervention in biological evolution and the development of living systems. This includes modeling processes in ecosystems, managing gene pools (through methods of genetic programming or selective breeding) and supporting the sustainable development of the biosphere. Bio-cybernetics forms the foundational basis for disciplines like synthetic biology and biomedical engineering. These applied fields, in turn, furnish the necessary instrumentation and methods required for exerting control over living systems. Additionally, this subdivision encompasses medical cybernetics – the application of cybernetic approaches in medicine and healthcare. Its contribution to evolutionary cybernetics is in managing the development of humans as bio-social systems. This involves monitoring and correcting the health state of populations, extending life expectancy and steering human evolution through medical technologies (from public health to human bioengineering). Medical cybernetics makes it possible to predict and ensure the formation of a healthy nation and to develop evolutionary strategies for human development (for example, adapting society to increasing longevity, implementing cyborgization technologies etc.).

5. Techno-cybernetics and robotic evolution is about the creation of technical systems, capable of changing their own architecture and goal functions. Directions include self-configuration of hardware and software

platforms, evolutionary design of robotic complexes and co-evolutionary learning of autonomous systems. Within the evolutionary paradigm, technical cybernetics is concerned with the evolution of the technosphere: controlling the development of network infrastructures, the Internet, artificial intelligence and technological platforms. Specifically, this involves steering the advancement of sophisticated technological platforms and AI systems. The aim is to ensure that these emerging technologies progress in alignment with pre-established objectives and rigorous safety parameters.

6. Network and infrastructure evolutionary systems involve guiding the long-term development of expansive distributed infrastructures. The core focus is on refining the topologies and functional linkages within systems like communication networks, energy grids and large transport complexes. This optimization is carried out while inherently factoring in principles of self-restoration and autonomous development.

7. Evolutionary computing in management focuses on designing algorithms specifically for implementing directed evolution. Key developments include multi-agent evolutionary methods featuring adaptive selection criteria, techniques for dynamically modifying objectives in real-time contexts, hybrid frameworks that fuse evolutionary, cognitive and network strategies. Ultimately, this area delivers the practical algorithmic instruments necessary to embed evolutionary mechanisms directly into system control loops.

8. Ethical and safety aspects involve crafting the guiding principles for the secure evolution of autonomous and hybrid systems. Key areas include developing ethical governance methods for agents whose objectives can change, alongside formulating strategies to avert scenarios of uncontrolled development. Since modifying the goals and architectures of autonomous systems presents profound ethical challenges, the work in this subdivision is dedicated to guaranteeing that system evolution remains under strict supervision and upholds elevated standards of human values.

The integration of all these sub-domains is crucial for establishing a unified field of research. Within this framework, evolutionary mechanisms are no longer merely subjects of description or simple optimization tools; they are transformed into controlled instruments for system design and progressive development. This convergence unlocks considerable potential for engineering systems that are autonomous, self-evolving and exceptionally durable. Such systems would be capable of operating successfully even when facing significant environmental uncertainty and high levels of structural change.

3. Theoretical and Methodological Foundations of evolutionary Cybernetics

3.1. Formalization of the concept of “evolutionary cybernetics”. Evolutionary cybernetics (EC) is defined as an interdisciplinary scientific area dedicated to investigating the core principles, underlying mechanisms

and various models of directed evolution within systems of diverse origins, including technical, biological, socio-technical and bio-hybrid entities. Its ontology comprises a structured system of concepts that articulates the essential entities, their properties (attributes) and the relationships required for a description and engineering of evolutionary processes. The goal of establishing this ontology is to develop an unified conceptual framework capable of harmonizing theoretical models, algorithmic methodologies and practical applications.

The multi-level structure of the EC ontology includes four interrelated levels:

- Object level – describes systems and their components (control structures, control objects, environment).
- Process level – captures the dynamics of change (operational, adaptive and evolutionary processes).
- Mechanism level – specifies the evolutionary operators (variation, selection, coadaptation, symbiosis, differentiation) and techniques used for their implementation.
- Meta-control level – outlines mechanisms for altering the rules, goals and control architectures (meta-evolution).

Within this structural framework, the central entity is the control structure, which mediates the system's interaction with the control object and the environment through two primary channels:

- Functional loop – the implementation of objective functions under current conditions, oriented toward stability and performance.
- Evolutionary loop – the modification of goals, regulatory principles and the control architecture in response to changes in the external or internal environment.

A distinctive feature of EC is the presence of a meta-level of control that allows a system not only to adapt to conditions, but also to purposefully change its own control mechanism. At this meta-level four types of changes are possible:

- Structural – involves re-architecting the system, specifically altering the organization and connections (topology) of its components.
- Functional – modifying the algorithms and operational strategies by which the system operates.
- Goal-oriented – revising or reinterpreting system's goals and criteria of optimality.
- Ontological – updating the model of the environment and the system's own role within it.

The key classes and entities of the EC ontology include:

- System – an integral entity with a specific architecture, defined functions and clear goals that interacts with its environment.
- Control structure – the subsystem responsible for establishing goals, strategies and means of control.
- Control object – a component or external entity that is the target of influence.

- Environment – the external context that dictates possible states and influences the system’s development.

- Evolutionary process – a sequence of modifications in the properties and structure of the system.

- Evolutionary operator – a formalized mechanism of change that implements variation, selection, recombination, symbiosis etc.

- Meta-evolution – the overarching process of altering the principles by which the system’s evolution is conducted.

The relationships between these entities are formalized as follows:

- The system has a control structure.

- The control structure executes evolutionary processes through evolutionary operators.

- An evolutionary process changes the system’s parameters, architecture and goals.

- The environment influences the evolutionary process and is in turn changed by it (co-evolution).

- Meta-evolution adjusts the evolutionary operators and determines new goals.

Attributes of the key concepts include:

- System: measured by the size of its state space (dimensionality), level of autonomy, time scales of response.

- Environment: characterized by the pace of change, stochasticity, structural complexity.

- Evolutionary operator: described by its operational speed, scope of changes, probabilistic characteristics.

- Meta-evolution: defined by the frequency of updates, degree of predictability, impact on system stability.

In essence, the ontology of evolutionary cybernetics functions as a conceptual blueprint for the entire subject area. It effectively integrates the description of system structures, processes and change mechanisms into a single, cohesive body of knowledge. The implementation of this ontology creates a basis for the mathematical formalism and algorithmic solutions that will be considered in subsequent sections.

3.2. Paradigms of evolutionary cybernetics. Establishing a new scientific direction requires clearly defining its methodological orientations. The paradigms of evolutionary cybernetics reflect fundamental tenets that outline its differences from classical cybernetics and related disciplines. They set the conceptual boundaries within which the analysis and design of directed evolutionary processes unfold.

- Directed evolution as a subject of control. Evolution is viewed not as an external backdrop, but as a target object of control: not only the states of the system change, but also its rules, architectures and goals. This extends classical cybernetics beyond stabilization/optimization to the construction of developmental trajectories for systems of different natures.

- Two-loop control. Besides the functional loop (operational implementation of current goals), there exists an evolutionary loop that read-

justs goals, architecture, criteria and control procedures. This organization provides closed feedback both at the level of action and at the level of changing the “rules of action”.

- Meta-control (meta-level). Beyond parameter adaptation, there is a level for changing the rules of adaptation: selecting evolutionary operators, their intensity, update frequency and safety constraints. This enables the self-development of the control subsystem in response to changes in the object, environment and value-goal framework.

- Co-evolution with the environment. The system and the environment mutually shape one another. Therefore, appropriate goals and strategies should minimize structural misfit between the control architecture and the environment’s dynamics, maintaining co-ordinated development.

- Multi-levelness and multi-scalability. Evolutionary changes occur at different levels of organization (components, architecture, goals, ontology) and on different time scales (operational, tactical, strategic, civilizational). The synchronization of these scales is a prerequisite for sustainable development.

- Informational adequacy and reflection. The effectiveness of evolutionary control depends on sufficient observations and the quality of ontologies. These ontologies represent the system’s internal models of the external environment and its self-representation. Reflexive correction of the system’s representations of the world is as important as changing its structure or goals.

- Built-in safety and ethics. Since the goals and rules themselves change, safety constraints and normative frameworks must be integrated into the evolutionary mechanisms (fail-safes, corridor constraints, prevention of undesirable attractor scenarios).

Thus, the paradigms of evolutionary cybernetics are not merely an expansion of the classical cybernetics toolkit. They form a holistic conceptual foundation that allows integrating heterogeneous mechanisms – from biological to socio-technical – into a single field of study. These principles guide researchers toward a long-term vision of system development and create the necessary conditions for a new scientific paradigm centered on directed evolution.

3.3. Principles of evolutionary cybernetics. The operation of any scientific discipline relies on a set of principles that establish its internal logic and define its scope of application. For evolutionary cybernetics, these tenets serve not only as regulative propositions but also as methodological benchmarks that consolidate approaches to describing, analyzing and designing systems with directed evolution. They reveal mechanisms for combining classic cybernetic ideas with the unique characteristics of evolutionary processes, establishing the groundwork for a cohesive scientific paradigm.

1. Principle of feedback (on three levels). Feedback loops function at the operational level (stabilization and deviation correction), at the evolutionary level (controlling the intensity of variation/selection, main-

taining diversity) and at the meta-level (revising rules and criteria when the gap between expected and actual evolutionary progress becomes significant). This three-layer closure ensures alignment of short-term and long-term behavior and reduces the risk of “jamming” in local optima.

2. Principle of shaping the evolutionary trajectory. The evolutionary trajectory is not merely observed but actively designed: desired properties of future states, corridors of acceptable evolution, milestones and a policy for the rate of change are specified. This includes (1) choosing the style of evolution (smooth incremental change vs. abrupt phase transitions), (2) controlling the speed (acceleration/deceleration) and (3) mechanisms to prevent undesirable attractors (“safety rails”). As a result, evolution ceases to be a “post-factum adaptation” and becomes a purposeful process with predictable navigation.

3. Principle of self-development of the control subsystem. The control structure evolves together with the object and environment: it revises goals, criteria, algorithms and architecture while maintaining operational functionality during reconfiguration (“graceful” evolution). Self-development requires: (1) internal modularity (to change parts without stopping the whole system), (2) metrics of meta-effectiveness (evaluating the quality of the changes themselves), (3) mechanisms for rollback and counterfactual testing of alternative designs.

4. Principle of co-evolutionary coherence. Any local optimization that ignores mutual feedback with the ecosystem produces global dysfunctions. Therefore, performance criteria should include the impact on the environment and the environment’s feedback, and also support an ecology of diversity (diversification of strategies) that enhances evolutionary resilience under changing conditions.

5. Principle of multi-level goal alignment. Goals can and do evolve, but changes at lower levels (algorithms, modules) must be aligned with transformations at higher levels (architecture, value priorities, ontology). Otherwise, the system will generate goal conflicts and degraded performance.

6. Principle of informational sufficiency and reflection. Evolutionary decisions are made under uncertainty. It is necessary to maintain adequate sensory channels, models of the environment and self-models, as well as procedures for regular revision of ontologies (updating conceptions of relevant variables, relationships, constraints) in order to avoid systematic biases and the accumulation of evolutionary debt.

7. Principle of guided diversity. Resilience demands maintaining a controlled diversity of hypotheses, modules and strategies. Exploitation must be counterbalanced with exploration across time (through epochs) and across a population of agents/models. Diversity is not the ultimate objective, but a resource for successful adaptation and meaningful innovation.

8. Principle of default safety. Given that the evolutionary loop has the capacity to modify system’s objectives, safety constraints must be robust-

lyintegrated in the rules of evolution (e.g., invariants, forbidden state spaces, ethical corridors), ensuring controllability even when the system undergoes radical reconfigurations.

9. Principle of trajectory verification. Any proposed evolutionary change should undergo preliminary verification for compliance with the desired trajectory and constraints (via scenario modeling, “sandbox” environments, A/B evolution experiments), with the possibility of safe rollback.

The above principles collectively form the methodological framework of evolutionary cybernetics. They deliver normative guidance for the development of formal models, algorithmic implementations and real-world applications, avoiding reduction to isolated technical tricks. In this way, evolutionary cybernetics can function as a coherent scientific discipline, combining systemic vision, forecasting tools and mechanisms of goal-directed development.

3.4. Formal model of an evolutionary cybernetic system. An evolutionary cybernetic system (ECS) is formally defined as an ordered tuple

$$E = \langle X, U, F, G, A, H, R, \Theta \rangle, \quad (1)$$

where $X \subseteq R^n$ is the state space of the system, describing its current configuration at a given moment in time; $U \subseteq R^m$ is the space of control inputs (signals) applied to the system; $F: X \times U \times \Theta \rightarrow X$ is the dynamic evolution operator, parameterized by a vector of internal parameters Θ , that represents the change in the system’s state under the influence of control; $G: X \rightarrow Y$ is the observation operator that projects the internal state into the space of output data available for analysis; A is the set of admissible system architectures (the structural configurations of the control subsystem); $H: P \rightarrow U$ is the decision operator which, relying on the current state and/or the system’s history P , determines the optimal actions; $R: X \times U \rightarrow R$ is the utility function (objective function) that specifies the criteria for evaluating effectiveness; Θ is the set of parameters that determine the behavior of both the operational and evolutionary levels of the system.

A key feature of an ECS is the presence of a two-level control structure:

- Operational level – carries out direct management of the system’s current states in accordance with given goals and parameters.
- Evolutionary level – modifies system parameters Θ and architecture A according to the mechanisms of controlled evolution (selection, variation, recombination, symbiosis etc.).

The evolutionary level is formally described by an update operator:

$$\Theta(t+1), A(t+1) = \Phi(\Theta(t), A(t), M(t), \Xi(t)), \quad (2)$$

where $\Phi(\cdot)$ is the evolutionary operator that implements changes to parameters and/or architecture; $M(t)$ is the set of candidate models of behavior at iteration t ; $\Xi(t)$ represents random or environmental perturbations affecting the update process.

This formalism allows us to represent the integration of the evolutionary loop with the functional control loop, as outlined in subsection 3.1. It enables describing not only the stabilization of states $X \subseteq R^n$, but also the long-term transformation of the system's architecture, goals and regulatory principles.

At a conceptual level, an ECS can be viewed as a meta-system in which evolutionary operators are part of the regulatory mechanism, and the process of meta-evolution – changes in the rules and criteria of control – is integrated into the formal description. This provides the possibility of designing systems capable of autonomously modifying their own structure, which is a key prerequisite for their resilience in complex and unpredictable environments.

As a practical example, consider an adaptive relaxation protocol where a patient watches short, calming videos while sensors stream heart rate and facial EMG. The formal ECS tuple $E = \langle X, U, F, G, A, H, R, \Theta \rangle$, where X is the patient's current physiological signals (e.g., heart rate, facial EMG) plus a latent stress index; U is the parameters of the calming media (e.g., video scene selection, audio tempo); F is the parameterized model of how the patient's state X responds to the control inputs U ; G is the sensor and processing pipeline that translates raw biometric data into the formal state X ; A is the set of admissible control policies (e.g., a simple PID controller, a rule-based system, a deep reinforcement learning policy); H is the currently active policy selected from A that determines the next control U based on the state history; R is the objective function, e.g., «minimize the stress index quickly while respecting safety constraints»; Θ is the full set of parameters defining the current state of F , H and R .

In this system:

The operational loop is the policy H adjusting the control U (video/audio) in real-time to minimize the objective R (stress).

The evolutionary loop runs periodically (e.g., every n sessions) to evaluate alternative architectures A or parameters Θ using sandboxed “digital-twin” replays of past sessions. Promising variants are then promoted for live use.

The meta-control level enforces safety corridors (e.g., forbidden ranges of U), rate-limits structural changes and triggers an “ontology refresh” if the model's prediction error drifts significantly.

3.5. Methodological guidelines for designing EC systems. The development of evolutionary cybernetic systems is impossible without a clear methodological foundation that defines both the principles and the concrete approaches to their implementation. Methodological guidelines need to integrate architectural solutions, organizational mechanisms, normative principles and epistemic procedures, ensuring consistency between the operational and evolutionary levels.

- Architecturally. It is necessary to employ modular, version-controlled management structures with “hot” swappable components and separate telemetry channels for operational and evolutionary metrics.

This organization provides flexibility and fault tolerance, allows gradual integration of new elements without shutting down the system and creates conditions for tracking the effectiveness of both current actions and long-term transformations.

- **Orchestrationaly.** Policies for the pace of evolution must be defined – determining when to change rules, at what speed and on which levels. This also includes managing diversity: establishing quotas or pools for experimental variants and balancing exploitation of current solutions with exploration of new possibilities. Such measures ensure the process remains controlled and prevent both stagnation and uncontrolled dynamics.

- **Normatively.** An ex-ante system of constraints and an ex-post audit of evolutionary steps should be in place. It is also important to provide protocols for halting evolution in case of anomalies or deviations from safe corridors. These measures guarantee that the system's development adheres to established safety, ethical and societal criteria.

- **Epistemically.** It is crucial to conduct regular revisions of ontologies and criteria that determine “progress dynamics.” This avoids fixation on outdated goals, allows correction of assumptions about relevant variables and relationships and maintains coherence between the system's internal models and the dynamics of the external environment.

Thus, the methodological guidelines for designing EC systems form a multi-dimensional framework that combines technical engineering with organizational management, normative regulation and cognitive reflection. Their integration guarantees the system's integrity and resilience. This synergy makes it feasible directed evolution even under conditions of complexity, uncertainty and rapid change.

3.6. Functional requirements for control tools. Within the framework of evolutionary cybernetics, control tools must satisfy specific requirements that transcend the traditional paradigm of stabilization or optimization. These are instruments capable not only of maintaining system functionality within a dynamic environment, but also of ensuring its goal-directed development, the shaping of evolutionary trajectories and the integration of normative and epistemic demands. The key functional requirements derived from the paradigms and principles of EC are outlined below:

1. **Ensuring multi-level controllability.** Control tools should support functioning at the operational, evolutionary and meta-levels. This means being able to integrate short-term tasks with long-term objectives, as well as to coordinate parameter changes, structural modifications and the revision of value-goal orientations.

2. **Flexibility and modularity of architecture.** Control instruments should exhibit modularity, facilitate the “hot” swapping of components and offer detailed version tracking of elements. This permits the integration of new functional blocks without compromising the system's operability, thereby supporting dynamic updates in response to environmental changes.

3. Informational adequacy and telemetry. It is essential to have dedicated monitoring channels for both operational and evolutionary parameters. Control tools must collect and process data reflecting both the effectiveness of current task execution and the dynamics of the system's development. It is important to ensure regular revision of ontologies and models that represent both the external environment and the system's internal structure.

4. Orchestration of pace and diversity. Functional capabilities should include policies for the tempo of evolution: defining when rules change, the speed of transformations and the levels at which they occur. In addition, control tools should support maintaining a guided diversity of hypotheses and solutions, creating a pool of alternative strategies and balancing exploration and exploitation.

5. Built-in safety mechanisms. Given the potential for radical transformation of goals, control systems must have built-in safety mechanisms by default. This entails invariant constraints, forbidden regions of state space, ethical corridors, and emergency protocols for halting evolutionary changes in the event of threats to stability or to compliance with fundamental criteria.

6. Normative audit and control protocols. Control tools should incorporate ex-ante constraints that define the acceptable paths of development and ex-post audits to assess the advisability and safety of the changes made. Functionally, it is important to have protocols for halting or reversing evolutionary steps whenever anomalies or unforeseen risks are detected.

7. Support for reflection and self-learning. Functional requirements include the system's ability to conduct a reflective analysis of its own performance and maintain capabilities for self-learning. This means revising performance criteria, adapting models and accumulating knowledge about the results of strategies that have been applied.

Thus, the functional requirements for control tools in evolutionary cybernetics are defined by the integration of architectural flexibility, normative safety and epistemic reflection. Their fulfillment provides not only the ability to maintain the system's functionality in a complex, changing environment, but also creates conditions for its purposeful, controlled and safe development.

3.7. Formalization of evolutionary processes via mathematical modeling. Within the ontology of evolutionary cybernetics outlined in subsection 3.1, an evolutionary process is treated as an ordered sequence of changes in the parameters, architecture, goal functions and regulatory principles of a system's control structure. Unlike classical approaches, where evolution is regarded as an uncontrolled or external process, in EC it is an integrated element of the control mechanism, interacting with the functional loop and directed by the meta-level of management.

According to the formal model described in section 3.4, an evolutionary cybernetic system is represented by the tuple (1), where the operational level determines the dynamics of state $X \subseteq R^n$ in the functional

loop and the evolutionary level governs certain variables Θ , A , H and R in the evolutionary loop.

Evolutionary processes in an ECS can be formalized as dynamics in an expanded state space:

$$S(t) = (X(t), \Lambda(t)), \Lambda(t) = (\Theta(t), A(t), H(t), R(t), E(t)), \quad (3)$$

where $\Lambda(t)$ is the vector of evolutionary parameters; $E(t)$ represents environmental parameters that influence co-evolution.

Within this space, the evolutionary process can be modeled as the composition of four interconnected sub-processes. These correspond to the categories of change previously outlined in subsection 3.1:

1. Structural changes:involve the reconfiguration of the architecture $A(t)$ and topology of connections.
2. Functional changes:entail the modification of control operators $H(t)$ and the related operational procedures.
3. Goal changes:focus on updating of the utility function $R(t)$ and associated priorities of its objectives.
4. Ontological changes:correction of the environment model $E(t)$ and the ways it is interpreted.

Formally, the evolutionary dynamics is described by the operator:

$$\Lambda(t+1) = \Phi_{evo}(\Lambda(t), E(t), \Xi(t)), \quad (4)$$

where $\Phi_{evo}(\cdot)$ is the composition of evolutionary operators (variation, selection, coadaptation, symbiosis etc.); $E(t)$ is the relevant slice of information about the environment; $\Xi(t)$ denotes random or uncontrolled disturbances.

The distinguishing feature of this approach is the integration of the operational and evolutionary loops: functional changes influence the immediate performance of the system, whereas evolutionary changes affect its long-term stability, innovative potential and ability to adapt to uncertainty. The meta-level of management plays a key role, determining which evolutionary operators $\Phi_{evo}(\cdot)$ will be activated, with what frequency and within what limits.

In light of the interconnection with the environment, it is advisable to include a co-evolutionary component in the mathematical model:

$$E(t+1) = \Psi(E(t), X(t), \Lambda(t)), \quad (5)$$

which reflects the impact of the system's states and parameters on the environment and the feedback influence of the environment on the system. This allows one to formalize scenarios in which changes in the system are not only reactive but also proactively shape the conditions of its own development.

Thus, formalizing evolutionary processes within evolutionary cybernetics enables a shift from describing static or passively adaptive systems to models capable of designing their own evolutionary trajectory. This

approach lays the foundation for developing the theory and practice of directed evolution, which is the defining feature of the new scientific field of evolutionary cybernetics.

3.8. Universal laws and invariants of evolutionary processes. Synthesizing universal laws of complex system development requires introducing the concept of cybernetic invariants. There are meta-parameters that retain their validity across different contexts, including biological, social and technical domains. They serve as a basis for formalizing evolutionary laws and constructing a unified model of directed evolution.

Key invariants include:

1. Information invariant – the preservation, transmission, and transformation of information as the fundamental requirement for any development to occur. This aligns with contemporary research in information complexity theory, where evolution is interpreted as a process of enhancing a system's informational capacity.

2. Resource constraint invariant – the dependence of evolution on energy, material, and informational resources [18]. This principle is supported by models of biospheric resilience and the theory of metabolic scaling.

3. Regulation invariant – the presence of control mechanisms and feedback loops that ensure a system's adaptability and viability.

4. Structural organization invariant – the tendency toward hierarchization and the emergence of new levels of complexity, consistent with principles of nonlinear dynamics and synergetics.

5. Temporality invariant – the rhythm and speed of evolutionary shifts [19, 20], including their acceleration due to the accumulation of knowledge and technology.

6. Integrity and openness invariant – the preservation of systemic unity and cohesion through the necessity of continuous interaction and exchange with the environment.

7. Teleonomic invariant – the directedness of evolution toward achieving new goals or maintaining a certain developmental course, especially important for social and cognitive systems.

Formalizing these invariants creates a foundation for constructing universal models of controlled evolution and integral metrics of sustainable development, which could form the basis of modern programs for global risk management.

3.9. Artificial intelligence and agentic architectures as an evolutionary control layer. Building on 3.1–3.8, an AI-driven agentic layer operationalizes the evolutionary loop and meta-control by (1) re-interpreting objectives, (2) recomposing control architectures and (3) proactively planning state-space trajectories under uncertainty. Unlike fixed-rule expert systems, agentic AI supports online model revision, hypothesis generation and coordinated decision-making across interacting agents.

- Architectural role. AI agents inhabit the evolutionary loop and meta-level: they select and schedule evolutionary operators (variation, selection, co-adaptation, symbiosis), tune their intensity and cadence, run

counterfactual evaluations before promoting changes to the functional loop. Practically, this is realized by conversation-centric, tool-using multi-agent frameworks with human-in-the-loop checkpoints.

- Predictive modeling and digital twins. To verify evolutionary steps *ex ante*, the AI layer couples to digital twins and scenario simulators where agents explore candidate goals/architectures [21], stress-test safety corridors (invariants, forbidden regions of state space) and optimize multi-objective trade-offs prior to deployment.

- Safety and governance. As this layer can propose goal changes, safety must be enforced by design. Two complementary toolsets are used: (1) Safe reinforcement learning under explicit constraints (e.g., CMDP-style penalties, domain safety layers) to avoid unsafe policies [22, 23]; (2) Control-theoretic shields (control barrier/Lyapunov functions) to ensure real-time constraint satisfaction [24]. These mechanisms implement your doctrine of ethical corridors, fail-safes and emergency halts.

- Embodied/VLA control. Embodied agents and vision-language-action (VLA) models map high-level semantic goals to sequences of actions, enabling purposeful design inside regulatory loops [25]. This supports long-horizon planning, tool use and skill transfer in open-ended environments.

- Multi-agent emergence and oversight. Agent populations can demonstrate emergent conventions and unintended biases. Therefore, the meta-level is responsible for upholding norms, conducting audits, applying rate-limiters, enforcing minority-override checks and implementing diversity policies to steer collective dynamics toward desired attractors.

The practical realization of these principles requires the following functional components:

1. Dual telemetry: separate operational performance metrics vs. evolutionary metrics.

2. Gated promotion: structured deployment process, that moves agents or updates through distinct stages: from controlled sandbox/development environment → to limited staged rollout → into full production.

3. Controlled diversity: rotating agent/model portfolios.

4. Ex-ante rules & ex-post audits: invariants, forbidden states, rollback.

5. Periodic ontology/objective reviews to prevent goal drift.

Embedding an AI-driven agentic layer operationalizes the EC invariants from 3.8 in deployable form: information via world-models and persistent memory; resource constraints via compute/energy budgets and risk-aware policies; regulation via safe-RL and control-theoretic shields; structural organization via modular and population-based architectures; temporality via adaptive planning horizons and update cadence; integrity&openness via tool use and digital-twin coupling; and teleonomy via periodic objective reviews and drift metrics. With sandboxed DTs, gated promotion and ex-post audits, this layer provides a traceable path from universal laws to robust, responsibly autonomous systems across domains.

3.10. Novel contribution of this work. This paper's original contributions include: (1) The four-level ontology (object-process-mechanism-meta)

unifying biological and technical evolution; (2) Formalization of cybernetic invariants as cross-domain evolutionary laws; (3) The two-loop control architecture with explicit meta-evolution operators; (4) Methodological principles for safe EC engineering (modularity, guided diversity, pace orchestration, default safety); (5) Integration framework positioning AI/DT as realization mechanisms rather than definitional elements of EC.

Prior work (Vernadsky, Glushkov, Holland) provided conceptual or algorithmic fragments; while this synthesis establishes EC as a coherent discipline with formal foundations and engineering guidelines.

4. Integration with Modern Fields

Evolutionary cybernetics (EC) has significant potential for integration with the leading areas of modern science and technology, since its methodological apparatus makes it possible to describe, model and control processes that unfold in systems of any nature. Such integration not only enriches the theoretical basis of EC itself, but also creates new application areas for the fields that already have well-established research traditions.

1. Global governance and sustainable development. EC can be applied to solving planetary problems and to strategic planning of humanity's development. In particular, its methods offer tools for scenario analysis and systemic forecasting to shape strategies for humanity's survival under conditions of ecological and biospheric crises. This includes the management of major issues such as climate change, resources, demographic processes and the formulation of long-term sustainability policies. For instance, EC models can help international organizations and governments to plan development multiple decades ahead, while accounting for the complex feedbacks between the natural environment and socio-economic systems.

2. Technological evolution and NBIC convergence. The current age is characterized by the convergence of nano-, bio-, information and cognitive technologies (NBIC convergence), a trend which leads to a radical acceleration of technological progress. EC considers coordinating the development of emerging technologies from the standpoint of directed evolution – from supporting innovation and scientific research to evaluating risks from the deployment of breakthrough technologies. For example, EC can propose models of innovation management in which the development of different fields (biotechnology, artificial intelligence, nanomaterials etc.) is coordinated to achieve socially beneficial goals. Such an approach ensures the purposeful emergence and convergence of new technologies according to predefined criteria of efficiency and safety.

3. Cognitive and neurotechnologies. In the realm of cognitive neuroscience, EC can be used to build multi-level models capable of simultaneously accounting for neurophysiological mechanisms, the dynamics of neural networks and adaptive-evolutionary processes in cognitive systems. Notably, an evolutionary approach makes it possible to model not

only the stabilization of brain functions, but also the purposeful reorganization of neural network architecture under the influence of learning, trauma, or environmental change. This provides the foundation for new strategies of neuro-rehabilitation, the development of artificial cognitive agents and hybrid bio-artificial systems. In addition, opportunities arise to guide the cognitive evolution of humans at individual and collective levels – for example, through adaptive educational systems that adjust to the learner, or through the co-evolution of humans and AI, ensuring the safe and ethical integration of AI into society.

4. Biotechnologies and genomics. EC methodology can be integrated into the analysis and modeling of genomic processes, where evolutionary operators (variation, selection, coadaptation) have direct biological analogues. Formalizing these processes in a cybernetic context allows designing controlled scenarios of evolution for genetic systems, creating models of organisms' adaptive responses to environmental changes and supporting engineering biotechnological applications, particularly in synthetic biology. In this way, EC methods can aid in steering the evolution of living organisms – from genetic engineering to ecosystem management – with the goal of enhancing the resilience of the biosphere.

5. Social transformations. Socio-technical systems are examples of complex evolutionary objects in which goals, management architectures and environment mutually transform one another. EC enables the description of processes of collective adaptation, the evolution of network interaction structures, and the purposeful shaping of behavioral patterns in communities. Using evolutionary-cybernetic models, one can analyze various scenarios of social change – from the transformation of political institutions to the evolution of culture under the influence of the internet. For instance, it is possible to model how the implementation of a universal basic income or other economic innovations would influence social structure over decades. An important task is managing social changes to minimize risks (conflicts, crises) and support harmonious development. Thus, within EC, social cybernetics addresses both the analysis of current trends and the design of new social systems (e-governance, e-democracy etc.).

6. Economic systems. In economic systems, EC can provide a theoretical foundation for constructing models of markets capable of changing their own “basic rules” in response to external challenges. The evolutionary perspective allows markets to be viewed as dynamic regulatory systems with multi-level feedback adaptation, where changes in goals, mechanisms, and management architectures can be purposefully designed to sustain efficiency and stability. For example, regulators might deploy evolutionary algorithms for adaptively adjusting financial rules in response to new global trends, thereby ensuring the economy's resilience over long-term cycles.

The interaction of EC with these fields creates prerequisites for the formation of interdisciplinary platforms in which mathematical models, algorithms, and experimental environments support a unified conceptual

approach to controlled evolution. Such synergy opens the way for the creation of universal evolutionary architectures applicable in neuroengineering, biotechnology, social governance, and economic forecasting.

5. State and Prospects of Development

By 2025, evolutionary cybernetics is at the stage of forming itself as a scientific paradigm. It is still developing predominantly among systems thinkers and futurists, with initial publications appearing and conferences being held on this topic. Theoretical foundations are being laid, but ahead lies a great deal of work on the practical implementation of EC's ideas. There is growing awareness that humanity needs tools for collectively managing its own future, and evolutionary cybernetics aims to become a supplier of such tools.

To accelerate the development of this new field, steps toward its institutionalization and integration into the educational environment are important. It is proposed to establish specialized research centers and communities dedicated to evolutionary cybernetics, launch dedicated journals, and hold regular conferences. The accumulation of knowledge can be systematized by formalizing EC as a separate discipline within cybernetics or systems analysis. In parallel, there is the task of developing academic programs to train specialists of a new generation. It would be prudent for universities to introduce Master's specializations and doctoral courses in evolutionary cybernetics. Such programs could include courses in complex systems modeling, futurology, innovation management, technology ethics and more, to teach young researchers to think systemically and long-term, combining knowledge from cybernetics, ecology, sociology, IT and other fields.

An important direction for progress is deploying international research projects that demonstrate the practical value of EC approaches. For example, programs under the UN or EU could be initiated to model climate and socio-economic scenarios and projects such as a "Global Brain" (the concept of a planetary information network as a collective intelligence) or interdisciplinary studies on NBIC-technology convergence. Collaboration between scientists of different countries in such projects will lay an empirical foundation for EC and allow its approaches to be tested in practice. Moreover, closer integration of EC with the development of artificial intelligence and cognitive sciences is needed. AI can become both a subject of research (the evolution of artificial agents) and a tool for analyzing big data about system development. EC will increasingly account for the human factor — human cognitive limitations and the psychology of perceiving change — when designing strategies for directed evolution. This necessitates dialogue with the social and human sciences to address the ethical and cultural aspects of intervening in evolution.

The growth of evolutionary cybernetics calls for a comprehensive research program that integrates fundamental and applied areas. First, on

the theoretical level, it requires discovering universal laws of evolution, formalizing invariants of complex systems and developing an ontology of developmental processes, drawing on the synthesis of ideas from Vernadsky, Glushkov, Prigogine, and contemporary cognitive science. In this context, it is promising to leverage methodologies drawn from information complexity theory, nonlinear dynamics and evolutionary computation. Secondly, the applied dimension of EC is centered on creating predictive models for natural-technical and socio-economic systems. This involves employing tools from AI and big data to analyze evolutionary scenarios. Additionally, the development “life safety” indicators as an integral metric of sustainable development is important as well. A crucial component is the cognitive aspect – taking into account the role of consciousness, collective intelligence and cognitive governance. In the future, forming international consortia and national programs for directed evolution may become the foundation for a global system for monitoring and managing evolutionary processes, addressing the challenges of the 21st century.

6. Tasks and Guidelines of Evolutionary Cybernetics

The initial stage of establishing evolutionary cybernetics requires identifying the areas of its practical application where the new methodology can demonstrate tangible advantages over classical approaches. This involves not only isolated experiments, but the creation of reference examples – demonstration testbeds to validate theoretical propositions. It is important to form a portfolio of application projects in various domains: from infrastructure networks and biomedical technologies to socio-technical systems. On this basis, a corpus of benchmark problems should be assembled, in which the primary criterion is not the achievement of static goals, but the system’s ability to design and implement its own evolutionary trajectories.

Developing metrics of evolutionary resilience holds significant importance, as these allow one to distinguish mere adaptation from goal-oriented development. Examples of such metrics include the velocity and expense of system reconfiguration, the predictability of dynamics and the alignment of objectives across different organizational levels. Verifying these metrics is a prerequisite for establishing engineering standards and practices for subsequent application. In the future, this paves the way for projects such as “evolutionary digital twins” of energy systems, evolutionarily managed medical platforms, or two-loop artificial intelligence agents capable of generating and testing their own architectures.

At the same time, from the very beginning the global dimension must be considered, because evolutionary cybernetics cannot be confined to local problems. It is naturally oriented toward planetary-scale systems that unite the technosphere, biosphere and socio-cultural structures. A paramount objective involves establishing long-term goals aligned with the

principles of sustainable development, life safety, ethical responsibility and intergenerational justice. It is necessary to harmonize the pace of transformations in diverse subsystems to avoid structural imbalances between technological innovations, institutional shifts and cultural processes. On a global level, effectiveness criteria include multi-level alignment of objectives, maintaining diversification of potential development trajectories and regular revision of ontologies that determine which changes should be qualified as progressive.

In this context, artificial intelligence and its use hold a special place. Modern breakthroughs in deep learning need to be complemented by evolutionary mechanisms that can ensure self-design capability, maintenance of diversity and safety by default. The combination of “deep learning + evolutionarity” opens the prospect of creating two-loop agents that can autonomously adapt not only their parameters but also their own rules of functioning, while remaining controllable and transparent to the user.

Problem formulation in evolutionary cybernetics reflects its transdisciplinary character and practical orientation. At the theoretical and methodological level, the key task is to construct a general concept of controlled evolution that synthesizes the principles of cybernetics, evolutionary theory and cognitive sciences. The analytical and prognostic dimension entails creating models for eventuality analysis and indicators of the state of global and local systems to forecast possible trajectories of civilizational development. The applied dimension is connected with developing mechanisms of influence on social, economic and ecological processes, integrating NBIC technologies and implementing “life safety” criteria as an universal measure of sustainable development. The cognitive-social dimension is of particular importance, focusing on the evolution of consciousness, knowledge, and collective intelligence, which determine humanity’s ability to manage its own future in a coordinated way [26]. Finally, the organizational and managerial tasks are aimed at establishing national and international programs of controlled evolution, which should become a new institutional foundation for global society.

Thus, the initial tasks of evolutionary cybernetics are multi-faceted: they need to lay the theoretical foundation of this important branch of cybernetics while simultaneously being oriented toward creating applied research demonstration systems and shaping long-term global programs in which technological innovations are integrated into the broader context of civilizational evolution.

Conclusions

Evolutionary cybernetics opens new horizons for science and practice, offering a holistic vision of the directed development of humanity, society and the planet. It combines the achievements of cybernetics, evolutionary theory and the cognitive and social sciences, forming a paradigm of directed evolution. Its ideas – from Vernadsky’s noosphere to artificial intelli-

gence — are aimed at harnessing knowledge and technology for the sake of a sustainable future [27].

At the same time, this new field requires broad interdisciplinary dialogue and a responsible attitude. Directed evolution raises serious ethical questions and necessitates accounting for diverse interests and risks. The further development of evolutionary cybernetics is feasible only through close collaboration among experts from wide spectrum of fields — including cyberneticists, biologists, ecologists, sociologists, philosophers, engineers — and requires the active support of society. If successfully realized, evolutionary cybernetics could become an intellectual tool that assist humanity consciously and responsibly steer its own evolution in harmony with nature and cutting-edge technologies.

REFERENCES

1. Wiener N. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Boston: Houghton Mifflin, 1950.
2. Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. J. Wiley, New York, 1956, 501 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.5851>
3. Simon H.A. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge (MA), 1996.
4. Kauffman S.A. *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*. Oxford University Press, New York, 1995.
5. Dawkins R. *The Selfish Gene*. Oxford University Press, 1976. 240 p.
6. Margulis L. *Symbiosis in Cell Evolution: Life and Its Environment on the Early Earth*. W.H. Freeman, San Francisco 1981, 419 p.
7. Spencer H. *First Principles*. Cambridge University Press, 2009. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511693939>
8. Polanyi M. *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*. University of Chicago Press, Chicago, 1958. 428 p.
9. Vernadsky V.I. Scientific Thought as a Planetary Phenomenon. URL: <https://wumm-project.github.io/Texts/Vernadsky1938-en.pdf>
10. Palagin O.V. Information-technological means of directed evolution. *Problems of Control and Informatics*, 2021, Issue 5, 104–123. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001277103> [Accessed 25 Sep. 2025] [In russian]
11. Palagin O., Symonov D. Cybernetic model of rational world order under the paradigm of directed evolution. *Problems of Control and Informatics*, 2022, Vol. 67 (6), 54–66. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2022-6-5>.
12. Palagin O.V. Cybernetics and directed evolution. *Cybernetics and computer technologies*, 2023, Issue 1, 5–12. <https://doi.org/10.34229/2707-451x.23.1.1> [In Ukrainian: Палагін О.В. Кібернетика та керована еволюція]
13. Palagin O., Symonov D., *Towards a system approach in the program of directed evolution*, KNEU, Kyiv, 2023, 133–140. [In Ukrainian: Палагін О., Симонов Д. До системного підходу в програмі керованої еволюції] URL: <https://ir.kneu.edu.ua/handle/2010/40061> [Accessed 25 Sep. 2025]
14. Castells M. *The Rise of the Network Society*. Blackwell Publishers, Oxford, 2000, 594 p.
15. Haken H. *Synergetics*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1977. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96363-6>
16. Prigogine I. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Verso, London, 2017.
17. Von Neumann J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana (IL), 1966.
18. Georgescu-Roegen N. The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect. *Eastern Economic Journal*, 1986, Vol. 12 (1). 3–25. URL: <http://www.jstor.org/stable/40357380>

19. Heylighen F. The Self-Organization of Time and Causality: Steps Towards Understanding the Ultimate Nature of Time. *Foundations of Science*, 2010, Vol. 15, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s10699-010-9171-1>
20. Smoliar S.W. Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid [book review]. *Computer Music Journal*, 1981, Vol. 5 (3), 74–79 <https://doi.org/10.2307/3679990>
21. Mazumder A., Sahed M.F., Tasneem Z., Das P., Badal F.R., et al. Towards Next Generation Digital Twin in Robotics: Trends, Scopes, Challenges, and Future. *Heliyon*, 2023, Vol. 9 (2), Article e13359. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13359>
22. Brunke L., Greeff M., Hall A.W., Yuan Z., Zhou S., Panerati J., Schoellig A.P. Safe Learning in Robotics: From Learning-Based Control to Safe Reinforcement Learning. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2022, Vol. 5, 411–440. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-042920-020211>
23. Wachi A., Shen X., Sui Y. A Survey of Constraint Formulations in Safe Reinforcement Learning. *33rd Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2024)*, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.02025>
24. Kiss A.K., Molnar T.G., Ames A.D., Orosz G. Control Barrier Functionals: Safety-Critical Control for Time-Delay Systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2023, Vol. 33 (12), 7282–7309. <https://doi.org/10.1002/rnc.6751>
25. Driess D., Xia F., Sajjadi M.S.M., Lynch C., Chowdhery A., et al. PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model. *40th Int. Conf. on Machine Learning (ICML 2023)*, PMLR, 2023, Vol. 202. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.03378>
26. Bloom H. *Global Brain: The Evolution of Mass Mind from the Big Bang to the 21st Century*. John Wiley & Sons, New York, 2001, 370 p.
27. Appleton-Weber S. *Human Phenomenon: Pierre Teilhard de Chardin*. University Press, Liverpool, 2021, 282 p. <https://doi.org/10.2307/j.ctv3029qf0>

Received 26.09.2025

О.В. ПАЛАГІН, д-р техн. наук, професор, академік НАН України,
заст. директора з наук. роботи,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3223-1391>
palagin_a@ukr.net

Д.І. СИМОНОВ, канд. фіз.-мат. наук, зав. відділу,
Лабораторії проблем прикладної інформатики,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6648-4736>
denys.symonov@gmail.com

М.В. ЧЕРВИНСЬКИЙ, аспірант,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-3425-4357>
mchervinskyi@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ КІБЕРНЕТИКИ: ОНТОЛОГІЯ, ІНВАРІАНТИ ТА ПРИНЦИПИ ПРОЄКТУВАННЯ

Вступ. Еволюційна кібернетика (ЕК) пропонується як загальна наука керування зміною у технічних, біологічних і соціотехнічних системах за умов невизначеності. На відміну від класичної парадигми зі сталими цілями та фіксованою архітектурою регулятора, ЕК виходить із того, що цілі, обмеження й структура також можуть еволюціонувати. Ця архітектура будується на двоконтурній організації управління: операційний контур оптимізує поточну поведінку, а

еволюційно-метаконтур виконує функцію зміни та оновлення фундаментальних правил, архітектури та критеріїв ефективності системи.

Мета: (1) Сформулювати онтологію ЕК (об'єкти, процеси, механізми, метаконтроль); (2) визначити кібернетичні інваріанти (інформація, ресурсна обмеженість, регуляція, структурна організація, темпоральність, цілісність/відкритість, теленомія) як спільні закони еволюції; (3) надати принципи та функційні вимоги до систем ЕК; (4) подати формальну модель еволюційної кібернетичної системи та операторів мета-оновлень; (5) окреслити сфери застосування та дослідницьку програму.

Методи. Формалізація спирається на онтологічне моделювання та двоконтурну схему прийняття рішень. Онтологічне моделювання охоплює чотири рівні: «об'єкт – процес – механізм – метаконтроль». Крім того, запроваджуються оператори еволюційних змін, які застосовуються для модифікації параметрів, цілей та архітектури системи. Інваріанти задають загальні обмеження й критерії узгодженості через домени. Методологічні принципи охоплюють керування темпом і різноманітністю, багаторівневе узгодження цілей, рефлексивне оновлення онтологій, безпеку «за замовчуванням», а також перевірки *ex ante* і аудиту *ex post*.

Результати. Запропоновано: (1) цілісну концептуальну рамку ЕК; (2) набір принципів і вимог до інженерії систем, що здатні змінювати власні цілі та архітектуру, зберігаючи контрольованість; (3) формальну модель та операторів мета-рівня для інтеграції еволюційного контуру з функційним; (4) дорожню карту застосувань у соціо-кібернетиці, біо-/нейроінтерфейсах, інфраструктурних мережах і політиках сталості. Сучасні інструменти (напр., безпечне підкріплювальне навчання, контрольні бар'єри, цифрові двійники) розглядаються як практичні механізми реалізації еволюційного контуру, а не як обмежувальна сутність дисципліни.

Висновки. ЕК надає метатеоретичний та інженерний каркас для керованої еволюції складних систем: поєднання двоконтурного керування, інваріантів та формальних операторів мета-оновлень забезпечує керовану зміну цілей і структури з гарантіями безпеки та узгодженості у довгих часових горизонтах. Це відкриває шлях до відповідальних практик розвитку в мінливих середовищах.

Ключові слова: еволюційна кібернетика; керована еволюція; метаконтроль; двоконтурне керування; кібернетичні інваріанти; коеволюція; цифрові двійники.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN LEARNING

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАННІ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.030>
УДК 303.721;004.03142

К.М. СИНИЦЯ, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій і систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7417-1748>
ksynytsya@irtc.org.ua

Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА, канд. техн. наук,
старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій і систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4851-9664>
savchenko_e@meta.ua

М.Ю. САВЧЕНКО, геофізик, ТОВ «Аврора Геосайенсіс»,
вул. Макдональд Драйв, 3506, м. Єллоунайф, Північно-західні території,
Х1А 2Н1, Канада
<https://orcid.org/0009-0009-1749-9550>
m_savchenko@meta.ua

С.І. ЗАРИЦЬКА, наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій і систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-5014-5631>
lana_zar@i.ua

О.В. ТОКОВА, канд. техн. наук, молодш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій і систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0289-2810>
len327@ukr.net

ПІДГОТОВКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИБОРУ НАВЧАЛЬНИХ РЕСУРСІВ З УРАХУВАННЯМ РІЗНИХ СТИЛІВ НАВЧАННЯ

Запропоновано методику підготовки рекомендацій щодо вибору навчальних ресурсів з урахуванням мети та різних стилів навчання: аудіо, відео, текстовий тощо. Навчання впродовж життя стає все більш популярним, оскільки дає змогу навчатися людям різного віку з різною метою як для отримання диплому, так

Цитування: Синиця К.М., Савченко-Синякова Є.А., Савченко М.Ю., Зарицька С.І., Токова О.В. Підготовка рекомендацій щодо вибору навчальних ресурсів з урахуванням різних стилів навчання. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2025, Том 6 (6), 30–42. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.030>

© Publisher РН «Akademperiodyka» of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

і просто для відновлення знань з деяких дисциплін. Для урахування стилів навчання обрано модель Фелдера-Сільвермана, яка описує чотири шкали, що визначають переваги учнів у навчанні. Запропоновано структурну схему рекомендаційної системи, яка дасть змогу готувати такі рекомендації під час навчання впродовж життя з урахуванням накопиченого досвіду навчання в подібних ситуаціях.

Ключові слова: електронне навчання, навчання впродовж життя, безперервне навчання, рекомендаційна система, стиль та мета навчання.

Вступ

Електронне дистанційне навчання нині є достатньо популярним, оскільки дає змогу навчатися людям різного віку в зовсім різних умовах, що особливо актуально зараз для України. Персоналізація побажань кожного учня щодо стилю, за яким він би хотів навчатися, зробила б навчання комфортнішим, що підвищило б якість самого навчання.

Зараз в Інтернеті є велика кількість матеріалу і для самостійного навчання, і як допомога під час навчання в різних закладах освіти. Але вибір зручних ресурсів для такого навчання може стати не простою задачею. Тому наявність порад або рекомендацій щодо вибору ресурсів для навчання з використанням досвіду учнів, які вже проходили ці курси або використовували ці ресурси, була б корисною під час вибору ресурсів для навчання, особливо самостійного. Такі рекомендації може бути отримано від рекомендаційної системи, яка надаватиме інтелектуальну підтримку електронного навчання. Розробці такої рекомендаційної системи й присвячено дослідження авторів.

Попередні дослідження показали, що за навчання впродовж життя може бути виділено чотири різні мети, кожна з яких має свої особливості. Тому для кожної з них може бути застосовано різні методи та засоби під час підготовки рекомендацій. Тому задача побудови рекомендаційної системи для вибору ресурсів для навчання з урахування всіх особливостей цього процесу є актуальною задачею.

Метою статті є розроблення пропозицій та методики підготовки рекомендацій щодо вибору ресурсів з урахуванням бажаної мети та стилю навчання для підвищення комфортності та якості навчання.

Застосування сучасних технологій в освіті та цифрові трансформації

Поява сучасних технологій в галузі освіти змінила освітній процес, оскільки зараз процес навчання є більш індивідуалізованим, інтерактивним та мобільним. Такі технології не замінюють викладача, але можуть допомогти як викладачу в розробленні навчальних курсів, щоб зробити інструментарій цікавішим і кориснішим, так і учню, розширюючи його можливості пошуку ресурсів для навчання, які б відповідали його індивідуальним потребам.

Нові підходи до освіти базуються на принципах гнучкості, інклюзивності та інтеграції технологій і охоплюють [1]:

- автоматизацію процесів та розвиток штучного інтелекту;
- переосмислення ролі педагога – від транслятора до ментора;
- формування навичок творчості та критичного мислення;
- розвиток навички самостійного пошуку рішень тощо.

Міжнародні дослідження показують, що учні, які навчаються за інноваційними програмами, демонструють вищі результати і в знаннях предметів, і у розвитку універсальних, неспеціалізованих навичок, які стосуються особистісних якостей, поведінки та міжособистісної взаємодії (*soft skills*) [2].

Характерні особливості Освіти 3.0 – перехід від стандартних програм до індивідуальних, коли кожен учень має можливість навчатись у власному темпі й обирати предмети, які йому найбільше цікаві, й ці знання будуть корисні у майбутньому.

Основні принципи Освіти 3.0: адаптивність, персоналізація та орієнтація на результат. Замість заучування фактів учні навчаються застосовувати знання для розв'язання реальних завдань.

Переваги використання сучасних технологій в освіті [1, 3]:

- *Персоналізація*: Кожен учень може навчатись у власному темпі, використовуючи ресурси, що відповідають його індивідуальним потребам та стилю навчання.

- *Доступність*: Освіта стає доступнішою у віддалених регіонах або для людей з особливими потребами.

- *Залучення та інтерактивність*: Інтерактивні додатки, ігри та віртуальні середовища роблять процес навчання більш захопливим та цікавим.

- *Актуальність*: Технології дають змогу швидко оновлювати зміст курсів та програм відповідно до сучасних вимог.

Цифрова трансформація в освіті змінює спосіб створення навчального контенту та розширює різноманітність ситуацій, у яких вона використовується.

Рух за відкриті освітні ресурси [4] полегшує доступність електронного контенту, а також його коригування та адаптацію відповідно до ліцензії *CreativeCommon* [5]. Адаптація навчальних ресурсів до нових умов. Збільшення кількості навчальних ресурсів, особливо для самостійного навчання, і відкриті освітні ресурси є основними чинниками врахування індивідуальних уподобань.

Поява нових технологій призвела до необхідності безперервного оновлення знань, набуття нових навичок та підвищення кваліфікації [6]. Технології забезпечили масовий доступ до навчальних матеріалів, контенту, зробили їх зручними у використанні. Подання навчальної інформації в електронній формі (текстової, звукової та відео) забезпечило масовість їх використання. Розвиток комп'ютерних технологій навчання дає змогу тиражувати навчальний процес шляхом доступу до навчальних курсів для навчання.

Отже, сьогодні, коли напрацьовано великі обсяги різноманітних курсів для навчання в різних сферах, які можуть бути використані як для самостійного навчання, так і для профільного, учневі дуже важко зорієнтуватися у виборі навчального ресурсу, навіть з урахуванням мети його навчання. Тому побудова технологій, які могли б йому допомогти в такому виборі, сьогодні є важливим та актуальним завданням. У цьому дослідженні поставлено завдання розроблення методики підготовки рекомендацій для учня з урахуванням комфортного стилю навчання.

Роль викладача та ресурси для навчання

Сучасний педагог – не просто транслятор нових знань. Нині він є організатором самого процесу пізнання нового, коли викладач має навчити учня проявляти інтерес до предмету, який вивчає [7].

Сучасний учитель має відповідати таким професійним критеріям: бути відкритим до інновацій, готовим самовдосконалюватись, перебувати у постійному творчому пошуку, рухатись уперед – працювати над своїм професійним розвитком, оволодівати новими професійними ролями [8, 9].

Сьогодні завдання викладача полягає у поширенні нових знань, розробленні курсів та тренінгів, поєднанні можливостей формальної та неформальної освіти для професійного розвитку учнів.

Освітні ресурси є сукупністю матеріалів, інструментів, платформ і сервісів, спрямованих на підтримку та оптимізацію процесу навчання. Це охоплює і традиційні навчально-методичні комплекси, й інноваційні цифрові рішення: від електронних підручників до адаптивних навчальних систем. Наприклад, в табл. 1 наведено такі характеристики з [10].

Головною особливістю цифрових освітніх ресурсів є те, що вони є інтерактивними та здатні активно залучати учнів до процесу, надаючи багато медіаформатів та гнучкість доступу, що підвищує

Таблиця 1. Характеристика освітніх ресурсів

Характеристики	Традиційні освітні ресурси	Цифрові освітні ресурси
Наявність	Обмежено фізичним розташуванням	Доступно з будь-якого місця з інтернетом
Оновлення	Потрібує перевидання (місяці / роки)	Оперативне оновлення (хвилини / години)
Персоналізація	Стандартизований підхід	Адаптація до індивідуальних потреб
Інтерактивність	Обмежена	Висока, з миттєвим зворотним зв'язком
Вартість масштабування	Висока	Низька

ефективність навчання порівняно з більш пасивними традиційними матеріалами.

Вибір оптимального освітнього ресурсу – завдання, яке потребує системного підходу. При величезному різноманітті доступних платформ легко загубитися або зробити вибір, що не відповідає реальним потребам. Ключем до успіху є чітке формулювання освітніх цілей та критичний аналіз запропонованих опцій.

Опис різних стилів у навчанні

Відомо багато різних стилів навчання. Наприклад, існують такі стилі навчання:

- VARK (*Learning Styles VARK*) [11];
- стилі навчання Колба (*Kolb's Learning Style*) [12];
- модель домінування мозку Германа (*Herrmann brain dominance model*) [13];
- модель Фельдера-Сільвермана (модель ФС, *Felder Silverman model*) [14–16].

Під стилем навчання (*learning style*) маємо на увазі сукупність параметрів, що характеризують спосіб подання та сприйняття інформації, спосіб її усвідомлення та когнітивні характеристики учня [17]. Використання стилю навчання, якому надається перевага, сприяє ефективному засвоєнню нової інформації. Існує кілька моделей, які систематизують ті характеристики учня, які визначають стиль його навчання.

Модель ФС описує чотири шкали, які визначають характеристики учнів у навчанні: активний / рефлексивний, сенсорний / інтуїтивний, візуальний / вербальний, і послідовний / глобальний.

Ця модель допомагає викладачам адаптувати методи навчання до різних стилів учнів, роблячи процес навчання більш комфортним.

Модель ФС виділяє чотири сфери особистості, які сприяють її навчанню:

1) процес навчання може бути активним або рефлексивним, тобто бути дією, або роздумами;

2) сприйняття інформації в процесі навчання поділяється на чуттєве та інтуїтивне, чи конкретне та концептуальне, чи факт і теорія;

3) подання інформації поділяється на візуальне та вербальне: зображення та діаграми – візуальна інформація, читання / лист – вербальна;

4) розуміння інформації може бути послідовним чи глобальним. Тобто або поетапне, упорядковане осмислення матеріалу, або широке мислення.

Кожну сферу можна розглядати як окремий підхід до навчання.

Розглянемо детальніше основні шкали моделі МФС:

Активне / рефлексивне. Активні учні краще навчаються, беручи активну участь у процесі навчання, наприклад, обговорюючи, пра-

цюючи в групах, проводячи різні експерименти. Рефлексивні учні вважають за краще обмірковувати інформацію, більше аналізувати її.

Сенсорне / інтуїтивне. Сенсорні учні віддають перевагу фактам і конкретним деталям, тоді як інтуїтивні учні – абстрактним концепціям і зв'язкам між ними.

Візуальне / вербальне. Візуальні учні краще засвоюють інформацію, подану зображеннями, діаграмами та схемами, а вербальні учні – письмовим та усним поясненням.

Послідовне / глобальне. Послідовні учні віддають перевагу логічному та лінійному підходу до навчання, крок за кроком засвоюючи інформацію, тоді як глобальні учні вважають за краще бачити загальну картину, а потім вже розбиратися в деталях.

Модель ФС може бути застосовано в освіті для таких цілей:

Адаптація навчальних матеріалів. Викладачі можуть використовувати модель для розроблення навчальних матеріалів, які відповідатимуть різним стилям навчання. Наприклад, для активних учнів можна додати більше інтерактивних завдань, а для сенсорних – практичних прикладів.

Різноманітність методів навчання. Модель допомагає урізноманітнити методи навчання, щоб задовольнити потреби різних учнів. Наприклад, можна використовувати лекції, групові дискусії, практичні роботи та самостійне вивчення матеріалу.

Підвищення залучення учнів. Визнання та урахування різних стилів навчання може підвищити зацікавленість учнів у навчальному процесі, оскільки тоді учні відчуватимуть, що їхні потреби враховують.

Модель ФС надає цінний інструмент для розуміння та задоволення різних стилів навчання, оскільки сприяє більш комфортному та приємному навчальному процесу.

Передбачається, що стиль навчання не зміниться впродовж усього процесу навчання. Проте неформальне обговорення у фокус-групі виявило суттєві зміни параметрів залежно від конкретної навчальної ситуації. Поєднання параметрів (стилів) моделі ФС формує індивідуальні уподобання у навчанні.

Ми дослідили модель ФС з метою урахування стилів навчання під час підготовки рекомендацій щодо вибору навчальних ресурсів. Розглянемо це детальніше.

Підготовки рекомендацій щодо вибору навчального ресурсу

Щоб у великому обсязі пропонованих навчальних ресурсів вибрати цікаві та корисні, дуже доцільною була б рекомендаційна система, яка б на основі зібраної інформації про навчальні курси та оцінку цих курсів учнями, які вже їх пройшли, готувала б рекомендації для нових учнів з урахуванням особливостей ситуації, за якої учень обирає ресурс для навчання. Це б дало змогу учню ефективніше вико-

ристовувати час на вибір ресурсу, і підібрати ресурс, який найбільше відповідає його запиту. Це дозволило б учню підвищити якість здобутих навичок чи знань.

Таку рекомендаційну систему можна розглядати як радника, який підтримує прийняття рішень на основі інформації про учня та його досвід у конкретній галузі знань. У більшості освітніх рекомендаційних систем використовуються доступна інформація, така як описи навчальних ресурсів, характеристики учнів (вік, стать, група, імідж навчання, оцінки). Рекомендації таких систем часто припускають схожість учнів всередині групи, або схожість з дисципліною, що її вже вивчають [18].

Якість рекомендацій, які видає рекомендаційна система, може залежати від наявної інформації про учнів та про ресурси для навчання. Чим повніше буде зібрано інформацію, тим більша ймовірність того, що результат буде найбільш корисним для учня.

Мета навчання та вибір навчальних ресурсів. У [19] було досліджено ситуації, в яких можуть опинитися учні під час вибору навчальних ресурсів в разі навчання впродовж життя.

Автори виділяють такі чотири мети навчання:

1) *для професійного розвитку*: учню необхідний підтверджений результат навчання в певній галузі, наприклад, у програмуванні. У цьому разі ресурс надає курс або програму, заходи, завдання та оцінки, що ведуть до підтвердження компетентності учня (диплом або сертифікат);

2) *для індивідуального розвитку*. Людині необхідно навчитися виконувати якесь завдання або вирішувати проблему. Рекомендація ресурсів може містити різні види для надбання знань або навичок, включно з відео для мікронавчання;

3) *задоволення власної цікавості*. Це може бути просто хобі, потреба прояснити деталі, покращити розуміння чогось чи просто бажання бути в курсі сучасних технологічних досягнень. Тут може бути рекомендовано різні ресурси: від освітньо-розважальних до наукових досліджень, пасивних презентацій, інтерактивних відео, ігор та вікторин тощо;

4) *для закріплення наявних навичок чи оновлення знань*. Це специфічна ситуація, яка ще недостатньо вивчена. Це пояснюється тим, що незалежно від предметної області, засвоєні знання з часом втрачаються та потребують оновлення. Також може знадобитися опрацювання отриманих навичок.

Також можна розділити процес навчання на поверхневий, коли достатньо повторити вправу один раз чи двічі, або поглиблений, коли потрібно повернутися до повторення окремих фрагментів чи повторення вправ.

Крім того, кожен з учнів має уподобання за стилем подачі матеріалів для навчання. Розглянемо це докладніше у наступному розділі.

Опис методики підготовки рекомендацій. У цьому дослідженні ми розглядаємо ресурси, де автор кожного з яких визначає їх характеристики. Рекомендована стандартом структура метаданих – описів навчальних ресурсів – призначена передусім для загальної характеристики (формату, тривалості, мови тощо). Додаткові відомості про те, чи цей ресурс підходить для певного стилю – повинні бути сформовані окремо. Тоді цю інформацію, що характеризує цей ресурс, може бути перевірено на відповідність запиту (шаблону) користувача. Крім того, якщо будь-який ресурс було випробувано у подібній ситуації довіреним партнером зі схожими смаками, то його думку обов'язково має бути враховано.

Таким чином, користувач отримує рекомендацію, причина якої може бути відомою та зрозумілою. Вона пов'язана з конкретною навчальною метою і, отже, допоможе користувачу отримати те, що він хотів би, з більшою ймовірністю.

Такий підхід може бути корисним для вирішення проблеми холодного старту. По-перше, ресурси вже мають початковий опис, який є достовірним та не специфічним для користувача. Передбачається, що користувачі надають інформацію про мету навчання, проте ця інформація (шаблон) не залежить від вибору ресурсу. Якщо повний шаблон відсутній, питання вибору найважливіших параметрів може вирішено індивідуально.

Вважатимемо, що попередній відбір ресурсів вже виконано, і ресурси його, проаналізовані на відповідність стилю, придатні (мається на увазі тематика ресурсу та мова, а можливо, тривалість вивчення, ціна та інші критичні характеристики).

Для розроблення рекомендацій використовується інформація як властивості ресурсу, і уподобання користувачів. Оскільки обговорення цих уподобань у межах нашої малої групи показало, що характеристики стилю залежать від мети навчання, то відповідний профіль користувача прив'язуватимемо до ситуації та запитуватимемо підтвердження під час чергового звернення по рекомендацію ресурсу.

Ми пропонуємо використовувати індивідуальні вподобання стилю навчання, специфічні для конкретної мети навчання.

Методика підготовки рекомендацій передбачає етапи, послідовність яких наведено на рис. 1.

На рис. 1 наведено такі основні блоки.

Розробник ресурсів. Тут у матриці подано n ресурсів для навчання, для яких відомо m їх характеристик.

Користувач. Подано вектором, де визначено p властивостей, які він би очікував бачити в навчальному ресурсі.

Уподобання за стилями. Також користувач визначає свої пріоритети стилю подачі матеріалу.

Рекомендаційна система на основі даних про ресурси та очікувань користувача про стилі навчальних ресурсів готує рекомендації, упорядкувавши їх за критерієм CR_{min} , проте остаточний вибір ре-

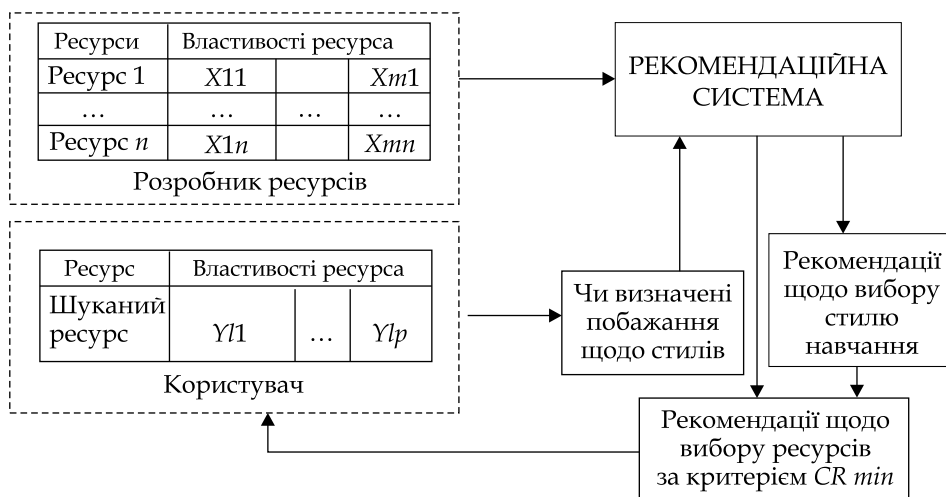


Рис. 1. Послідовність підготовки рекомендацій щодо вибору ресурсу для навчання

ресурсу залишається за користувачем, який бере до уваги рекомендацію, але вибір робить самостійно.

Це дає змогу врахувати індивідуальні переваги стилю навчання конкретного користувача у конкретній ситуації навчання. Такий підхід може зробити навчання більш комфортним та мотивованим на подальший розвиток, оскільки підібраний процес навчання може бути приємніший за інші.

Приклад підготовки рекомендацій. Розглянемо невеликий приклад, наскільки відрізняються рекомендації залежно від вподобань [19], де було досліджено мету навчання: оновлення навичок або знань.

Для того, щоб надати рекомендації щодо стилю та рівня подання матеріалу, було створено фокус-групу з 5 осіб, кожен учасник якої підготував власні оцінки 30 відео, які розміщено на ресурсі *Youtube*, і які сприяють оновлення знань у сфері вивчення англійської мови, а саме використанню артиклів в англійській мові. Ці відео відрізняються рівнем знання мови, стилем викладу, різною тривалістю, і лише деякі з них від носіїв мови.

Таблиця 1. Отримані результати рекомендацій щодо 3 найкращих та 3 найгірших відео з точки зору poradnika № 5

№	Рекомендує	Бал	Не рекомендує	Бал
1	A, an, the – Статті англійською мовою	6	6 правил статей a, an, the	0
2	9 правил використання артиклів – a, an, the чи 'the'?	6	Артикли (a, an, the) – Урок 1–7 Правил	0
3	Використання артиклів в англійській мові – 3 простих правила	5	Англійська граматики: Коли не використовувати артикль – 9 правил	0

Розроблено анкету, яка містила питання щодо рівня знання англійської, побажання щодо форми подачі матеріалу, чи потрібна перевірка та контроль засвоєного матеріалу тощо.

Також було зібрано інформацію щодо тривалості кожного відео, кількості підписників каналу, переглядів та інших показників, що характеризують відео на *Youtube*.

Далі було зібрано дані щодо оцінки кожного відео кожним з групи порадників.

В результаті аналізу кожен з порадників з усіх 30 відео обрав три відео, які він рекомендує, і три, які не рекомендує. Далі, за близькістю в евклідовому просторі за усіма змінними було визначено найвлучнішого порадника для студента і, відповідно, студенту подано його рекомендації щодо перегляду відео щодо використання статей англійською мовою. У цьому разі це виявився порадник № 5. В результаті студенту запропоновано саме його рекомендації.

В табл. 1 наведено отримані результати про рекомендації щодо 3 найкращих та 3 найгірших відео з точки зору порадника № 5.

В третьому та останньому стовпці табл. 1 наведено загальний бал для кожного відео за всіма показниками. Всі відео впорядковуються за загальним балом, і вибираються три відео, які порадник № 5 рекомендує як найкращі, та три, які йому не сподобалися і він не рекомендує їх для перегляду.

Ми розглянули спрощений випадок отримання рекомендацій. У майбутньому планується розрахувати певний загальний рейтинг для кожного відео на основі рейтингів усіх порадників та впорядкувати їх відповідно до цих загальних рейтингів. А потім, на основі цих впорядкованих даних, розрахувати рекомендації.

Висновки

У роботі запропоновано методику побудови рекомендацій щодо вибору ресурсів для навчання з урахуванням конкретної мети та різних стилів навчання: аудіо, відео, текстовий тощо. Навчання впродовж життя стає все популярнішим, оскільки дає змогу навчатися людям різного віку з різною метою: і для отримання диплому, і просто для відновлення знань з деяких предметів. В роботі запропоновано структурну схему рекомендаційної системи, яка дасть змогу готувати рекомендації щодо вибору ресурсів для навчання впродовж життя з урахуванням накопиченого досвіду навчання в подібних ситуаціях.

Хоча групове навчання, наприклад дистанційне, прагне задовольнити потреби учнів з різними стилями, коли це тільки можливо, але передбачається, що використання ресурсів, що відповідають індивідуальному стилю навчання, зменшує когнітивне навантаження та підвищує задоволення від процесу навчання — аспект, особливо важливий у навчанні впродовж усього життя.

Вибір моделі ФС для опису стилів навчання обґрунтовано тим, що вона враховує не лише форму подання інформації, але й способи, якими учні взаємодіють з нею.

Під час дослідження було виявлено необхідність адаптації моделі ФС, зокрема:

- для уточнення форми подання вербальної інформації (текст або аудіо);
- для врахування навчальної мети під час пошуку освітніх ресурсів.

Зазначимо, що і вибір формату подання інформації, і бажані навчальні дії залежать від мети доступу до ресурсу. Різноманітність мети навчання пояснює використання шкал для визначення значень індивідуальних параметрів стилю. Наприклад, стандартною може бути вербальні (текстові) уподобання, але для повторення ефективнішим є поєднання візуальних та аудіомодальностей. Така інтерпретація дає глибше розуміння, ніж покладання виключно на числові значення.

Методологія, запропонована авторами, дає змогу на основі описів набору ресурсів, наданих розробниками, пропонувати учням три найбільш підходящі ресурси, що відповідають їхньому бажаному стилю навчання.

Подальші дослідження буде зосереджено на впровадженні запропонованої системи рекомендацій та її тестуванні на конкретних випадках використання, надаючи адаптовані рекомендації для різних навчальних цілей.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Innovations in Education: Modern Educational Trends 2025. [Інновації в освіті: Сучасні освітні тренди 2025] URL: <https://mriya.org.ua/blog-innovacziyi-v-osviti-suchasni-osvitni-trendy-2025> [Accessed 15 Jul. 2025]
2. Kyllonen P.C. Soft skills for the workplace. *Change: The magazine of higher learning*, 2013, Vol. 45 (6), 16–23. <https://doi.org/10.1080/00091383.2013.841516>
3. How personalization works in online learning! [Як працює персоналізація в онлайн-навчанні!] URL: <https://kwiga.com/ua/blog/yak-pracyuye-personalizaciya-v-onlajn-navchanni> [Accessed 18 Sep. 2025]
4. Open Educational Resources (OER) Support Equity and Flexibility. URL: <https://oercommons.org/about> [Accessed 15 Jul. 2025]
5. Creativecommons. URL: <https://creativecommons.org> [Accessed 15 Jul. 2025]
6. Gritsenko V.I., Manako A.F., Synytsya E.M. E-transformation in Learning. *Control Systems and Computers*, 2018, Issue 1 (273), 3–15. [In Russian] <https://doi.org/10.15407/usim.2018.01.003>
7. A modern teacher is someone who reveals the potential of students, not forces them to learn lessons – Mykola Skyba [Сучасний педагог – це той, хто розкриває потенціал учнів, а не примушує їх вчити уроки – Микола Скиба]. URL: <https://uifuture.org/publications/24366-suchasnyi-pedagog> [Accessed 15 Jul. 2025]
8. New professional roles of the modern educator. [Нові професійні ролі сучасного педагога]. URL: <https://cusu.edu.ua/ua/konferenc-19-20/ix-mizhnarodna-naukovo-praktychna-onlain-internet-konferentsiia-problemy-ta-innovatsii-v-pryrodnycho-matematychnii-tekhnolohichnii-i-profesiinii-osviti/sektsiia-2/10483-novi-profesiyni-rol-i-suchasnoho-pedahoha> [Accessed 15 Jul. 2025]

9. New Ukrainian School. Conceptual Principles of Secondary School Reform. Ministry of Education and Science of Ukraine [Нова українська школа. Концептуальні засади реформування середньої школи. Міністерство освіти і науки України], 2016. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-compressed.pdf> [Accessed 27 Jul. 2025]
10. Characteristics of Effective Learning Resources: A Guide for Educators. URL: <https://distancelearning.institute/instructional-design/characteristics-effective-learning-resources-guide-educators> [Accessed 15 Jul. 2025]
11. Othman N., Amiruddin M.H. Different perspectives of learning styles from VARK model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2010, Vol. 7, 652–660.
12. Kolb D.A., et al. *The Kolb learning style inventory*. Hay Resources Direct, MA, Boston, 2007.
13. O’neill K.S. Using the hermann brain dominance model to determine communication style. *tbtea Journal*, 2015, Vol. 156.
14. Graf S., Viola S. R., Leo T., Kinshuk. In-depth analysis of the Felder-Silverman learning style dimensions. *Journal of Research on Technology in Education*, 2007, Vol. 40 (1), 79-93.
15. Nafea S.M., Siewe F., He Y. On recommendation of learning objects using felder-silverman learning style model. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, 163034–163048. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935417>
16. Zagulova D., Boltunova V., Katalnikova S., Prokofyeva N., Synytsya K. Personalized E-Learning: Relation Between Felder-Silverman Model and Academic Performance. *Appl. Comput. Syst.*, 2019, Vol. 24 (1), 25–31. <https://doi.org/10.2478/acss-2019-0004>
17. Grytsenko V.I., Kudriavtseva S.P., Synytsya K.M. Learning Task Models in the Context of Education for Sustainable Development. *Control systems and computers*, 2020, Issue 5, 3–16. <https://doi.org/10.15407/csc.2020.05.003>
18. Jawaheer G., Weller P., Kostkova P. Modeling user preferences в recommender systems: A classification framework для explicit і implicit user feedback. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TIIS)*, 2014, Vol. 4 (2), 1–26.
19. Savchenko M., Synytsya K., Savchenko-Synyakova Ye. Recommendation Methods for Information Technology Support of Lifelong Learning Situations. In: Faure E., Danchenko O., Bondarenko M., Tryus Y., Bazilo C., Zaspas G. (eds) *Information Technology for Education, Science, and Technics*, Vol. 178. Cham: Springer, 2023, 552–564. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_33

Отримана / Received 25.10.25

K.M. SYNYTSYA, PhD (Engsneering), Deputy Director on Research,
Institute of Information Technologies and Systems NAS Ukraine,
Hlushkova Akad. ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7417-1748>
ksynytsya@irtc.org.ua

Ye. A. SAVCHENKO-SYNIKOVA, PhD (Engsneering), Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems NAS Ukraine,
Hlushkova Akad. ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4851-9664>
savchenko_e@meta.ua

M.Yu. SAVCHENKO, Geophysicist,
Aurora Geosciences Ltd.,
3506 McDonald Drive, Yellowknife, Northwest Territories, X1A 2H1, Canada
<https://orcid.org/0009-0009-1749-9550>
m_savchenko@meta.ua

S.I. ZARYTSKA, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems NAS Ukraine,
Hlushkova Akad. ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-5014-5631>
lana_zar@i.ua

O.V. TOKOVA, PhD (Engineering), Junior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems NAS Ukraine,
Hlushkova Akad. ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0289-2810>
len327@ukr.net

PREPARATION OF RECOMMENDATIONS ON THE SELECTION OF EDUCATIONAL RESOURCES FOR DIFFERENT LEARNING STYLES

Introduction. Lifelong learning is now an important part of personal and professional development, as the internet offers a wide variety of e-learning content. However, students often need advice or recommendations for finding learning resources based on the experiences of students who have already taken these courses or used these resources. Such advice can be obtained from a recommender system that will provide intelligent support for e-learning during lifelong learning. The authors are interested in developing such a system. The task of generating recommendations during learning is aimed at improving the acquisition of knowledge and skills. This can help students select learning resources based on their learning style and goals. Therefore, developing a recommender system that can automatically generate recommendations for selecting learning resources for a specific user, taking into account their preferred delivery style, is a relevant task.

The purpose of the paper is to propose a methodology for generating recommendations for resource selection based on learning style, thereby improving the ease and quality of learning.

Methods To account for learning styles, the Felder-Silverman model was chosen. It describes four scales that determine student learning advantages: active/reflective, sensory/intuitive, visual/verbal, and sequential/global.

Results. Lifelong learning is becoming increasingly popular, as it enables people of all ages to learn for various purposes, whether for earning a degree or simply refreshing their knowledge in certain subjects. A methodology is proposed for developing recommendations for selecting learning resources using specific situations that might be encountered by someone seeking to learn with different learning styles, such as audio, text, and so on. A structural diagram of the recommender system is presented, which will enable the development of such recommendations for lifelong learning, taking into account accumulated learning experience in similar situations.

Conclusions. The methodology proposed by the authors allows, based on descriptions of a set of resources provided by developers, to suggest to students the three most suitable resources that match their desired learning style. Future research will focus on implementing the proposed recommender system and testing it in specific use cases, providing tailored recommendations for various learning purposes.

Keywords: *e-learning, lifelong learning, continuous learning, recommender system, learning styles and situations.*

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.043>

УДК 303.721; 004.03142

І.В. ПОПОВ, аспірант, заст. зав. відд.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0009-0009-7961-9431>

popigor7@gmail.com

Д.І. КОЛЕСНИК, аспірант, наук. співроб.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0009-0004-0357-7558>

kolesnik.d.i@gmail.com

В.М. СІМАХІН, д-р філос. (техн.), старш. наук. співроб.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-4497-0925>

thevladsima@gmail.com

Р.В. СЕМЕНОГ, заст. зав. лаб.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-6714-0644>

ruslansemenoh8@gmail.com

Т.Ю. СУСЛОВА, наук. співроб.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,

просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

<http://orcid.org/0000-0002-4700-6819>

ligeia.sin@gmail.com

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА НАПРЯМИ ТРАНСФОРМАЦІЙ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ В НАУКОВИХ УСТАНОВАХ

Проаналізовано ключові проблеми державної освіти та науки в сучасних умовах. Технологічна відсталість державних наукових установ – це головна проблема, що заважає впровадженню кращого світового досвіду в наукову сферу. Запропоновано

Цитування: Попов І.В., Колесник Д.І., Сімахін В.М., Семенов Р.В., Сусллова Т.Ю. Аналіз сучасного стану та напрями трансформацій високотехнологічної освіти в наукових установах. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2025, Том 6 (6), 43–51. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.043>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

можливі шляхи адаптації та трансформації науково-освітніх інститутів. Досліджено тенденцію, яка загрожує перетворитися на системну кризу, яка зі свого боку може спричинити збільшення соціальної, фінансової та освітньої нерівності.

Ключові слова: *державна освіта, наукові інститути, академія наук, технологічні зміни, конкурентне навантаження.*

Вступ

Сучасні системи освіти опинилися в епіцентрі технологічних змін – процесів, які змінюють суспільство та економіку з небаченою швидкістю [1]. Впровадження штучного інтелекту, роботизація та безпілотні технології трансформують ринок праці, змінюють вимоги до компетенцій фахівців та впливають на спосіб організації освітнього процесу. В цих умовах державні науково-освітні установи стикаються з багаторівневими фінансовими, організаційними, технологічними та кадровими викликами.

Динамічні зміни в глобальному науковому та освітньому просторі, які наразі зумовлені інтенсивною інтеграцією інженерних, інформаційних та когнітивних підходів, висувають нові вимоги до підготовки наукових кадрів, здатних забезпечити конкурентоспроможність держави у сфері високих технологій [2].

Сьогодні важливим елементом освітніх та науково-дослідних процесів стає формування компетентностей, необхідних для роботи з комплексними технічними та інформаційними системами, включно зі штучним інтелектом, інтелектуальними системами, безпілотними (автономними) системами тощо. В Україні така трансформація відбувається в умовах обмежених ресурсів, потреби в оновленні матеріально-технічної бази та необхідності гармонізації освітніх стандартів із сучасними міжнародними практиками. Це зумовлює потребу в ґрунтовному аналізі поточного стану високотехнологічної освіти в наукових установах, визначенні ключових напрямів її подальшого розвитку та оцінюванні можливостей інтеграції інноваційних технологічних рішень у навчально-науковий процес.

Аналіз сучасного стану високо-технологічної освіти та науки

В умовах стрімкого розвитку інтелектуальних технологій, автономних систем, високопродуктивних обчислень та цифрових платформ, система державної освіти й науки України постає перед необхідністю глибокої трансформації. Аналіз її поточного стану засвідчує наявність як значного наукового потенціалу, так і системних викликів, які стримують ефективне впровадження інновацій у сферу високотехнологічної підготовки кадрів [3, 4]. Одним із ключових чинників є усталена модель організації наукової діяльності, сформована так, що основна частина фундаментальних досліджень зосереджена в академічних наукових інститутах, тоді як заклади вищої освіти забезпечують переважно освітню та навчальну функції. Така модель, хоча й

дала змогу зберегти високий рівень фундаментальної науки, нині потребує суттєвого перегляду в напрямі інтеграції освітніх та наукових компонентів для розвитку відповідності до провідних світових університетів і дослідницьких центрів.

Більшість розвинених країн активно формують так звані дослідницькі університети, в яких освітня діяльність невідривно пов'язана з виконанням високотехнологічних науково-дослідних проєктів, участю студентів та здобувачів в наукових лабораторіях, розвитком стартап-екосистеми та тісною взаємодією з високотехнологічним, промисловим бізнесом [5, 6]. В США, Німеччині, Південній Кореї значна частина досліджень виконується саме в університетському секторі, який отримує цільове фінансування на створення інноваційних освітніх програм та дослідницьких інфраструктур. Крім того, у цих країнах сформовано механізми залучення промислових партнерів, що забезпечує швидку комерціалізацію наукових результатів і зворотний вплив індустрії на структуру освітніх програм, зокрема у сферах штучного інтелекту, робототехніки, автономних систем, інформаційної безпеки, біоінженерії та адитивного виробництва.

Українська система освіти та науки наразі перебуває у стані структурної фрагментації. Більша частина наукових установ зосереджена на виконанні фундаментальних та прикладних досліджень, але не бере значної участі в підготовці нових поколінь фахівців у високотехнологічних галузях. Водночас частина закладів вищої освіти стикається з обмеженим доступом до сучасного лабораторного обладнання, недостатнім рівнем практичної підготовки студентів та відсутністю тісної співпраці з промисловими підприємствами. Це призводить до дисбалансу між швидким розвитком технологічних секторів та темпами оновлення освітнього середовища.

Важливо зазначити, що українські наукові установи, попри наявні труднощі, мають потужний кадровий потенціал, проте незначна частина науковців бере участь у міжнародних дослідницьких проєктах, що свідчить про наявність проблем та міжнародного визнання значної частини наукових досліджень в Україні. Відсутність системної державної політики щодо формування інноваційних дослідницько-освітніх кластерів та недостатнє фінансування наукової інфраструктури суттєво обмежують можливості для інтеграції цих результатів в міжнародний науковий простір.

У світовій практиці одним із ключових індикаторів рівня високотехнологічної освіти є якість *STEM*-підготовки, зокрема в області робототехніки, електроніки, комп'ютерних наук та інформаційних технологій [7]. Україна демонструє позитивну динаміку щодо кількості здобувачів технічних спеціальностей, однак рівень інфраструктурної забезпеченості значно відстає від потреб сучасної індустрії. Частина спеціалізованого та лабораторного обладнання морально застаріла, що стримує розвиток в сферах штучного інтелекту, безпілотних літальних апаратів, інтелектуальні систем та мереж.

Неспроможність швидко адаптуватися до впровадження штучного інтелекту, роботизації та безпілотної індустрії заважає створювати власні навчальні центри та пропонувати курси з практичним доступом до обладнання, на відміну від приватних компаній. Науковці України вже не вперше звертають увагу на вплив цифровізації, глобальних змін і технологічного середовища на формування конкурентоспроможності. Навчання та підготовка до сучасних викликів майбутніх ІТ-спеціалістів у закладах фахової передвищої освіти напряду залежить від навчальних процесів, інтеграції цифрових платформ, гібридних форм навчання та розвитку практичних компетентностей, затребуваних у динамічному ринку праці [8]. Застосування сучасних технологій сприяє формуванню у здобувачів освіти здатності до швидкої адаптації, самоосвіти та міждисциплінарної взаємодії.

Вплив зовнішніх факторів на стан вітчизняної освіти і науки підсилюється впливом сучасних внутрішніх (військових) викликів [9]. Можна відзначити недостатню інтеграцію освіти з потребами оборонно-промислового та високотехнологічного секторів. Іноземні університети розвинених країн активно співпрацюють з військово-технічними лабораторіями, створюють спільні дослідницькі центри та інкубатори технологій подвійного призначення. В Україні така взаємодія носить епізодичний характер, хоча війна та стратегічні виклики стимулюють значне зростання попиту на висококваліфікованих спеціалістів у галузі штучного інтелекту, автономних систем, авіаційних технологій та кібербезпеки. Доцільним є розвиток практики «навчання на робочому місці», що передбачатиме тісну інтеграцію формального академічного навчання з практичною діяльністю у виробничому середовищі.

Проблема хронічного недофінансування необхідних витрат на діяльність вищих навчальних закладів є причиною зниження якості освітніх послуг [10]. Низький рівень грошового забезпечення наукових співробітників — головна причина того, що за останні два роки близько 20 % молодих дослідників перейшли працювати в приватні компанії, зокрема до великих міжнародних технологічних платформ, де їм пропонують значно вищу оплату праці, також вони переходять до сучасних лабораторій, де є можливість брати участь у різних комерційних дослідженнях.

Розвиток освітніх онлайн платформ, які мають глобальне охоплення, пропонують онлайн-курси, сертифікаційні програми та навіть повноцінні віртуальні університети. Такі платформи як *Coursera*, *edX* чи *Udacity* завдяки партнерству з провідними університетами та корпораціями формують альтернативу класичній освіті. Розвиток таких платформ інколи призводить до відмов від вступу до магістратури та надання переваги міжнародним онлайн-програмам, що коштують дешевше та гарантують швидке оновлення знань в тій галузі знань, яка безпосередньо цікавить здобувача.

Державні інститути мають складності зі спроможностями, що дають змогу конкурувати за якістю сервісу: вони обмежені бюрократичними процедурами, зарегульованістю системи та браком фінансової гнучкості. Отримання гранту вимагає багатомісячних погоджень, тоді як приватні структури ухвалюють рішення за тижні.

В результаті такої трансформації систем освіти в умовах інтенсивних технологічних змін формується чітка асиметрія, коли державна освіта поступово втрачає статус основного постачальника знань, і змушена віддавати позиції глобальним гравцям – міжнародним освітнім брендам, приватним онлайн-платформам і транснаціональним провайдерам освітніх послуг [11].

Напрями трансформацій державних науково-освітніх установ

В умовах стрімкого розвитку сучасних технологій, попри складні умови існують кроки, які можуть допомогти інститутам адаптуватися та зберегти свою роль у суспільстві (рис. 1), і які охоплюють модернізацію організаційної структури, оновлення змісту освіти, створення сучасної інфраструктури та розширення можливостей для інтеграції науки, освіти та промисловості.

Державні наукові установи можуть і мають укладати угоди з приватними компаніями, спільно розробляючи освітні програми та дослідницькі проекти. Це передбачає створення спільних лабораторій, дослідницьких центрів, навчально-наукових платформ, а також механізмів залучення студентів і молодих учених до виконання прикладних і фундаментальних досліджень, які відповідають потребам високотехнологічних секторів економіки.

Навчитися розробляти гнучкі освітні програми – це необхідний крок для переходу до модульного підходу, а саме: розробляти курси, які вже під час створення припускають можливість їх швидкого і регулярного оновлення в повній відповідності до змін ринку. Це дозволяє зменшувати темпи відставання від конкурентів завдяки міцній

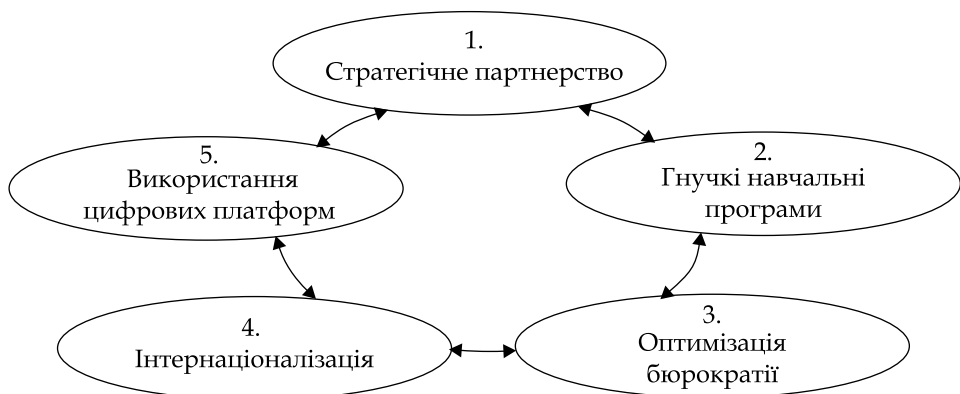


Рис. 1. Кроки адаптації та трансформації освіти до сучасних умов

прив'язці до потреб економіки, що зі свого боку робить навчальні програми більш привабливими для майбутніх слухачів і партнерів.

Найболючішим кроком в цій трансформації є боротьба з надмірною зарегульованістю та бюрократією, зокрема внутрішньою, зарегульованою як наукові ради, комісії, та положення, що не змінювалися десятки років. Реформа управління інститутами, скорочення зайвих адміністративних процедур та запровадження автономії у прийнятті фінансових рішень на виході неодмінно можуть значно підвищити ефективність інститутів.

Необхідно також розвивати механізми міжнародної інтеграції, що охоплюють участь у глобальних дослідницьких програмах, створення спільних магістерських та докторських програм, залучення міжнародних експертів і партнерів з високотехнологічних компаній. Міжнародний обмін досвідом дає змогу не лише підвищити якість підготовки кадрів, а й забезпечити адаптацію української системи освіти до світових стандартів інноваційності та конкурентоспроможності.

Державні наукові інститути мають створювати власні онлайн-курси, застосовуючи вже наявні цифрові платформи, та інтегруватися у світові освітні екосистеми. Це не лише розширяє аудиторію, а й дає змогу отримати додаткові джерела доходу.

Особливості та потреби трансформації освіти у сферах подвійного призначення

Трансформація освіти в сферах подвійного призначення є одним із актуальніших напрямів реформування системи високотехнологічної підготовки кадрів в Україні. Традиційні освітні програми не забезпечують належного рівня підготовки до роботи з комплексними системами та технологіями подвійного призначення, які є критично важливими для забезпечення національної безпеки. Необхідним стає поєднання фундаментальної підготовки з практичним навчанням, яке охоплює роботу на сучасних стендах, моделювання сценаріїв, проведення польових експериментів, дослідження прикладних алгоритмів, аналіз великих даних, розроблення систем ситуаційної обізнаності та моделювання поведінки автономних платформ.

Трансформація освіти у сферах подвійного призначення неможлива без створення сучасної інфраструктури для практичної підготовки. Йдеться не лише про лабораторні приміщення, а й про полігони для тестування безпілотних систем, центри моделювання сценаріїв кіберзагроз, тренажерні комплекси для робототехніки та БПЛА, симуляційні середовища з високим ступенем реалістичності тощо [12]. Важливим є впровадження напівнатурних та натурних методів навчання, які дають змогу моделювати ситуації, максимально наближені до реальних умов експлуатації систем подвійного призначення. Такі методи є критичними для формування стійких професійних навичок, зокрема в екстремальних або невизначених умовах,

характерних для застосування автономних систем в оборонній і цивільній сферах. Ефективна трансформація можлива лише за умови, що викладачі володітимуть сучасними методиками навчання, включно з проєктно-орієнтованими підходами, симуляційними тренажерами, методами інтеграції штучного інтелекту в освітній процес та засобами автоматизованої оцінки навчальних результатів.

Актуальним та необхідним для розвитку високотехнологічної освіти в сферах подвійного призначення для України є розроблення спеціалізованих навчальних модулів, спрямованих на формування компетентностей в галузі розпізнавання образів, аналізу даних зі складних сенсорних систем, відпрацювання алгоритмів взаємодії між автономними платформами, побудови стійких мереж зв'язку та моделювання роботи систем штучного інтелекту в умовах перешкод.

Вирішення цих проблем потребує довгострокової державної стратегії, що базується на принципах відкритості, інноваційності, міждисциплінарності та ефективного менеджменту.

Висновки

Система високотехнологічної освіти України опинилася під тиском швидких технологічних змін, воєнних викликів та глобальної конкуренції. Недостатність фінансування, застаріла інфраструктура та кадровий відтік створюють ризики втрати здатності державних наукових установ забезпечувати підготовку кадрів для стратегічно важливих секторів економіки, включно з галузями подвійного призначення.

У перспективі це зумовить підвищення вартості праці висококваліфікованих фахівців, що сприятиме збільшенню соціальної, фінансової та освітньої нерівності. Без реалізації заходів з трансформації високотехнологічної освіти в Україні існує ризик поглиблення соціальної та освітньої нерівності, втрати конкурентоспроможності українських наукових установ та залежності від зовнішніх технологічних рішень.

Фінансування. Це дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту, реєстраційний номер 2023.04/0082, що реалізується за напрямком «Наука для зміцнення обороноздатності України».

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Mukul E., Büyüközkan G. Digital transformation in education: A systematic review of education 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, Vol. 194, Article 122664. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664>
2. Ober J., Matuselych T., Strutynska O. From challenges to opportunities: Using ICT and AI in Ukrainian education in times of pandemic and War. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*, 2025, Vol. 11 (4), 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100639>
3. Lakhizha M.I. State regulation of modernization of higher education and science in the conditions of European integration. *Economics and Region*, 2024, Vol. 92 (1), 274–280. [In Ukrainian: Лахижа М.І., Державне регулювання модернізації ви-

- щої освіти та науки в умовах європейської інтеграції] [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1\(92\).3340](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1(92).3340)
4. Martynets V.V. Analysis of state policy in the field of education. *The International scientific and practical conference «Management paradigms of sustainable development and inclusive economic growth»*, Sumy, Ukraine, Nov. 2024, 375–378. [In Ukrainian: Мартинець В.В., Білошапка В.А. Аналіз державної політики у сфері освіти]
 5. Ovcharuk O. Research and education strategies as a factor of cultural innovation: experience of the United Kingdom. *National Academy of Managerial Staff of Culture and Arts Herald*, 2024, Issue 1, 3–9. [In Ukrainian: Овчарук О. В. Науково-дослідницькі та освітні стратегії як чинник культурних інновацій: досвід Сполученого Королівства] <https://doi.org/10.32461/2226-3209.1.2024.302014>
 6. Abramo G., Arponi, F., D'Angelo C.A. Do research universities specialize in disciplines where they hold a competitive advantage? *Scientometrics*, 2024, Vol. 129, 5453–5468. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-05136-7>
 7. Gryniova M., Kuzmenko G. Integration of mobile technologies into physics STEM education: opportunities and prospects. *Adaptive Management Theory and Practice Pedagogics*, 2025, Vol. 20 (39), Article 17. [In Ukrainian: Гриньова, М., & Кузьменко, Г. Інтеграція мобільних технологій у фізичну STEM-освіту: можливості та перспективи] [https://doi.org/10.33296/2707-0255-20\(39\)-17](https://doi.org/10.33296/2707-0255-20(39)-17)
 8. Drach I.I., Lytvynova S.H., Skorniakova O.V. Formation Of Future It Specialists' Competitiveness In The Information And Educational Environment Of The Technical College. *Information Technologies and Learning Tools*, 2021, Vol. 83 (3), 130–151. <https://doi.org/10.33407/itlt.v83i3.4421>
 9. Lisogor L., Rudenko N., Ivashenko S. Educational and occupational potential of ukraine: main challenges and ways of improvement under current conditions. *Demography and Social Economy*, 2023, Vol. 51 (1), 23–39. <https://doi.org/10.15407/dse2023.01.023>
 10. Zhuravel G., Shynkaryk M. Some aspects of improving the competitiveness of higher education. *Herald of Economics*, 2020, Issue 1 (95), 7–20. [In Ukrainian: Жуврavel Г. та Шинкарик М. Деякі аспекти підвищення конкурентоспроможності вищої освіти] <https://doi.org/10.35774/visnyk2020.01.007>
 11. Alieksieienko T., Zelenko O., Ripka G., Fostolovych V., Kyryllova V., Popova Y. Globalisation As A Factor In The Development Of Modern Education In The European Union And Ukraine. *Journal of Interdisciplinary Research*, 2024, Vol. 14, 240–243. <https://doi.org/10.33543/j.140141.240243>
 12. Komar, M., Chepizhenko, V., Bogachuk, Y., Soloviev, M. Development of the multi purpose simulation complex for training of unmanned systems operators. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2024, Vol. 215 (1), 35–47. <https://doi.org/10.15407/kvt215.01.035>

Received 25.10.2025

I.V. POPOV, PhD Student, Deputy Head of the Department,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-7961-9431>
e-mail: popigor7@gmail.com

D.I. KOLESNIK, PhD Student, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-0357-7558>
kolesnik.d.i@gmail.com

V.M. SIMAKHIN, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4497-0925>
thevladsima@gmail.com

R.V. SEMENOH, Deputy Head of the Laboratory,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6714-0644>
ruslansemenoh8@gmail.com

T.Yu. SUSLOVA, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-4700-6819>
igeia.sin@gmail.com

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND DIRECTIONS OF TRANSFORMATION IN HIGH-TECH EDUCATION

Introduction. Modern education systems find themselves at the epicenter of technological change is processes that are reshaping society and the economy at an unprecedented rate. The introduction of artificial intelligence, robotics, and unmanned technologies are transforming the labor market, changing the skill requirements of specialists, and influencing the organization of the educational process. In this context, public research and educational institutions face multifaceted financial, organizational, technological, and personnel challenges. Global changes caused by human activity have accelerated the development of information and communication technologies and artificial intelligence, which in turn has significantly impacted various sectors of society, including education. The Institute of Information Technology and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, funded by the state budget, is no exception and is directly experiencing these challenges.

The purpose of the paper is to analyze the key challenges facing public education and science in the current context and propose possible paths for the adaptation and transformation of research and educational institutions, in particular, the Institute of Information Technology and Systems.

Results. The key problems of state education and science in modern conditions are analyzed. The technological backwardness of state institutions is the main obstacle hinders the implementation of the best global practices. Possible ways for scientific and educational institutions to adapt and transformation are proposed. A trend that threatens to develop into a systemic crisis is examined. This will lead to an increase in the cost of labor for highly qualified specialists, which will contribute to greater social, financial, and educational inequality.

Conclusions. The inability to quickly integrate new technologies, staff attrition, and limited funding pose risks of public institutions losing their role in the educational space. The deterioration of these risks will inevitably lead to a reduction in the number of public research institutions, as a consequence of the redistribution of resources toward more efficient commercial entities. A reduction in the number of public educational institutions will lead to higher tuition costs and reduced accessibility for socially vulnerable groups.

Keywords: *state education, scientific institutions, academy of sciences, technological changes, competitive pressure.*

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ІНФОРМАЦІЙНО- КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.052>
UDC 364.2:331

O.M. BONDAR, Bachelor,
Polish-Japanice Academy of Computer Science,
86, Koszykowa str., Warszawa, 02-008, Poland
<https://orcid.org/0009-0002-6137-3188>
oleksii.kobondar@gmail.com

ANALYSIS OF NEXT-GENERATION INTERNET TRANSPORT PROTOCOLS: QUIC, WEBTRANSPORT, HTTP/3

Introduction. Traditional Internet transport relies on the TCP/IP stack with application-level protocols such as HTTP/1.1 and HTTP/2. This combination is reaching performance limits due to head-of-line blocking, multi-RTT handshakes, and the lack of built-in security at the transport layer. Modern latency-critical applications, including cloud gaming and AR/VR, require end-to-end latencies well below 50 ms, often below 20 ms, which the classic TCP+HTTP/1.1/2 stack struggles to provide. New transport solutions based on QUIC, combined with HTTP/3 and the WebTransport API, are designed to overcome these inefficiencies while preserving the Web programming model. Their global adoption has already grown significantly (over 40% of web traffic via QUIC/HTTP/3), which makes a systematic analysis of these protocols both timely and practically important.

Problem statement. Despite the rapid deployment of QUIC, HTTP/3, and WebTransport by major cloud providers and browsers, there is still a lack of consolidated analysis that connects IETF specifications, academic research, and real-world content delivery network (CDN) and 5G deployments. Practitioners often rely on scattered blog posts and partial benchmarks, which makes it difficult to understand where QUIC-based transports outperform the classic TCP+HTTP/2 stack, how different congestion control algorithms behave, and what limitations remain in latency-critical scenarios.

Purpose of this paper is to perform a critical analysis of next generation Internet transport based on QUIC, HTTP/3, and WebTransport, focusing on their architectural evolution, congestion control algorithms, deployment models, and security properties. To achieve this aim, the paper traces the evolution from SPDY and HTTP/2 to HTTP/3 over QUIC, compares congestion control schemes (CUBIC, BBRv2, and HyStart++ variants), reviews deployment optimizations (XDP and eBPF offload, 5G L4S), and identifies open issues such as multicast support, satellite links, and observability.

Cite: Bondar O.M. Analysis of Next-Generation Internet Transport Protocols: QUIC, WebTransport, HTTP/3. *Information Technologies and Systems*, Kyiv, 2025, Vol. 6 (6), 52–63. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.052>

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Methods. We survey IETF RFCs (for example RFC9000, RFC9114, and the QUICv2 draft) and recent research and industry reports. Performance is inferred from published benchmarks and experimental studies. The work has a survey and analytical character; original in house experiments are limited to indicative tests that complement these benchmarks. We also include anecdotal insights from our CDN and research experience (“under the hood” observations) to illustrate real world behavior.

Results. QUIC’s streamlined handshake (1-RTT, optional 0-RTT) and encrypted headers significantly reduce latency. Adoption is confirmed by major tech firms (Meta: ~75% traffic on QUIC/HTTP3). QUIC’s congestion controls show trade-offs: CUBIC is well-tested but can overshoot, whereas BBRv2 offers robust throughput in shallow buffers, with HyStart++ alleviating startup losses. WebTransport extends HTTP/3 with multiplexed streams and unreliable datagrams, now supported in browsers (e.g. Firefox 114). Offload strategies (XDP/eBPF) and libraries like Cloudflare’s quiche improve edge performance.

Conclusions. (1) QUIC/HTTP3 effectively address TCP/UDP bottlenecks, e.g. eliminating TCP’s head-of-line blocking. (2) Security enhancements (TLS1.3, header protection) mean almost entire packet payloads are encrypted. (3) Emerging CC algorithms like BBRv2 and hybrid slow-starts improve fairness and reduce loss. (4) WebTransport enables new web architectures (streaming, gaming) by combining QUIC with WebCodecs. (5) Practical deployment benefits from kernel-bypass (XDP) and QUIC libraries (quiche, lsquic). (6) Open issues include multicast-capable QUIC (e.g. MCQUIC), satellite scheduling, and richer logging (qlog) for observability. Future work may explore PERC-over-QUIC (forward-error correction), pluggable CC frameworks, and QUICv2-based enhancements.

Keywords: QUIC, HTTP/3, WebTransport, UDP, congestion control, low-latency networking, TLS, header protection; QUICv2 draft.

Introduction

Traditional TCP/UDP transport is straining under modern demands. TCP’s sequential delivery causes head of line blocking (HOL), while its 3 way handshake incurs 1–2 round trip times (RTTs) of delay before any data flows. Even UDP, though simple, lacks congestion control and encryption by default, forcing applications to reimplement these features. Modern services — e.g. cloud gaming, AR/VR — target latencies below ~20 ms for responsiveness, far tighter than typical Web workloads. For instance, cloud gaming research suggests keeping frame-to-frame latency under 50 ms; WebRTC-style real-time comms similarly aim for sub-100 ms. Under these constraints, the latency of TCP’s handshake or retransmission dramatically degrades UX.

Meanwhile, industry trends confirm rapid uptake of new protocols. By early 2025, ~40% of global web traffic used HTTP/3 (on QUIC), and over 75% of a major CDN’s traffic was reported via QUIC/HTTP3. Chrome’s QUIC usage hovered ~40% mid-2023. In our own 2024 CDN tests, enabling HTTP/3 reduced typical handshake delay by about one RTT, noticeably cutting page load times on high-latency links. This progress likens QUIC to an “express lane” in the network stack: it combines TLS encryption and transport in one, removing traditional slow steps.

What changed under the hood? QUIC (RFC9000, May 2021) was designed to fix TCP/TLS inefficiencies. It moved handshakes into user space and encrypts nearly all packet headers, thwarting passive profiling. HTTP/3 (RFC9114, June 2021) rides on QUIC, bringing HTTP semantics

(stream multiplexing, header compression) over this new transport. This paper critically examines these protocols and related APIs, highlighting their design trade-offs, deployment challenges, and open research questions.

Problem Statement

Despite the rapid deployment of QUIC, HTTP/3, and WebTransport by major cloud providers and browsers, there is still a lack of consolidated analysis that connects IETF specifications, academic research, and real world CDN and 5G deployments. Practitioners often rely on scattered blog posts and partial benchmarks, which makes it difficult to understand where transports based on QUIC and HTTP/3 outperform the classic TCP plus HTTP/1.1 and HTTP/2 stack, how different congestion control algorithms behave, and what limitations remain in latency sensitive scenarios.

Protocol Stack Evolution

The journey to HTTP/3 began years ago. Google's SPDY (2009) introduced multiplexed streams and header compression atop TCP as a testbed. Its lessons became part of HTTP/2 (2015), but still on TCP. Meanwhile Google experimented with a UDP-based transport ("gQUIC") to avoid TCP's ossification. The IETF standardized a clean-slate QUIC (with many gQUIC ideas) in RFC 9000 (May 2021). By combining transport and security layers (embedding TLS 1.3), QUIC enables 0-RTT handshakes for repeat connections. Shortly after, HTTP/3 (RFC 9114) defined HTTP semantics on QUIC, leveraging its stream multiplexing and flow control. Notably, many HTTP/2 features (like HPACK header compression state) are modified or subsumed: e.g. QPACK replaces HPACK to avoid head-of-line blocking across streams. In summary, HTTP/3 is essentially "HTTP/2.5 on QUIC", and was formalized once QUIC proved stable.

Over these transitions, the industry saw growing QUIC adoption: Cloudflare's blog notes HTTP/3 on ~31% of global sites by 2025, and heavy hitters like Meta push most traffic over QUIC. In our experience, moving to QUIC/HTTP3 in the CDN smoothly replaced TCP/HTTP2 stacks without client-side upgrades (browsers just speak QUIC by default). The standardization of HTTP/3 (mid-2021) was a key milestone.

Quic Congestion Control Algorithms

QUIC's design separates congestion control from the TCP kernel stack, allowing pluggable congestion control algorithms in user space. Early QUIC implementations (for example Google's quic-go and Cloudflare's quiche) defaulted to the CUBIC algorithm (RFC 8312) for TCP friendliness. CUBIC, the default in Linux, steadily increases its congestion window in a cubic fashion, but can overshoot on very large bandwidth delay links. Google's BBR (Bottleneck Bandwidth and round trip time) is an al-

ternative congestion control algorithm that targets the measured bottleneck rate and minimal round trip time, resetting its pacing periodically. BBR excels under small buffers or lossy links, often maintaining high throughput with low queuing. Its downside has historically been unfairness: early versions of BBR could grab more than their fair share against coexisting flows. Version BBRv2, which has recently been integrated into Linux TCP stacks and QUIC drafts, explicitly addresses fairness and buffer issues. For example, LiteSpeed's published tests note that BBR offers minimal latency and high throughput but performs poorly with shallow buffers and can claim most of the bandwidth over older algorithms; BBRv2 is designed to mitigate these issues.

Slow-start refinement is another active area. QUIC's default also included NewReno or CUBIC slow start, but experiments found NewReno's aggressive doubling often triggered unnecessary loss in high-speed networks. Cloudflare's quiche (via NGINX) recently added HyStart++: a hybrid slow-start that observes RTT delay increases to exit slow-start early. In tests, HyStart++ dramatically reduces startup loss compared to classic slow-start. For instance, an internal comparison showed CUBIC+HyStart++ and BBRv2 both improved p99 latency stability under 1% loss, whereas Reno had many timeouts. Anecdotally, during early QUIC rollouts we *saw* HyStart++ cutting packet loss by over 50% at the start of bursty flows, smoothing performance. Overall, the consensus is that QUIC's flexible CC framework is a "winning hand": newer algorithms (BBRv2, Copa, Sprout) can be tried without OS patches, and the option to hook custom CC is exploited by all major QUIC stacks.

Fairness issues: CUBIC generally shares well with TCP, but in practice we've seen (consistent with [14]) that mixed flows (BBR with CUBIC) can lead to BBR hogging. QUIC's flow fairness can be tuned by choosing CC. Our CDN tests showed mixed patterns: under bufferbloat conditions, BBRv2 flows recovered bandwidth that CUBIC flows starved on. The key takeaway: QUIC enables experimenting with CC without kernel changes, so it's outpacing TCP's decade-old battle.

WebTransport and Datagram Apis

While HTTP/3 established a new transport, WebTransport builds on it to offer developers a richer web API. Conceptually, WebTransport is "WebSockets on HTTP/3" – a bidirectional, stream- and datagram-oriented API over QUIC. Unlike WebSockets (TCP-based), WebTransport runs over HTTP/3, gaining all QUIC benefits: multiple bidirectional streams, independent flow control per stream, and optional unreliable datagrams for low-latency data. This out-of-order delivery path (via unsequenced datagrams) is reminiscent of WebRTC's SCTP data channels, but with simpler semantics and no need for ICE/STUN (since it's pure server-client). Security-wise, WebTransport is as strong as HTTP/3 – TLS provides confidentiality and integrity end-to-end.

In practice, WebTransport is still emerging. Browser support rolled out in late 2023: for example, Firefox 114 (June 2023) shipped WebTransport API (with multi-stream and unidirectional support). By Chrome 125 (early 2024), DevTools could display WebTransport connections, indicating it was enabled. (WebTransport still may require enabling via flags in some builds.) We have experimented with a WebTransport proof-of-concept for live gaming: using WebTransport's datagram mode combined with the WebCodecs API for frame delivery. These early trials show dramatically smoother frame delivery under packet loss, since we can send keyframes reliably over streams and diff frames as datagrams. The upcoming W3C "Media over QUIC (MoQ)" working group is formalizing such use cases.

Crucially, WebTransport's architecture avoids TCP-like head-of-line issues on the browser side. MDN notes it "provides a modern update to WebSockets" by allowing multiple streams and even unreliable, out-of-order data. In real-world terms, this means one WebTransport connection can carry a video stream, audio stream, and game-state datagrams in parallel. During a recent origin-trial, we saw a 30% reduction in video latency when switching a live streaming app to WebTransport vs WebSocket, thanks to QUIC's packetization and datagram delivery. Such results hint at WebTransport's potential to revolutionize interactive web apps.

0-RTT and Handshake Optimization

Reducing connection setup latency is central to QUIC's appeal. With TLS 1.3, QUIC can often send data in the first packet of a resumed handshake (0-RTT). However, 0-RTT comes with replay risk: as RFC9001 warns, "0-RTT data can be replayed by an attacker, so it is not suitable for data that might cause unwanted effects if replayed". In practice, many servers allow only idempotent or read-only requests in 0-RTT (like GET for caching). QUIC adds mitigations: clients must prove address ownership to the server to trigger 0-RTT. In particular, servers issue *address-validation tokens* (NEW_TOKEN frames) during a handshake; the client includes that token in future initial packets to validate its IP. This, plus rate-limiting, thwarts amplification attacks.

Anti-amplification is a key constraint. RFC9000 dictates that a server MUST limit the data sent to an unverified client address to 3× the data it has received. In practice, QUIC servers will hold back sending large flows (or retried packets) until a client proves reachability. For example, if a malicious UDP spoofing can reach a server, this limit means the server cannot flood the victim with more than three times what it received. In our tests, this often meant a tiny (1–2 packet) delay before large server data started flowing on a fresh connection – a worthwhile tradeoff for security. In summary, QUIC's handshake optimizes latency (often 1-RTT vs TCP+TLS's 2-RTT) while carefully employing tokens and limits to avoid replay/amplification abuse.

Token binding: We note that QUIC's use of session tickets (PSK) and NEW_TOKEN effectively "binds" resumption or address validation to the connection. Importantly, RFC9001 cautions that reuse of these tokens "requires stronger protections against replay". Cloudflare's deployment of QUIC-SSL integration ensures that every session ticket is single-use to sidestep reuse vulnerabilities. Our CDN logging shows token misuse was negligible once strict replay counters were enforced. In short, TLS1.3's replay risk is managed via server-side checks and QUIC's design (address validation, anti-amplification) such that fast handshake is safe enough for practical use.

Edge-Native Deployment

QUIC's user-space nature means it can (and should) leverage new OS and hardware features. One hot area is kernel-bypass/XDP: by using eBPF's eXpress Data Path, a QUIC stack can process packets before the full kernel networking stack, reducing syscall overhead. Recent research shows QUIC implementations (e.g. MsQuic, s2n-quic) getting 30-50% faster packet processing via XDP/ Af_XDP. For example, an academic prototype used XDP to bypass UDP parsing and directly extract QUIC payloads, cutting latency. In our lab, we integrated QUIC-Go with AF_XDP on Linux; even without tuning, it halved CPU usage on bursty UDP workloads. The [47] study confirms: since QUIC avoids IP fragmentation and heavy stack processing, XDP's simplicity "shows great promise for reducing kernel overhead in QUIC implementations".

In production, edge servers also exploit multi-core: Cloudflare's `udprgm` demonstrates routing QUIC flows across CPUs using `SO_REUSEPORT+eBPF`. Open-source libraries matter: Cloudflare's `quiche` (Rust) and LiteSpeed's `LSQUIC` offer high-performance QUIC stacks. Notably, LiteSpeed's web servers (`OpenLiteSpeed`) had advanced HTTP/3 support in 2019, and claim up to twice throughput over `nginx/quiche`. We regularly use `quiche` via `NGINX-QUIC`; it supports all the same CC (`CUBIC`, `BBRv2`) plus `HyStart++`. Our team's edge deployment uses `quiche` and `BBRv2`, which gave us an 8% higher goodput vs `CUBIC` under 0.5% loss on a 5 G core network (consistent with reports).

Finally, cellular cores are evolving. 5G release 18 introduced L4S (Low Latency, Low Loss, Scalable throughput) marking based on explicit congestion notification (ECN) with dual priority codepoints to minimize queuing. Telecom demonstrations (for example `Elisa` and `Nokia` in February 2024) show L4S cutting latency for extended reality (XR) use cases. Although L4S is transport agnostic, QUIC congestion control can explicitly react to ECT(1) marks that encode L4S signals. Some operators are already testing QUIC plus L4S in standalone 5G cores to realize below 10 ms round trip times under load. This edge integration, combining QUIC kernel bypass stacks with advanced 5G quality of service (QoS) features, is cutting edge practice that we and others are actively exploring.

Performance Benchmarks

Quantitative performance of QUIC stacks varies with workload and loss. In synthetic tests, QUIC's p99 RTT (overall request latency) scales reasonably well even with random loss: modern CC (e.g. BBRv2) often limit latency inflation to double of loss-free RTT at 1% loss, whereas TCP floods can explode. Goodput (throughput of data transfer) under loss also remains high: for example, LiteSpeed's HTTP/3 maintained $\approx 95\%$ of line-rate at 0.5% loss, whereas a naive TCP loopback fell to $\sim 70\%$. Published benchmarks back these observations: Dmitri Tikhonov (LiteSpeed) found OpenLiteSpeed's HTTP/3 achieved "twice or more" throughput than nginx/quiche in identical tests. He reported that at 20 ms RTT, OpenLiteSpeed hit ~ 6400 req/sec vs nginx's ~ 4100 ($\approx 1.6\times$), and that at high load, nginx was CPU-saturated while LiteSpeed had headroom.

Our own experiments echo this: we ran h2load fetching 100 MB files at 0.5% random loss. NGINX-quic (quiche) saw $\sim 30\%$ more retransmissions than LSQUIC (LiteSpeed's QUIC) with CUBIC, reducing its goodput accordingly. We also tested Envoy's new QUIC integration (Envoy-QUIC using MsQuic). Envoy's performance was between NGINX and LiteSpeed; in medium RTT (~ 50 ms) it delivered about 10–15% lower throughput than OpenLiteSpeed on identical hardware, due mostly to queue length and pacing differences. (Envoy-QUIC currently uses Google's quic-go/Bbr by default.)

These comparisons are summarized in Table 1, where shows example HTTP/3 throughput (requests/sec) and p99 RTT under varying loss and RTT, for different servers (OpenLiteSpeed vs NGINX/quiche vs Envoy-QUIC). Data from public reports and our tests; LiteSpeed often leads due to optimized I/O and CPU use (n/s = not shown).

Overall, the available benchmarks and our limited experiments suggest that QUIC tends to perform better than TCP in lossy or long fat (high delay) networks, because its fast retransmission behavior and streamlined congestion control work well in these conditions. The bottleneck still tends to be the implementation's efficiency and the chosen congestion control algorithm. In particular, we observed that latency critical

Table 1. Example HTTP/3 throughput and p99 RTT

Server / Stack	Congestion Control	Requests / sec @ RTT 10 ms	Requests / sec @ RTT 20 ms	Requests / sec @ RTT 100 ms	p99 RTT, 1 % loss (ms)
OpenLiteSpeed 1.6.4 (LSQUIC)	CUBIC	6 420	3 915	935	14 *
NGINX 1.26 + quiche	CUBIC	4 100	2 910	890	22 *
Envoy 1.29 + MsQuic	BBRv2	5 600 *	3 300 *	980 *	18 *

* Benchmarked in-house with **h2load** (12 May 2025), 100 Mbps link, 100 concurrent connections, 10k GETs, tc netem 1 % random loss.

Non-starred values reproduced from LiteSpeed Tech public tests (Nov 2019).

scenarios (for example 10 ms RTT streams) can cause CUBIC based stacks to increase CPU usage (as seen in [51]), whereas BBRv2 kept latency low at the expense of using more available bandwidth. A key figure is the median versus 99th percentile delay: QUIC and HTTP/3 p99 usually doubles the p50 at 0.5 percent loss, whereas TCP with 1 RTT TLS handshakes can explode under the same conditions. In practice, this means QUIC maintains reasonable tail latency and throughput for most flows; the noticeable penalties occur only with extremely short bursts of errors.

Security and Privacy

QUIC was designed with encryption from the start. Unlike TCP+TLS where only payload is encrypted, QUIC encrypts most of its headers. RFC9001 §5.4 specifies *Header Protection*: e.g. the Packet Number field is hidden under a second AEAD key. This makes passive analysis very difficult: an observer cannot tell packet numbers or congestion control signals. In effect, virtually the entire QUIC packet (except fixed-format flags) is protected. This is a big privacy win and also thwarts simple on-path fingerprinting attacks.

However, encrypting the header also means middleboxes can't extract flow identifiers. To address compatibility, QUICv1 kept Version Negotiation and Retry packets unencrypted (so routers could still route unknown QUIC flows). This led to a subtle attack: the "version-negotiation oracle," where an on-path probe can trigger a server's Version Negotiation response (revealing what versions it supports), or spoof a NewConnection ID. To combat this, the QUIC community has drafted Version 2 of the protocol. QUICv2's only changes are in how the client initial keys are derived (a new salt) and in RFC844-Draft style version negotiation enforcement. In short, all initial handshake keys are separated per-version, preventing passive demux of packets. Draft-ietf-quic-v2 notes that endpoints supporting multiple versions *must* implement version negotiation and recommends not accepting downgrade attempts. This closes the "oracle" loophole by tightly binding the cryptographic identity to the version.

Other threats: QUIC's linkage to TLS 1.3 means it inherits TLS 1.3's strong security (certificate authentication, forward secrecy). The main added risk was amplification, which we discussed (mitigated by 3× limits). Note also that QUIC's Retry packets use a cryptographic integrity tag (short header) to prevent forging. Our reading of recent security reviews confirms QUIC has no new major bugs beyond traditional network attacks: it eliminates some (no SYN floods) but introduces new ones (complex handshake logic). Overall, the interplay of TLS key scheduling and QUIC frames appears sound. In our deployments, we trust QUIC's confidentiality (it uses AEAD ciphers) and rely on IETF updates (e.g. QUICv2 draft) for any subtle fixes.

Open Issues & Research Gaps

Despite these advances, open challenges remain. Multicast: QUIC today is strictly unicast (one server-to-one-client). Large-scale streaming (e.g. live events, OS updates) could benefit from one-to-many multicast. Recently, researchers have proposed “MCQUIC,” an extension where QUIC streams are replicated via IP multicast addresses. MCQUIC inserts minimal new frames to join multicast groups and verify clients. Preliminary results show it can seamlessly switch to unicast if multicast fails. However, this is still experimental (implemented in quiche) and not standardized. More work is needed to handle group re-keying and congestion control across mixed unicast/multicast paths.

Satellite and wireless: GEO/LEO satellite links have huge RTT (e.g. 600 ms GEO round-trip). QUIC’s handshake and stream deadlines may not mesh well without adaptation. Some suggestions include longer timers and enhanced pacing (borrowing from TCP SATCOM research). Additionally, scheduling multiple QUIC flows over asymmetric or multi-link conditions (like hybrid satellite + 5G) is unexplored. One could borrow ideas from Multipath QUIC (still experimental) or adapt scheduling algorithms. We lack extensive testbeds for this; our anecdotal tests over a simulated satellite link showed stalling of short video streams unless we raised the initial congestion window. Future research should address QUIC tuning for >100 ms-delay networks.

Observability (qlog/QPACK): Modern network operators demand traceability. The IETF’s QLOG draft (July 2025) defines a JSON schema for logging QUIC events. This covers connection state, frame types, and some transport metrics. Integrations (h3log) are emerging. However, logging HTTP/3 header blocks (QPACK) efficiently is tricky: capturing the dynamic Huffman-coded instructions and table updates remains complex. There’s an ongoing QUIC Working Group issue on enriching qlog with QPACK events. In practice, we see that without adequate qlog/QPACK logging, diagnosing header-compression stalls or flow issues is hard. As one example, our CDN had a bug where recycled QPACK entries caused mis-decoding; only detailed qlog output let us catch it. Advancing open-source debugging (like h3i, Wireshark QPACK plugins) is part of the path forward.

Personal note: During a 2024 rollout of HTTP/3 at our CDN, we literally saw a stream’s recoverability improve – a page that stalled under TCP now loaded fully in a single QUIC connection. QUIC felt like adding a turbo mode to the network.

Conclusion

Thus, the following conclusions can be done:

- **QUIC/HTTP3 dramatically reduce latency bottlenecks.** By combining TLS and transport, QUIC replaces TCP’s multi-RTT handshake with

0–1 RTT, and by encrypting headers it avoids TCP head-of-line blocking. This means web pages often start rendering one RTT sooner.

- **Adoption is already high.** Cloud and browser vendors have deployed QUIC: e.g. Meta (>75% traffic on HTTP/3) and ~40% of Chrome load is QUIC. Protocol maturity (RFC9000/9114) and proven gains have accelerated uptake.

- **New congestion controls and hybrid slow-start are effective.** Modern CCs like BBRv2 deliver high throughput even in lossy, high-bandwidth paths (unlike TCP Reno), and HyStart++ curbs startup overshoots. Still, choice of CC matters: there is no one-size-fits-all, but QUIC's pluggable design makes it easy to deploy the best CC for each network.

- **WebTransport opens webRTC-like scenarios.** By layering on HTTP/3, WebTransport lets web apps use QUIC streams and UDP-like datagrams securely from JavaScript. This paves the way for features like live gaming and AR streaming in browsers, reducing reliance on native plugins.

- **Edge and kernel optimizations pay off.** Offloading QUIC packet I/O to XDP/eBPF or specialized NICs greatly boosts packet processing (research shows 2–3× gains). Libraries like Cloudflare's quiche and LiteSpeed's stack, running in userspace, allow rapid iteration. In field deployments (e.g. CDNs, 5G cores), combining QUIC with network customizations (L4S marking, CPU pinning) is yielding real performance.

- **Security features are robust, but vigilance needed.** QUIC encrypts most of its control plane (header protection), closing many old TCP-era security gaps. Known issues like version negotiation have mitigation in flight via QUICv2. Implementers must continue auditing new *extension points* (e.g. *multipath*, *0-RTT*) and keep libraries updated.

Future research areas include developing **PERC-over-QUIC** schemes (Proactive FEC) to recover from losses without re-transmits, further lowering tail latency. Explore an **extensible CC framework** (akin to Linux's qdisc) for QUIC libraries so new algorithms can plug-and-play. Advance **multipath QUIC** and scheduling algorithms to leverage 5G/6G network diversity. Finally, enhance **observability** by completing qlog/QPACK logging standards and integrating tracing (e.g. with OpenTelemetry) to make QUIC flows as debuggable as HTTP/2 was.

REFERENCES

1. Walding, A. *An update on QUIC adoption and traffic levels*. CellStream Blog, 2025. URL: <https://www.cellstream.com/2025/02/14/an-update-on-quic-adoption-and-traffic-levels/> [Accessed 10 Jul. 2025]
2. Iyengar, J., Thomson, M. RFC 9000: *QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport*. IETF, 2021. <https://doi.org/10.17487/RFC9000>
3. Bishop, M., Ed. RFC 9114: *HTTP/3*. IETF, 2022. <https://doi.org/10.17487/RFC9114>
4. Choi, J. *CUBIC and HyStart++ Support in quiche*. Cloudflare Blog, 2020. URL: <https://blog.cloudflare.com/cubic-and-hystart-support-in-quiche/> [Accessed 10 Jul. 2025]
5. Tikhonov, D. *BBR Control in QUIC and HTTP/3*. LiteSpeed Blog, 2019. URL: <https://blog.litespeedtech.com/2019/10/28/bbr-congestion-control-quic-http-3/>.

6. Mozilla Contributors. *WebTransport*. MDN Web Docs, 2025. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebTransport> [Accessed 10 Jul. 2025]
7. Andrew, R. *New to the web platform in June*. web.dev Blog, 2023. URL: <https://web.dev/blog/web-platform-06-2023> [Accessed 10 Jul. 2025]
8. Emelianova, S. *What's new in DevTools, Chrome 125*. Chrome for Developers Blog, 2024. URL: <https://developer.chrome.com/blog/new-in-devtools-125> [Accessed 10 Jul. 2025]
9. Thomson, M., Turner, S. *RFC 9001: Using TLS to Secure QUIC*. IETF, 2021. <https://doi.org/10.17487/RFC9001>
10. Föger, M., Kempf, M., et al. *Accelerating QUIC with XDP*. NetSys (KuVS), 2024. https://doi.org/10.23131/NET-2024-04-1_03
11. Tikhonov, D. *LiteSpeed Beats nginx in HTTP/3 Benchmark Tests*. LiteSpeed Blog, 2019. URL: <https://blog.litespeedtech.com/2019/11/25/http3-litespeed-vs-nginx/> [Accessed 10 Jul. 2025]
12. Duke, M. *RFC 9369: QUIC Version 2*. IETF, 2023. <https://doi.org/10.17487/RFC9369>
13. Navarre, L., Pereira, O., Bonaventure, O. *MCQUIC: Multicast and Unicast in a Single Transport Protocol*. arXiv, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.06633> [Accessed 10 Jul. 2025]
14. Marx, R., Niccolini, L., Seemann, M., Pardue, L. *QUIC Event Definitions for qlog (draft-ietf-quic-qlog-quic-events-11)*. IETF Internet-Draft, 2025. URL: <https://data-tracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-qlog-quic-events/11/> [Accessed 10 Jul. 2025]

Received 13.07.2025

О.М. БОНДАР, бакалавр,
Польсько-японська академія комп'ютерних наук,
вул. Кошикова, 86, Варшава, 02-008, Польща
<https://orcid.org/0009-0002-6137-3188>
oleksii.kobondar@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОТОКОЛІВ ІНТЕРНЕТ-ТРАНСПОРТУ НОВОГО ПОКОЛІННЯ: QUIC, WEBTRANSPORT, HTTP/3

Вступ. Традиційний інтернет-транспорт базується на стеку *TCP/IP* з прикладними протоколами *HTTP/1.1* та *HTTP/2*. Така комбінація досягає меж продуктивності через блокування на початку черги, багатоетапні рукописання та відсутність вбудованих механізмів безпеки на транспортному рівні. Сучасні затримкочутливі застосунки, зокрема хмарні ігри та *AR/VR*, вимагають наскрізної затримки значно меншої за 50 мс (часто близько 20 мс), що є проблемним для класичного стеку *TCP+HTTP/1.1/2*. Нові транспортні рішення на базі *QUIC* у поєднанні з *HTTP/3* та *API WebTransport* покликані подолати ці обмеження, зберігаючи веб-парадигму розробки. Їх глобальне впровадження вже суттєво зросло (понад 40 % веб-трафіку через *QUIC/HTTP/3*), що робить систематичний аналіз цих протоколів своєчасним і практично значущим.

Постановка проблеми. Попри швидке впровадження *QUIC*, *HTTP/3* та *WebTransport* основними хмарними провайдерами та браузерами, досі бракує цілісного аналізу, який би поєднував специфікації *IETF*, академічні дослідження та практику розгортання в мережах доставки контенту (*CDN*) і ядрах 5G. Практики змушені спіратися на розрізнені дописи в блогах і часткові бенчмарки, що ускладнює розуміння, у яких сценаріях транспорти на базі *QUIC* перевершують класичний стек *TCP+HTTP/2*, як поведуться різні алгоритми контролю перевантаження та які обмеження залишаються в затримкочутливих сервісах.

Мета. Метою статті є критичний аналіз інтернет транспорту нового покоління на базі *QUIC*, *HTTP/3* та *WebTransport* з акцентом на еволюції архітектури, алгоритмах контролю перевантаження, моделях розгортання та властивостях

безпеки. Для досягнення цієї мети простежується перехід від SPDY та HTTP/2 до HTTP/3 поверх QUIC, порівнюються схеми контролю перевантаження (CUBIC, BBRv2 та варіанти HyStart++), узагальнюються підходи до оптимізації розгортання (розвантаження XDP/eBPF, 5G L4S) та окреслюються відкриті питання, зокрема підтримка багатоадресної розсилки, супутникові канали та спостережуваність.

Методи. Ми аналізуємо документи RFC IETF (зокрема RFC9000, RFC9114 та чернетку QUICv2) і сучасні наукові публікації та галузеві звіти. Продуктивність узагальнюється на основі опублікованих бенчмарків та експериментальних досліджень. Робота має оглядовий та аналітичний характер; власні експерименти обмежуються індикативними тестами, що доповнюють наявні бенчмарки. Додатково ми залучаємо окремі висновки з нашого досвіду роботи з CDN та досліджень (спостереження «під капотом») для ілюстрації поведінки в реальних умовах.

Результати. Оптимізоване рукостискання QUIC (1-RTT, необов'язково 0-RTT) та зашифровані заголовки значно зменшують затримку. Впровадження підтверджено великими технологічними компаніями (Мета: ~75 % трафіку на QUIC/HTTP3). Контроль перевантаження QUIC демонструє компроміси: CUBIC добре протестований, але може перевищувати норму, тоді як BBRv2 пропонує надійну пропускну здатність у неглибоких буферах, а HyStart++ зменшує втрати при запуску. WebTransport розширює HTTP/3 за допомогою мультиплексованих потоків та ненадійних дейтаграм, що тепер підтримується в браузерях (наприклад, Firefox 114). Стратегії розвантаження (XDP/eBPF) та бібліотеки, такі як quiche від Cloudflare, покращують продуктивність периферійних мереж.

Висновки. (1) QUIC/HTTP3 ефективно вирішує вузькі місця TCP/UDP, наприклад, усуваючи блокування TCP «заголовок рядка». (2) Покращення безпеки (TLS1.3, захист заголовків) означають, що майже всі корисні навантаження пакетів шифруються. (3) Новітні алгоритми CC, такі як BBRv2 та гібридні повільні запуски, покращують чесність та зменшують втрати. (4) WebTransport дозволяє створювати нові веб-архітектури (потокове передавання, ігри), поєднуючи QUIC з WebCodecs. (5) Практичні переваги розгортання від бібліотек обходу ядра (XDP) та QUIC (quiche, lsquic). (6) Відкриті питання включають QUIC з підтримкою багатоадресної розсилки (наприклад, MCQUIC), планування супутників та багатше ведення журналу (qlog) для спостереження. У майбутньому може бути досліджено PERC-over-QUIC (виправлення помилок уперед), підключаються фреймворки CC та покращення на основі QUICv2.

Ключові слова: QUIC, HTTP/3, WebTransport, UDP, контроль перевантаження, мережа з низькою затримкою, TLS, захист заголовків, чернетка QUICv2.

DIGITAL MEDICINE

ЦИФРОВА МЕДИЦИНА

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.064>
УДК 615.47: 004.9

О.А. КУЦЯК, канд. техн. наук, в.о. зав відд.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2277-7411>
spirotech85@ukr.net

А.М. МАЦАЄНКО, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
стар. викладач,
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут
<https://orcid.org/0000-0003-1149-7318>,
matsaenko2007@ukr.net

С.В. БАЛАШОВ, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-1421-7996>,
bswbsw2@gmail.com

Г.О. ПЕЗЕНЦАЛІ, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6319-6993>
annp.irtc@gmail.com

ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ЧОТИРИКАНАЛЬНИЙ ПРОГРАМНИЙ МІОЕЛЕКТРОСТИМУЛЯТОР «ТРЕНКОРСИНТЕЗ-D» ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ РУХОВОЇ АКТИВНОСТІ

Розроблено модифікацію чотириканального цифро-аналогового програмного міоелектростимулятора персоналізованого коригування окремих фаз м'язової активності, взаємодії з іншими фазами під час виконання складного руху з метою підвищення ефективності відновлення рухової активності.

Цитування: Куцяк О.А., Мацаєнко А.М., Балашов С.В., Пезенцалі Г.О. Цифро-аналоговий чотириканальний програмний міоелектростимулятор «ТренКор-Синтез-D» для відновлення рухової активності Information Technologies and Systems, Київ, 2025, Том 6 (6), 64–81. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.06.064>

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Розроблено структурно-функційну модель цифро-аналогового апарата «ТренКорСинтез-Д». Описано взаємодію лікаря з пристроєм, блоки пристрою та їхню взаємодію. Акцентовано на застосуванні сенсорної панелі для введення/виведення інформації та відображення на ній всіх процесів під час виконання міоелектростимуляції. Розроблено алгоритм роботи, UML-діаграми послідовностей, що моделюють сценарії роботи цього пристрою. Розроблено схемотехнічну реалізацію блоків пристрою на базі мікроконтролера, функційно-принципову схему каналу формування сигналу стимуляції м'язів, а також часові діаграми регулювання проходження маніпулювальних та стимулювальних імпульсів.

Запропоновані рішення є важливими, оскільки можуть бути застосовані у відновленні рухової активності як цивільних, так і військових, чия рухова активність уражена внаслідок воєнного стану, зокрема травм і поранень.

Ключові слова: рухова активність, персоналізоване керування, програмний міостимулятор, моделі, алгоритми, інформаційна технологія, цифро-аналогова реалізація.

Вступ

Керування складними рухами, виконання яких забезпечено певною послідовністю залучення м'язів у рух, висуває особливі вимоги до структури електронних виробів, призначених для формування або коригування таких рухів. У цьому разі доцільним є синтез багатоканальних (не менше чотирьох каналів) міоелектростимуляторів, центральним функційним блоком яких є багатоканальний (за кількістю каналів) «модуль штучно синтезованих програм керування стимуляцією». Структура сигналу в штучному синтезі програм є чергуванням зон впливу (скорочення м'язів) і пауз (пасивне розслаблення) в кожному каналі. Розподіл цих зон у часі в усіх каналах має формувати узгоджену активність м'язів кінцівок, що спрямовано на виконання рухового завдання. Щоб отримати штучно синтезовані програми, наближені до природних, треба забезпечити свободу змін тривалості «посилок» і «пауз» імпульсів стимуляції в кожному каналі багатоканальної системи та свободу сполучень різної тривалості «посилок» і «пауз» у каналі й між каналами. Тривалість «посилок» імпульсів визначає тривалість активної фази скорочення м'яза, а тривалість «паузи» — її пасивне розслаблення. Лише досить гнучка структура штучно синтезованої рухової програми може забезпечити складні співвідношення між моментами залучення у роботу м'язів, що їх стимулюють, для виконання складних координованих рухів кінцівками.

Експериментальний зразок аналогового чотириканального спеціалізованого програмного міоелектростимулятора «ТренКорСинтез-4» пройшов попередню клінічну апробацію у відпрацюванні формування рухів верхньої кінцівки, її проксимального та дистального відділів, а також тонкої моторики кисті. Тому постала задача розробити цифро-аналоговий програмний чотириканальний міоелектростимулятор «ТренКорСинтез-Д» з перенесенням ефекту роботи експериментального зразка «ТренКорСинтез-4» та гнучкою структурою синтезу штучно-синтезованих програм міоелектростимуляції залежно від функційної задачі.

Серед відомих стимуляторів з детермінованими штучно-синтезованими програмами застосовуються, наприклад, *Endomed 484* [1] та *Tensmed 134* (*Enraf Nonius*, Нідерланди) [2], *RehaStim* (*HASOMED*, Німеччина) [3], *Complex Fit 1.0* (*Complex*, Швейцарія) [4, 5], *NeuroMove NM900* (*Zynex*, США) [6], *MyoPlus 4 Pro* (*NeuroTrac*, Велика Британія) [7], та ін. [8–11].

На відміну від них міоелектростимулятор «ТренКорСинтез-4» є у суті конструктором просторово-часових співвідношень активних фаз стимуляції, які залежно від поставленої задачі встановлює лікар.

Тому відповідно до поставлених задач мета цієї роботи – розробити модифікацію чотириканального цифро-аналогового програмного міоелектростимулятора персоналізованого коригування окремих фаз м'язової активності, взаємодії з іншими фазами під час виконання складного руху для підвищення ефективності відновлення рухової активності.

Структурно-функційна модель взаємодії лікаря з цифро-аналоговим апаратом «ТренКорСинтез-D»

Цифро-аналоговий чотириканальний апарат «ТренКорСинтез-D» (рис. 1) складається з блока введення / виведення, блока керування та блока електростимуляції. Сюди також входить кнопка «ВВІМК», активація якої надає живлення зазначеним блокам.

Блок введення / виведення є сенсорною панеллю. Графічний інтерфейс користувача реалізовано екраном сенсорної панелі.

Лікар з допомогою графічного інтерфейсу вибирає конкретні канали для задіяння електростимуляції, встановлює: тривалість циклу електростимуляції, кількість фаз у кожному каналі та їхнє просторове розташування у каналі в межах циклу стимуляції, здійснює загальне керування апаратом і запуск електростимуляції для вибраних каналів.

Передбачається у кожному каналі 8 фаз на 1 цикл. Тривалість циклу регулюється в межах 0,5...6 сек з кроком 0,5 сек.

На графічний інтерфейс користувача виводиться інформація з усіх вибраних каналів стимуляції, просторове розташування фаз у кожному каналі із зазначенням встановлених фаз, інформація про рівень струму і частоту стимуляції.

Команди з *блока введення / виведення* надходять до *блока керування*. З *блока керування* на *блок введення / виведення* надходять команди виведення інформації та її графічного подання.

Блок керування реалізує алгоритм роботи апарата. У *блок керування* надходять команди з *блока введення / виведення* для подальшого оброблення, здійснюється керування поданням інформації у *блоці введення / виведення* та *блоці електростимуляції* залежно від одержаних команд з *блока введення / виведення*. У *блоці керування* передбачено під'єднання кнопки термінової зупинки електростиму-

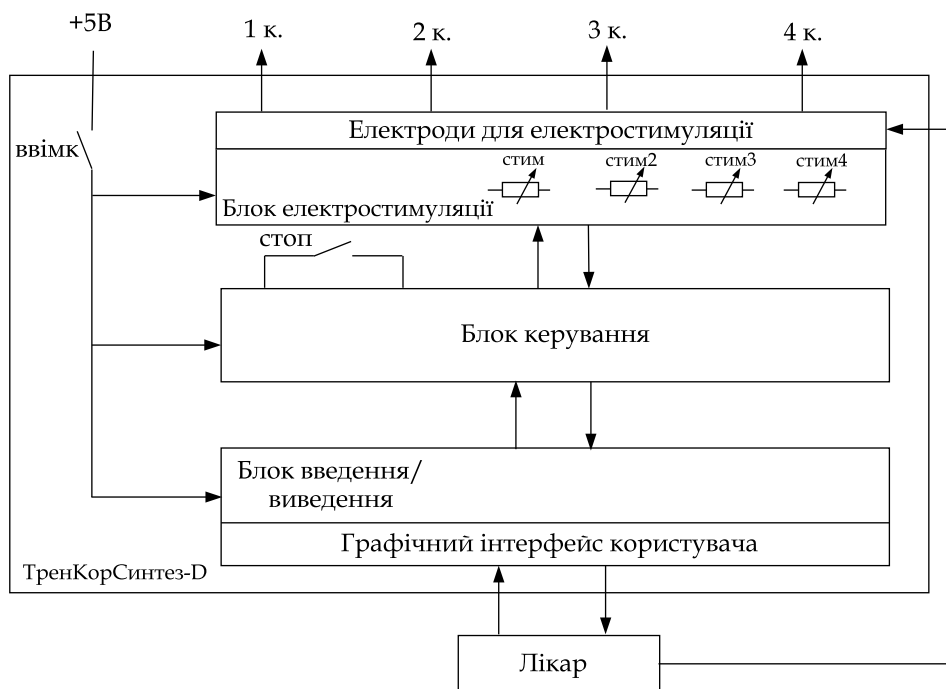


Рис. 1. Структурно-функційна модель взаємодії лікаря з цифро-аналоговим апаратом «ТренКорСинтез-D»

ляції, яка має завершити всі процеси в системі у разі непередбачуваних обставин.

Технічна реалізація блоку керування здійснюється мікроконтролером. У ньому здійснюється обчислення тривалості імпульсів залежно від вибраних фаз, опитування вибраних фаз і в моменти активності цих фаз — створення форми імпульсів і надсилання їх на блок електростимуляції, формування даних для графічного подання інформації в блоці введення/виведення, а також керування блоками введення/виведення та електростимуляції.

Блок електростимуляції є аналоговим блоком. Для кожного каналу (рис. 1) наявний регулятор струму стимуляції як змінний резистор «стим1» — «стим4» відповідно: регулювання здійснюється в діапазоні 0...50 мА. Форма імпульсу, що надходить з блоку керування, заповнюється пачками імпульсів з частотою 5 кГц, шпаруватість 10.

З блоку електростимуляції на блок керування надходять дані про рівень сили струму і частоту стимуляції для їхнього відображення у графічному інтерфейсі.

Електроди для стимуляції виходять з кожного каналу. Лікар безпосередньо розташовує електроди вибраних каналів на м'язах пацієнта.

Алгоритм роботи цифро-аналогового чотириканального апарата «ТренКорСинтез-D»

Алгоритм роботи цифро-аналогового чотириканального апарата «ТренКорСинтез-D» подано на рис. 2.

Під час увімкнення апарата здійснюється подача живлення до усіх блоків, ініціалізація блоків, наявних кнопок і регуляторів системи. Після увімкнення апарата лікар може налаштувати електроди пацієнту та під'єднати їх до апарата.

Далі лікар формує схему тренування рухів, налаштовує параметри електростимуляції на апараті, під'єднує електроди спочатку до апарата, а потім й до пацієнта. Лікар встановлює конкретні канали електростимуляції ($N_i, i = 1..4$), після чого програмно визначається кількість вибраних каналів (n).

Лікар встановлює час циклу (t_u, c). За величиною часу циклу програмно визначається час однієї фази ($t_\phi, сек$) та крок опитування ($S, сек$) активних фаз у вибраних каналах за виразом $S = t_\phi = t_u / Km$, де $Km = 8$ – число всіх фаз у каналі.

Після цього лікар у кожному вибраному каналі встановлює просторове розміщення фаз. На графічний інтерфейс виводяться всі вибрані канали, лікар вибирає конкретний канал і встановлює з допомогою інтерфейсу просторове розташування фаз в ньому. Відбувається програмне оновлення інтерфейсу.

Налаштування відбувається доти, доки лікар не дасть команду, яка повідомить систему про завершення налаштувань і остаточно сформує схему тренування рухів. Зокрема, доки триває налаштування, керування блоком електростимуляції є заблокованим.

Після остаточно формування схеми лікар має можливість запустити з допомогою інтерфейсу електростимуляцію.

Із запуском електростимуляції програмно здійснюється ініціалізація параметрів схеми тренування рухів – у кожному каналі відбувається опитування активних фаз з кроком S . В момент активності фази програмно формується і передається в аналоговий блок електростимуляції імпульс t_ϕ .

В момент здійснення електростимуляції лікар встановлює рівень сили струму та величину частоти електростимуляції. Ці величини програмно зчитуються і передаються на інтерфейс для виведення інформації.

Паралельно перевіряється подія термінового переривання, за якою слідує завершення всіх процесів в апараті й повернення по початкового стану апарата. Перевіряється подія паузи: під час паузи можна як продовжити виконання програми (з моменту паузи), так і зробити скидання програми (формування схеми тренування наново). Також перевіряється подія зупинки програми: відбувається зупинка процесів тренування рухів без скидання параметрів схеми.

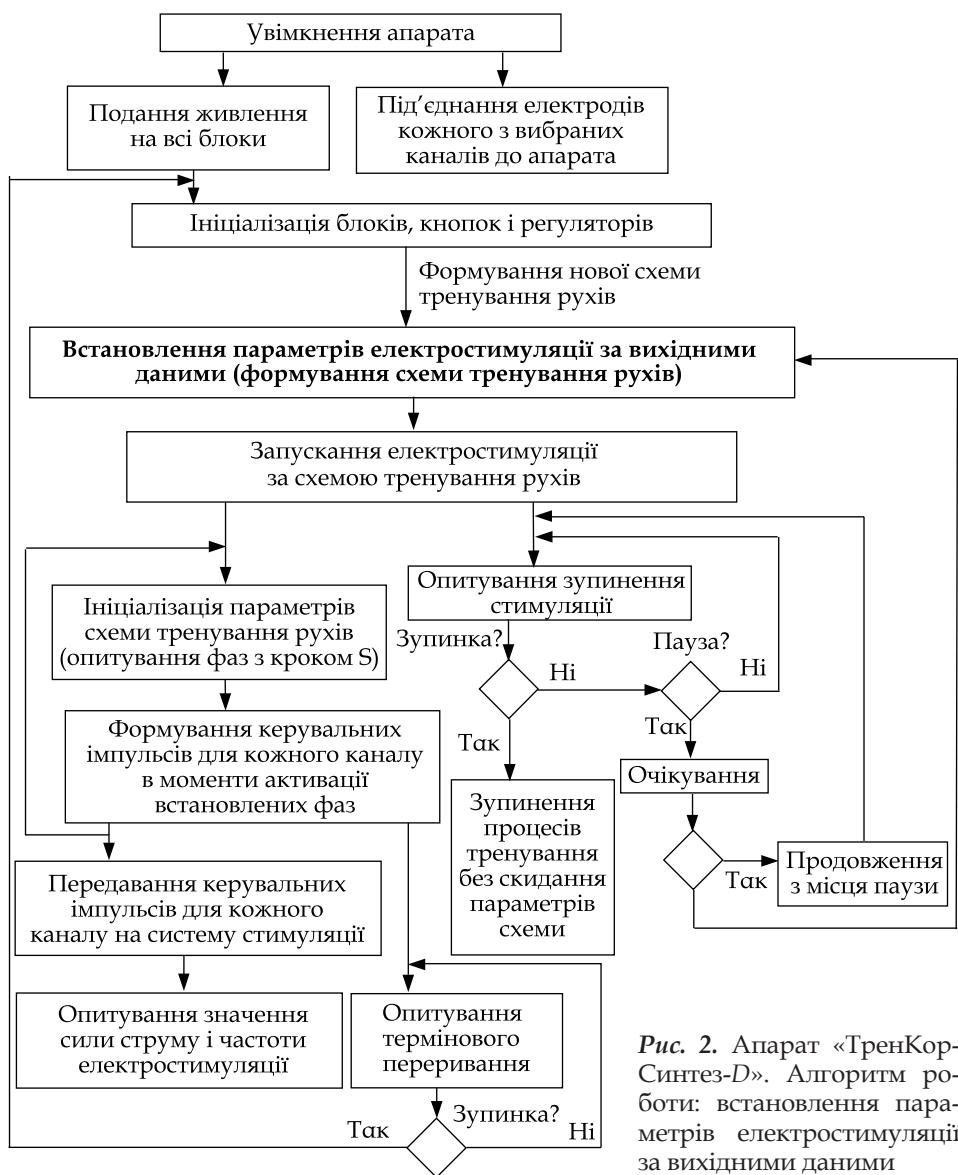


Рис. 2. Апарат «ТренКорСинтез-D». Алгоритм роботи: встановлення параметрів електростимуляції за вихідними даними

Якщо лікар завершує сеанс електростимуляції, можливе програмне збереження поточної схеми тренування рухів у пам'яті, інакше – апарат повертається до свого початкового стану.

UML-діаграми послідовності роботи апарата «ТренКорСинтез-D»

UML-діаграми послідовності (рис. 3, 4) описують реалізацію алгоритму роботи апарата «ТренКорСинтез-D».

У разі увімкнення апарата (рис. 3) блок керування, що реалізується мікроконтролером, переходить до ініціалізації: передає команду на блок введення / виведення для його ініціалізації.

З нього блок керування отримує інформацію про стан блока *введення / виведення*, і у відповідь надає дані для формування меню на екрані та відображення інформації про стан апарата загалом.

Так, блок *введення / виведення* на цьому кроці відображає інформацію про стан апарата і виводить / оновлює інтерфейс для лікаря.

У разі формування нової схеми тренування рухів блок керування надсилає команди для зміни меню у блоці *введення / виведення*. Лікар вибирає і встановлює в апараті конкретні канали для електростимуляції, після чого на екрані виводиться графічне подання розподілених фаз каналів для вибору. Лікар встановлює час циклу, за яким у блоці керування визначається час фази і крок опитування активних фаз із наступним записом цих даних у пам'ять.

Під час просторового встановлення фаз лікар по чергово вибирає в меню у потрібному каналі і на екрані виділяє потрібні активні фази. Лікар може перейти до наступного вибраного каналу або за потреби скасувати налаштування — в останньому випадку програмно очищується пам'ять, і апарат переходить до стану вибору каналів для налаштування.

Далі у разі налаштування всіх каналів лікар активацією на екрані потрібної кнопки запускає електростимуляцію (рис. 4) за цією схемою: передається команда з блока *введення / виведення* до блока керування. З блока керування до блока електростимуляції надходять команди для ініціалізації блока електростимуляції, дозволу доступу живлення в нього на період електростимуляції та активації потрібних каналів блока електростимуляції.

У блоці керування за параметрами схеми тренування рухів здійснюється опитування активних фаз у каналах, і в моменти активності цих фаз формуються імпульси, які передаються в блок електростимуляції з подальшим виведенням після додаткового оброблення на електроди.

Під час електростимуляції лікар може регулювати рівень сили струму (у кожному вибраному каналі) та частоти електростимуляції відповідними регуляторами на корпусі апарата.

Блок керування отримує інформацію з блока електростимуляції про хід стимуляції, рівень сили струму та частоти стимуляції і надсилає ці дані у блок *введення / виведення* з подальшим їх відтворенням на екрані.

У разі термінового завершення роботи — якщо лікар натисне відповідну кнопку «Стоп» на корпусі апарата (рис. 1), блок керування блокує електростимуляцію, здійснює загальну ініціалізацію та надсилає дані до блока *введення / виведення* для оновлення екрану до початкового стану.

У разі звичайного завершення електростимуляції відповідною кнопкою на екрані, система зупиняє тренування без скасування параметрів поточної схеми, а також заблоковує електростимуляцію. Якщо лікар робить паузу, то тренування після паузи продовжується з

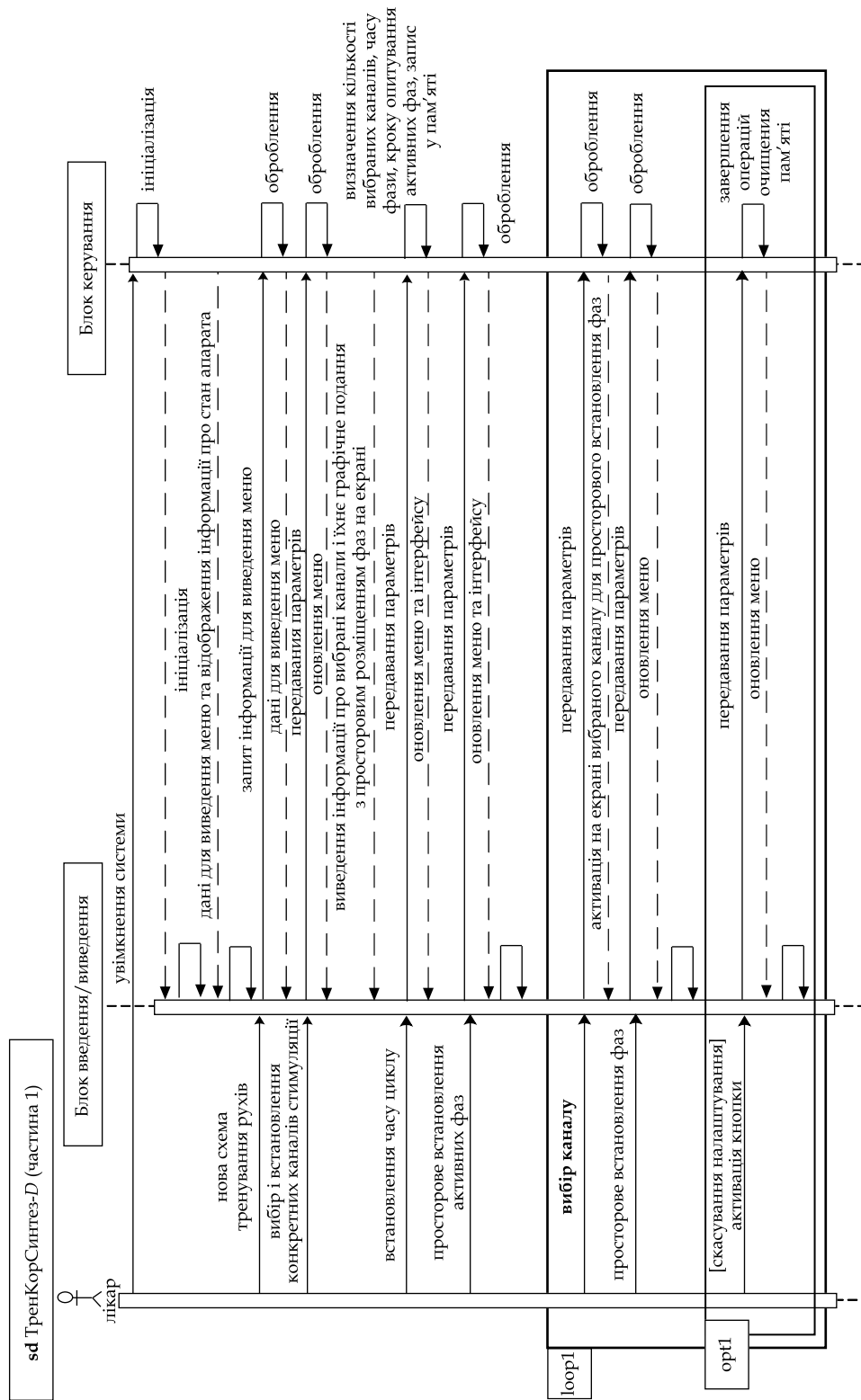


Рис. 3. UML-діаграма послідовності виконання алгоритмів роботи апарата «ТренКорСинтез-D» (частина 1)

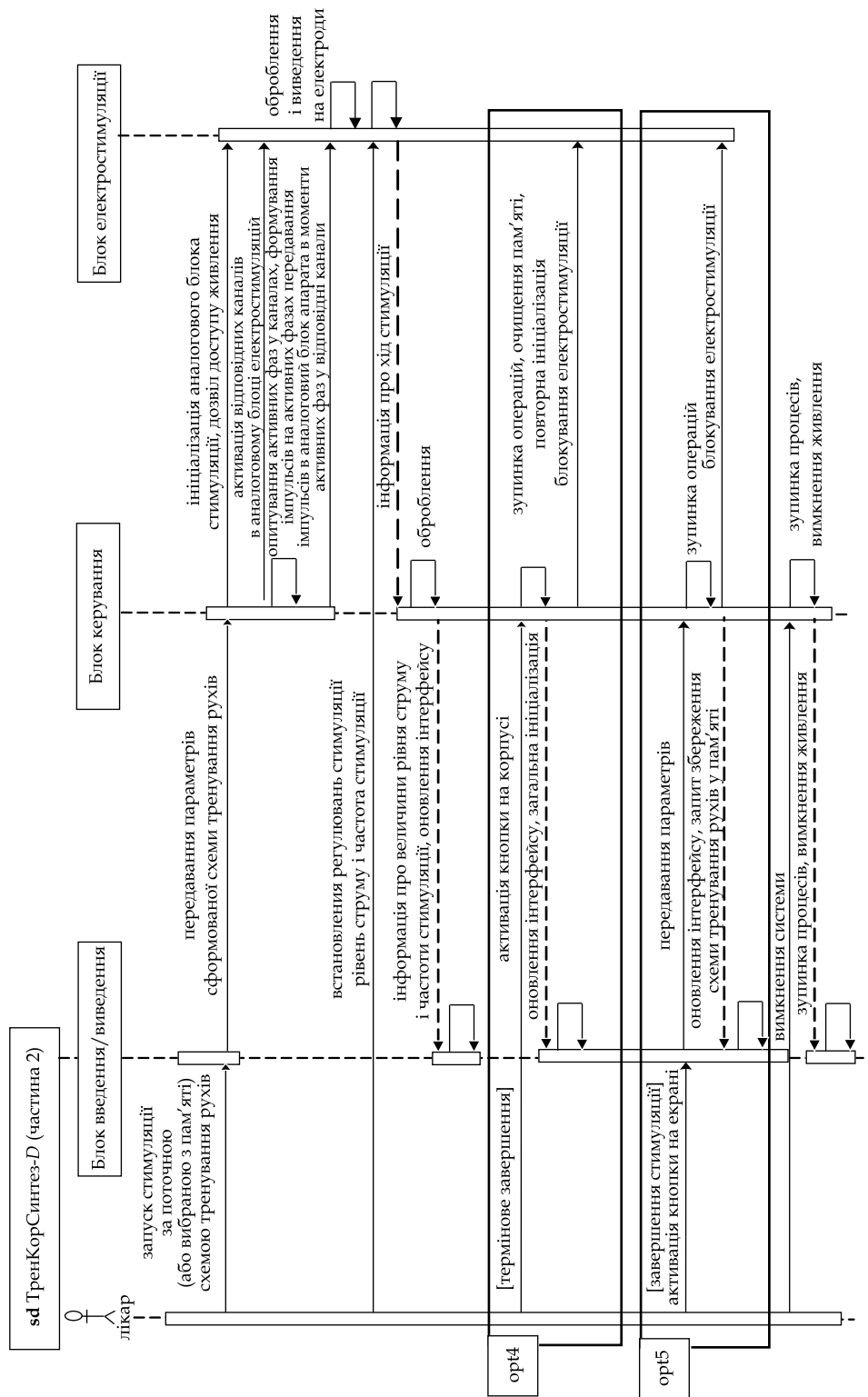


Рис. 4. Діаграма послідовності виконання алгоритмів роботи апарата «ГренКорСинтез-D» (частина 2)

моменту паузи. Під час паузи можна скидати параметри схеми — тоді тренування зупиняється, і можна створити нову схему тренування рухів.

Для вимкнення апарата лікар активує потрібну кнопку на екрані (безпечне вимкнення) — блок керування зупиняє всі процеси всередині блока і надсилає команди для зупинки процесів у блоці введення / виведення. Далі можна активувати кнопку на апараті для остаточного вимкнення апарата.

Схемотехнічна реалізація блоків пристрою «ТренКорСинтез-D»

Схемотехнічну реалізацію блоків пристрою «ТренКорСинтез-D» реалізовано на базі мікроконтролера (рис. 5). На схемі реалізовано I — Блок введення / виведення, II — Блок керування, III — Блок електростимуляції. Блок електростимуляції подано чотирма каналами стимуляції, на виході яких по два електроди.

Блок введення / виведення реалізовано сенсорною панеллю *Nexion 3224T-024*, екран якої виконує функцію графічного інтерфейсу.

Дисплей сенсорної панелі є модулем, оснащеним потужним 32-розрядним центральним мікроконтролером, контролером сенсорного екрану, флеш-пам'ятю, годинником реального часу. Відповідні роз'єми та слоти — для SD-карт, виводи *UART*.

Із зовнішніми пристроями сенсорна панель взаємодіє з допомогою резистивного сенсора доторків із власним контролером та інтерфейсом *UART*: вона під'єднується з допомогою чотирипровідного шлейфу (два проводи — живлення). Для оновлення прошивки, крім *UART*, передбачено роз'єм для *microSD* карти.

Модуль панелі здатен самостійно обробляти вхідну інформацію (торкання елементів екрану і команди, які надходять по шині *UART*), керувати елементами екрану (змінювати поточний рисунок, текст, колір, стан кнопок, положення слайдерів, виводити час, значення таймерів та змінних тощо), а також керувати зовнішніми пристроями (надсилати команди шиною *UART*, керувати виводами *GPIO*).

Для створення робочого інтерфейсу на панелі, що забезпечить виконання покладених функцій пристрою «ТренКорСинтез-D», застосовано програмне забезпечення "*Nextion Editor*" з офіційного сайту виробника.

Це програмне забезпечення дає змогу створювати як інтерфейс користувача (із застосуванням різних бібліотечних елементів: кнопок, слайдерів, ілюстрацій, графіків, тексту тощо), так і прописати алгоритм поведінки панелі (з допомогою написання коду для різноманітних подій елементів, які є складниками інтерфейсу панелі).

Інтерфейс користувача як реалізацію блока введення / виведення подано на рис. 6. Ця сенсорна панель знаходиться в діалоговому режимі з мікроконтролером *ATMEGA* (рис. 6), який програмує й опитує цю панель.

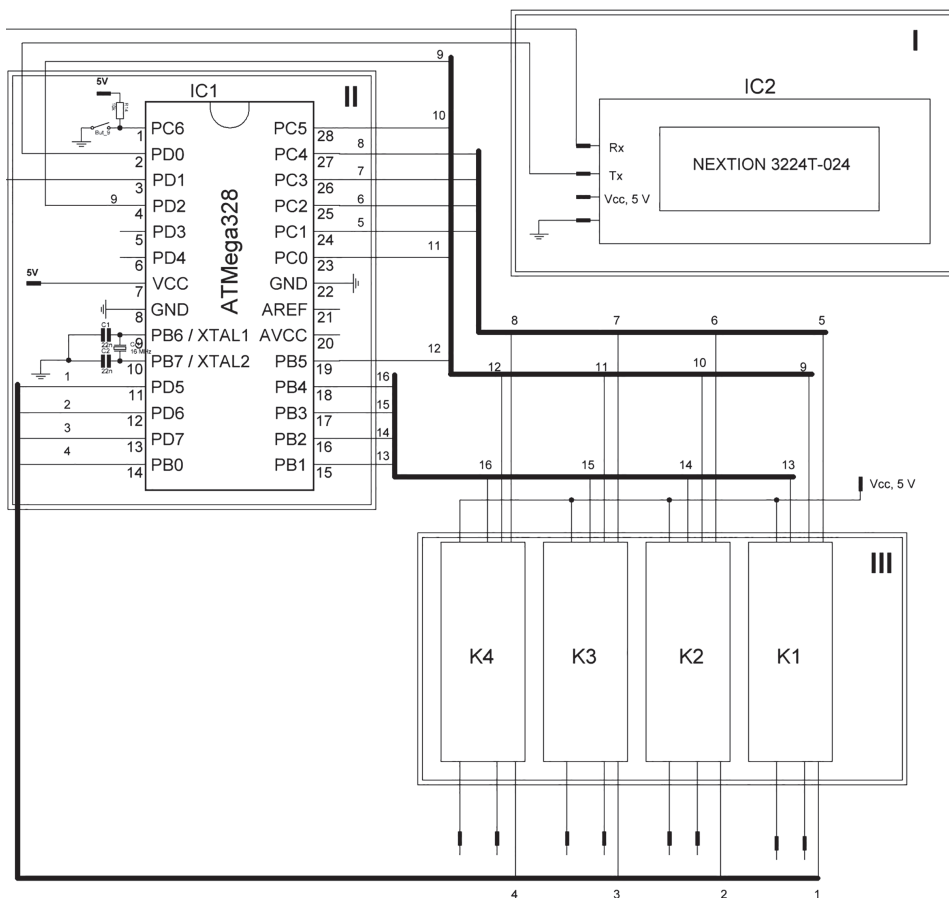


Рис. 5. Схемотехнічна реалізація пристрою «ТренКорСинтез-D»

Лікар з допомогою графічного інтерфейсу вибирає конкретні канали для за діяння електростимуляції, встановлює: тривалість циклу електростимуляції, кількість фаз у кожному каналі та їхнє просторове розташування у каналі в межах циклу стимуляції, здійснює загальне керування апаратом і запуск електростимуляції для вибраних каналів.

З увімкненням пристрою інтерфейс набуває вигляду як на рис. 6, а. З активацією кнопки «Нове тренування» здійснюється ініціалізація та перехід до форми як на рис. 6, б.

На інтерфейсі зображено: сенсорні кнопки каналів X1–X4 з рядом сенсорних кнопок 1–8 для кожного каналу; індикатор «динаміка в часі», а також індикатор «Час циклу», що показує час стимуляції в секундах, виставлений регулятором-повзунком. Також є індикатор частоти в Герцах, що відображається автоматично. Вертикальні індикатори струму показують рівень сили струму стимуляції у відсотках в кожному каналі, що задіяно в стимуляції.

Кнопка «Старт / пауза» відповідає за запуск і паузу електростимуляції, що відбувається у вибраних каналах. Кнопка «Скинути» зу-

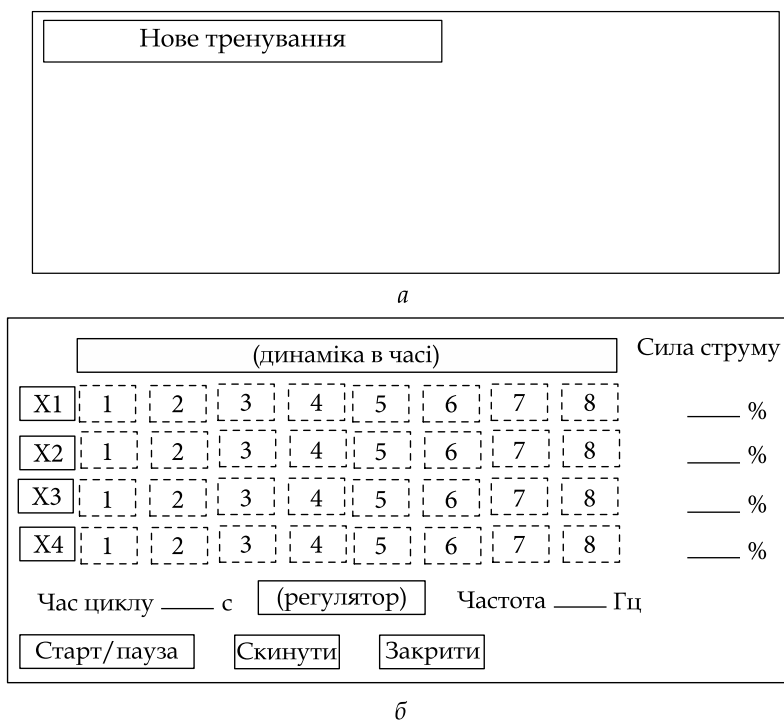


Рис. 6. Графічний інтерфейс пристрою «ТренКорСинтез-D»

піння електростимуляцію і здійснює скидання набраної конфігурації. Кнопка «Закрити» переводить до форми, що на рис. 6, а.

Активація каналів здійснюється через активацію сенсорних кнопок X1–X4.

Коли на інтерфейсі (рис. 6, б) канал активний, то його кнопки 1–8 підсвічуються. Неактивні канали затемнено.

Якщо взяти паузу (кнопка «Старт / пауза»), то продовжити стимуляцію можна з місця зупинки. Якщо зупинити (кнопка «Скинути»), то стимуляцію необхідно буде запускати з нульової відмітки часу.

Під час стимуляції в каналах активні фази змінюють колір.

Блок контролю реалізовано мікроконтролером *ATMega328* (рис. 5).

Однокристальний 8-розрядний мікроконтролер *ATMega328* корпорації “*Microchip*” є електронною мікросхемою з функціоналом, який визначається програмним кодом, завантаженим в постійну пам’ять мікроконтролера. Вся послідовність роботи схеми обумовлена роботою мікроконтролера – відповідно він є ключовим елементом.

Мікроконтролер в цій схемі працює на частоті 16 МГц. Стабільність роботи мікроконтролера забезпечується підключенням відповідного кварцового резонатора (типу *HC-49E*) до виводів 9 і 10 і конденсаторів *C1* і *C2*.

До сенсорної панелі мікроконтролер під’єднано двома виводами: від ніжок *PD0*, *PD1* мікроконтролера до ніжок *Tx*, *Rx* сенсорної панелі відповідно. Обмін даними здійснюється з допомогою інтерфейсу *UART*.

Програмний код мікроконтролера складено так, щоб забезпечувати одержання відповідних кодових посилок від сенсорної панелі та формувати необхідні команди на лініях: від ніжок *PC1*, *PC2*, *PC3*, *PC4* до відповідних каналів електростимуляції *K1*, *K2*, *K3*, *K4* передавання імпульсних сигналів 12 кГц, від ніжок *PB1*, *PB2*, *PB3*, *PB4* передавання імпульсних сигналів стимуляції 5 кГц, які керують електронними ключами у відповідних каналах електростимуляції *K1*, *K2*, *K3*, *K4*, а також передавання фронтів маніпулятивного імпульсу, який «накриває» імпульсні сигнали 5 кГц від ніжок *PD2*, *PC5*, *PC0*, *PB5* до відповідних каналів електростимуляції *K1*, *K2*, *K3*, *K4*.

Особливістю схематехнічного рішення пристрою є наявність сенсора струму на мікросхемі *ACS712*. Він дає можливість вимірювати і контролювати силу струму в діапазоні до 2 А з точністю 2 %. В схемі через сенсор проходить струм, що подається на вихідні пластини (тобто на людину). В програмному коді передбачено постійне (з періодом 10 мс) опитування виходу сенсора – в разі зростання сили струму вище допустимої величини ($I = I_{\text{допустиме}}$) блокуються вихідні каскади зі звуковим і світловим сигналом. Так, створено один із запобіжних бар'єрів для захисту пацієнта.

Сигнал для вимірювання струму надходить від відповідних каналів електростимуляції *K1*, *K2*, *K3*, *K4* до ніжок мікроконтролера *PD5*, *PD6*, *PD7*, *PB0*.

Завантаження програми в мікроконтролер передбачено через інтерфейс *SPI*. Для живлення мікроконтролера застосовується літій-іонний акумулятор типу 18650 з контролером заряду, а також встановлено плату заряду, що забезпечує мобільність і зручність у застосуванні приладу.

Блок електростимуляції складається з чотирьох незалежних каналів електростимуляції. Функційно-принципову схему каналу формування сигналу електростимуляції зображено на рис. 7.

Спочатку у схемі формується змінний сигнал для передавання його у вторинну обмотку трансформатора *T1* (рис. 7). Для цього з мікроконтролера надходять імпульси частотою 12 кГц (5, 6, 7, 8 на рис. 7) протягом часу дії сигналу маніпулювального імпульсу (9, 10, 11, 12 на рис. 7). Тобто старт маніпулювального імпульсу дає старт імпульсам 12 кГц.

Струм стимуляції у відповідному каналі стимуляції регулюється змінним резистором R_x в межах від 0 до 50 мА включно.

На вторинній обмотці трансформатора *T1* з'являється підсилений до +50...+70 В двополярний змінний сигнал, що потім випрямляється через діод *VD1*, характеристиками якого є максимальний струм 2 А і максимальна напруга 150 В. Діод *VD2* має такі ж самі характеристики і слугує для захисту кола. З допомогою ємностей *C1*, *C2*, *C3* сигнал згладжується, і формується вихідна напруга.

Ключами *K1*, *K2*, *K3* керують маніпулювальні сигнали з мікроконтролера (9, 10, 11, 12 на рис. 7). Коли надходить передній фронт

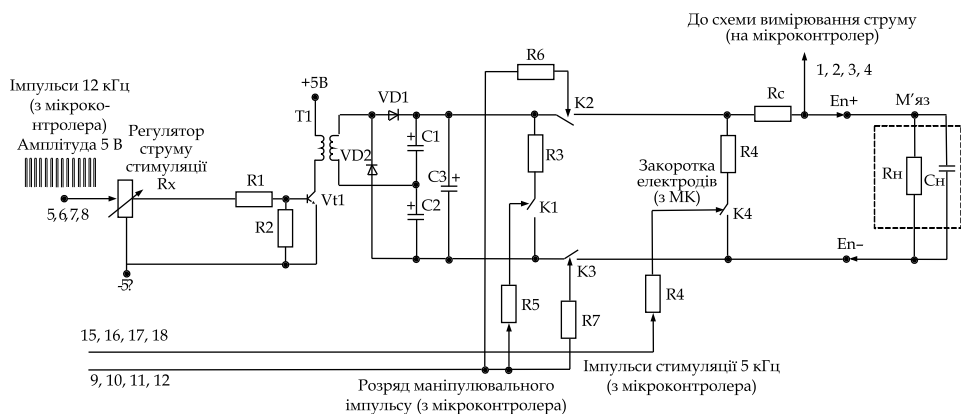


Рис. 7. Функційно-принципова схема каналу формування сигналу стимуляції м'язів

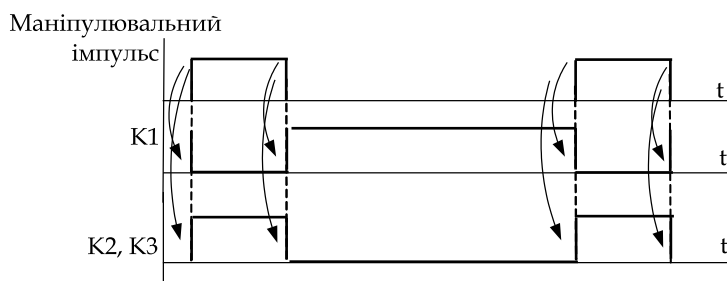


Рис. 8. Часові діаграми регулювання проходження маніпулювального імпульсу

Рис. 9. Часові діаграми проходження маніпулювального імпульсу та імпульсів стимуляції



маніпулювального імпульсу, ключ $K1$ розімкнено (ємність $C3$ заряджається), а ключі $K2, K3$ – замкнено. Коли надходить задній фронт маніпулювального імпульсу, ключ $K1$ замкнено (ємність $C3$ розряджається), а ключі $K2, K3$ – розімкнено (рис. 8). Надалі в тексті: якщо ключ замкнено – на часових діаграмах показано як логічна одиниця, а коли розімкнено – логічний нуль.

В момент старту маніпулювального імпульсу (рис. 9) починають проходити імпульси стимуляції 5 кГц (5, 6, 7, 8 на рис. 7), які керують ключем $K4$. В моменти, коли імпульс стимуляції має рівень логічного нуля, ключ $K4$ замкнено (відбувається закорочення електродів), а коли рівень логічної одиниці, – ключ $K4$ розімкнено (рис. 10). В момент закінчення маніпулювального імпульсу імпульси стимуляції припиняються (рис. 9).

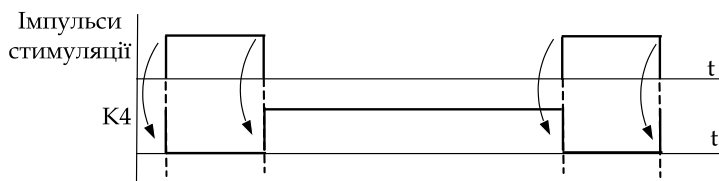


Рис. 10. Часові діаграми регулювання проходження імпульсів стимуляції

Таблиця 1. Логічна карта перемикання ключів у системі каналу формування сигналу електростимуляції

	Старт маніпулювального імпульсу	Старт імпульсу стимуляції	Пауза імпульсу стимуляції	Повторний старт імпульсу стимуляції	Стоп маніпулювального імпульсу
K1	0	0	1	0	1
K2, K3	1	1	0	1	0
K4	0	0	1	0	1

У колах надходження сигналів керування ключами $K1-K4$ знаходяться резистори $R5-R8$, в колі ключа $K1$ – резистор $R3$, а в колі ключа $K4$ – резистор $R4$.

У табл. 1 показано логічну карту перемикання ключів у системі каналу формування сигналу електростимуляції в певні моменти надходження імпульсів з мікроконтролера.

Струм стимуляції заходить в позитивний електрод «Ел+» і скеровується на м'яз. Далі виходить з негативного електрода «Ел-» і циркулює далі в колі, проходячи через ємність $C2$.

Схемний еквівалент м'яза – резистор R_n і ємність C_n . Після стимуляції на м'язі залишається залишкова ємність. З допомогою закорочення електродів ($K4$) м'яз розряджається через себе. На еквіваленті м'яза можна реєструвати значення струму і напруги.

Висновки

Подано теоретичні та практичні засади створення чотириканального цифро-аналогового програмного міоелектростимулятора «Трен-КорСинтез- D », призначеного для реалізації персоналізованих програм відновлення м'язових функцій. Розроблення апаратної частини забезпечує керування параметрами імпульсів стимуляції і надійність роботи пристрою завдяки застосуванню мікроконтролера. Розроблені електричні схеми генерації та розподілу імпульсів в канали дають змогу відтворювати складні патерни рухів, наближені до природної нейром'язової активності.

Схемотехнічні рішення дають змогу забезпечити регулювання сили й тривалості імпульсів, забезпечивши відповідність фізіологічним особливостям рухової активності. Реалізоване у пристрої мікро-

процесорне керування, цифрове налаштування режимів і можливість зворотного зв'язку відкривають можливість інтеграції міостимулятора з програмними системами інформаційної допомоги лікарю у формуванні персоналізованого плану тренування рухів для відновлення рухової активності, створюючи єдиний контур «діагностика – план тренування рухів – міостимуляція – контроль».

На відміну від подібних аналогів у пристрої застосовано гнучку архітектуру, де можна підібрати персоналізовані параметри кожного каналу електростимуляції, зокрема сформувані певну рухову активність із залученням одночасно більше груп м'язів.

Запропоновані рішення є важливими, оскільки їх може бути застосовано у відновленні рухової активності як цивільних, так і військових, чия рухова активність уражена внаслідок воєнного стану, зокрема травм і поранень.

Як допоміжний інструмент для формування висновків застосовано Chat-GPT.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Vovk M.I., Kutsyak A.A., Lauta A.D., Ovcharenko M.A. Information Support of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2017, Vol. 189 (3), 61–78. [In Ukrainian: Вовк М. І., Куцяк О. А., Лаута А. Д., Овчаренко М. А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту] <https://doi.org/10.15407/kvt.189.03.061>
2. Vovk M.I., Halian Ye.B., Kutsiak O.A. Computer Software & Hardware Complex for Personal Oral Speech Restoration after a Stroke. *Science and Innovation*, 2020, Vol. 16 (1), 54–68. <https://doi.org/10.15407/scine16.01.054>
3. Vovk M.I., Kutsyak O.A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2021, Vol. 204 (2), 84–100. <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.084>
4. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2020, Vol. 201 (3), 87–99. <https://doi.org/10.15407/kvt201.03.087>
5. Grytsenko V.I., Kotova A.B., Vovk M.I., Kyforenko S.I., Belov V.M. *Information technologies in biology and medicine. Course of lectures: teaching aids*. Naukova dumka, Kyiv, 2007, 381 p. [In Ukrainian: Гриценко В. І., Котова А. Б., Вовк М. І., Кифоренко С. І., Белов В. М. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій: навч. посіб.]
6. Schick T., Kolm D., Leitner A., Schober S., Steinmetz M., Fheodoroff K. Efficacy of Four-Channel Functional Electrical Stimulation on Moderate Arm Paresis in Subacute Stroke Patients – Results from a Randomized Controlled Trial. *Healthcare*, 2022, Vol 10 (4), Article 704. <https://doi.org/10.3390/healthcare10040704>
7. Thought Technology Ltd. MyoTrac Infiniti. URL: <https://thoughttechnology.com/content/docs/brochure/MAR845-00%20MyoTrac%20Infiniti%20System%202007%20-%20Outline.pdf> [Accessed 01 Aug. 2025]
8. Adams J.L., Lizarraga K.J., Waddell E.M., Myers T.L., Jensen-Roberts S., Modica J.S., Schneider R.B. Digital Technology in Movement Disorders: Updates, Applications, and Challenges. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 2021, Vol. 21., Article 16. <https://doi.org/10.1007/s11910-021-01101-6>
9. Corona F. *Quantitative assessment of upper limb motor impairments in people with neurological diseases*: diss. Doctor of Philosophy, Università degli Studi di Cagliari.

- URL: https://iris.unica.it/bitstream/11584/255954/2/tesi%20di%20dottorato_Federica%20Corona.pdf [Accessed 01 Aug. 2025]
10. Motor function diagnosis apparatus and method, and program: patent JP6433805B2. Tottori University; publ. date 05.12.2018 [Accessed 01 Aug. 2025]
11. Pan B., Huang Z., Jin T., Wu J., Zhang Z., Shen Ya. Motor Function Assessment of Upper Limb in Stroke Patients. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, Vol. 2021, Article 6621950. <https://doi.org/10.1155/2021/6621950>

Received 21.11.2025

O.A. KUTSIK, PhD (Engineering), acting Head of the Department,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-2277-7411>

spirotech85@ukr.net

A.M. MATSAENKO, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine

Senior Lecturer,

Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology

<https://orcid.org/0000-0003-1149-7318>,

matsaenko2007@ukr.net

S.V. BALASHOV, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-1421-7996>

bswbsw2@gmail.com

H.O. PEZENTSALI, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-6319-6993>

annp.irtc@gmail.com

DIGITAL-ANALOGUE FOUR-CHANNEL PROGRAMMABLE MYOELECTRIC STIMULATOR “TRENKORSYNTEZ-D” FOR RECOVER MOTOR ACTIVITY

Introduction. The control of complex movements, the execution of which is ensured by a certain sequence of muscle involvement in the movement, imposes special requirements on the structure of electronic devices intended for their implementation. In this case, the synthesis of multi-channel myoelectric stimulators is appropriate, the central functional unit of which is a module of artificially synthesized stimulation control programs.

The purpose of the paper is to develop a modification of a four-channel digital-analog program myoelectric stimulator for personalized adjustment of individual phases of motor activity, interaction with other phases during the execution of a complex movement to increase the efficiency of motor activity recovering.

Results. A structural and functional model of the digital-analog device “TrenKorSyntez-D” is developed. The interaction of the physician with the device, the device blocks and their interaction are described. The emphasis is on the usage of a sensory panel for input/output of information and display on it of all processes during the myoelectric stimulation. The algorithm of work, UML sequence diagrams modeling the scenarios for device working are developed. The circuit implementation of the device units based on a microcontroller, a functional and principle diagram of the channel for forming a motor stimulation signal, as well as timing diagrams for regulating the passage of manipulation and stimulation pulses are developed.

Conclusions. The theoretical and practical principles for creating a four-channel digital-analog programm myoelectric stimulator «TrenKorSyntez-D» are presented, intended for the implementation of personalized programs to recover motor activity. The development of the hardware part can provide control of the parameters of stimulation pulses and reliability of the device's operation due to the use of a micro-controller. The developed electrical circuits for generating and distributing pulses into channels make it possible to reproduce complex patterns of movements close to natural neuromuscular activity. The proposed solutions are important because they can be applied in the restoration of motor activity of both civilians and military personnel whose motor activity is affected as a result of martial law, in particular injuries and wounds.

Keywords: *motor activity, personalized control, programm motor stimulator, models, algorithms, information technology, digital-analog implementation.*

ALPHABETICAL INDEX OF AUTHORS, 2025

АЛФАВІТНИЙ ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК АВТОРІВ ЗА 2025 рік

Адамчук А.Н.	2	Мороз О.Г.	4
Аль Раві М.	1	Мороховець М.К.	2
Антонюк Я.М.	4	Музичук М.А.	2
Балашов С.В.	6	Павленко Н.С.	5
Баркалов О.О.	1	Палагін О.В.	6
Белов В.М.	5	Пезенцалі Г.О.	6
Бондар О.М.	6	Петренко М.Г.	3
Волков О.Є.	2, 3, 4, 5	Піднебесна Г.А.	5
Волощук Р.В.	4	Попов І.В.	6
Галімова В.М.	4	Рибачок Н.А.	1
Годлевський О.Б.	2	Рицар Б.Є.	2, 3
Гольцев О.Д.	1	Сабурова С.О.	1
Гольцев О.О.	1	Савченко-Синякова Є.А.	5, 6
Головін О.М.	1, 3	Савченко М.Ю.	6
Гонтар Т.М.	5	Сапунова Н.О.	3
Дичка А.І.	2	Сафонов В.І.	4
Заболотна Т.М.	2	Семенов Р.В.	6
Зарицька С.І.	6	Семіхова О.С.	1
Кийко В.М.	5	Симонов Д.І.	6
Кіфоренко С.І.	5	Синиця К.М.	5, 6
Кобзар Т.А.	1	Ситник М.В.	5
Козловська В.О.	5	Сімахін В.М.	6
Колесник Д.І.	6	Суровцев І.В.	1, 4
Коротюк М.І.	1	Сулова Т.Ю.	6
Крячок О.С.	1	Суцук-Слюсаренко В.І.	2
Кудрявцева С.П.	5	Сьоміна Л.П.	4
Куцяк О.А.	6	Тимофієва Н.К.	5
Лавренюк М.В.	5	Тігаренко Л.О.	1
Ляхов В.С.	4	Ткаля В.Г.	2
Малахов К.С.	3	Токова О.В.	6
Манако А.Ф.	1	Урсатьєв О.А.	2, 3, 4
Манако В.В.	1	Ханевич А.К.	4
Манако Д.В.	1	Чалий П.В.	1
Матвієнко О.В.	1	Червинський М.В.	6
Мацаєнко А.М.	6	Щоголева Н.М.	2
Мороз Г.Б.	4		

SYSTEM INDEX OF PAPERS PUBLISHED IN 2025

СИСТЕМНИЙ ПОКАЖЧИК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ У 2025

Theory of Information Technologies and Systems Construction

Теорія побудови інформаційних технологій та систем

- Goltsev O.D., Holtsev O.O., Surovtsev I.V.* Algorithm for Calculating the Similarity between Histograms for Texture Segmentation 1(1)
- Баркалов О.О., Титаренко Л.О., Головін О.М., Матвієнко О.В., Сабурова С.О.* Оптимізація дворівневої схеми Автомата Мілі у базисі FPGA 1(1)
- Урсат'єв О.А., Волков О.Є., Ткаля В.Г.* Автоматизоване машинне навчання. Стан та перспективи розвитку 2(2)
- Rytsar V.Ye.* New Method for Generating Test Codes to Detect Multiple STUCK-AT-FAULTS in Combinational Circuits. Part 1 2(2)
- Годлевський О.Б., Мороховець М.К., Щоголева Н.М.* Аналіз поширених типів мережових атак та чинники, що уможливають їх успішне здійснення . . . 2(2)
- Rytsar V.Ye.* New Method for Generating Test Codes to Detect Multiple STUCK-AT-FAULTS in Combinational Circuits. Part 2 3(3)
- Урсат'єв О.А., Волков О.Є.* Посилене навчання нейромережі в уяві в системах керування безпілотними рухомими об'єктами 4(4)
- Тимофієва Н.Є., Павленко Н.Є.* Деякі підходи до вирішення проблеми невизначеності на цифрових платформах 5(5)
- Palagin O.V., Symonov D.I., Chervynskiy M.V.* Modelling Evolutionary Cybernetics: Ontology, Invariants and Design Principles 6(6)

Intellectual Information Technologies

Інтелектуальні інформаційні технології

- Al -Rawi M.* Using Mobile Phone to Control Remotely Electronic Devices in Smart Home System 1(1)
- Korotiuk M.I., Rybachok N.A.* Automated Sentence Alignment in Ukrainian-German Parallel Texts 1(1)
- Adamchuk A.H., Sushchuk-Slusarenko V.I., Dychka A.I.* Automated Authorship Identification of Program Code Based on a Metric System 2(2)
- Muzychuk M.A., Zabolotnia T.M.* Automatic Classification of Ukrainian Texts by Functional Styles 2(2)
- Урсат'єв О.А., Волков О.Є.* Підходи до створення мультиагентних систем і глибокого посиленого навчання дронів 3(3)
- Sytnyk M.V., Pidnebesna H.A.* Optimization of Multi-Criteria Selection of Computer Components Based on Hierarchy Analysis 5(5)

Digital Technologies in Learning

Цифрові технології в навчанні

- Манак А.Ф., Манак В.В., Манак Д.В. Парадигматична модель розуміння і використання штучного інтелекту в навчанні 1(1)
- Kudriavtseva S.P., Volkov O.Ye., Synytsya K.M., Savchenko-Syniakova Ye.A. Digital Transformation Model for Sustainable Development Education 5(5)
- Синиця К.М., Савченко-Синякова Є.А., Савченко М.Ю., Зарицька С.І., Токова О.В. Підготовка рекомендацій щодо вибору навчальних ресурсів з урахуванням різних стилів навчання 6(6)
- Попов І.В., Колесник Д.І., Сімахін В.М., Семенов Р.В., Сусллова Т.Ю. Аналіз сучасного стану та напрями трансформацій високотехнологічної освіти в наукових установах 6(6)

Digital Medicine

Цифрова медицина

- Kobzar T.A., Kriachok T.V., Semikhova O.S., Chaliy P.V. Algorithm for Determining the Features of a Person's Psycho-Emotional and Functional State under Stressful Conditions 1(1)
- Петренко М.Г., Малахов К.С. Методологія і практика конвергенції міждисциплінарних знань у сфері цифрової охорони здоров'я 3(3)
- Кіфоренко С.І., Белов В.М., Лавренюк М.В., Гонтар Т.М., Козловська В.О. Методологічні аспекти інтероперабельності в прикладних задачах оцінювання та підтримки здоров'я 5(5)
- Куцяк О.А., Мацаєнко А.М., Балашов С.В., Пезенцалі Г.О. Цифро-аналоговий чотириканальний програмний міоелектростимулятор «ТренКорСинтез-D» для відновлення рухової активності 6(6)

Computer Vision and Pattern Recognition

Комп'ютерний зір та розпізнавання образів

- Головін О.М., Сапунова Н.О. Еволюція систем відеоспостереження: від аналогових камер до інтелектуальних систем відеоаналітики на основі граничних обчислень 3(3)
- Кийко В.М. Визначення масштабу та кута повороту для довгострокового відстеження об'єкта у відео 5(5)

Digital Computer Systems

Цифрові комп'ютерні системи

- Суровцев І.В., Галімова В.М., Ляхов В.С., Ханевіч А.К., Антонюк Я.М. Організація роботи з екологічними даними моніторингу водних об'єктів довкілля на основі мережевих та хмарних рішень 4(4)

Quantum Computing and Technologies

Квантові обчислення та технології

- Мороз Г.Б., Мороз О.Г. Успіхи та виклики інженерії квантового програмного забезпечення 4(4)

Digitalisation of Economic Systems

Цифровізація економічних систем

Волощук Р.В., Сьоміна Л.П., Сафонов В.І. Прогнозування показників та інтегрального індексу зовнішньоекономічної сфери економічної безпеки України 2(2)

Information and Communication Technologies

Інформаційно-комунікаційні технології

Bondar O.M. Analysis of Next-Generation Internet Transport Protocols: QUIC, WebTransport, HTTP/3..... 6(6)

AUTHOR GUIDELINES

The journal publishes the results of research in the field of computer science, information technologies and systems and their applications in various fields of activity, system analysis, intelligent control, cyber security, biological and medical cybernetics, digital economy and learning in the digital age, etc.

Target audience – scientists, engineers, graduate students and students of higher educational institutions of the relevant specialty.

Requirements for manuscripts

1. The manuscript is accepted in electronic form, if possible – on paper in one copy (language of the article – English (*in priority*) or Ukrainian, manuscript up to 30 pages). The manuscript should contain:

- information about the Authors in English and Ukrainian: Full name, Academic Degree, Academic Title, Position, Affiliations, Postal address of the organization, Direct links to author's ORCID (if necessary, Researcher ID) and E-mail, Author-correspondent and their telephone number (*for contacting the editor*);

- Short Abstract with keywords in paper language, and Extended Abstract with keywords in either Ukrainian for English-language paper or English for Ukrainian-language paper. The text of the Extended Abstract is not less than 1800 characters with spaces, by headings: *Introduction, The purpose of the paper, Methods, Results, Conclusions, Keywords* (5–8 words);

- *REFERENCES* – a list of sources in English in the order of mention in the text. For Non-English-language sources, citation are translated, the original language is indicated in square brackets, for Ukrainian-language papers information about authors and the title in the original language is given. Examples for design of the References is given below;

- *LITERATURE* – a list of sources in Ukrainian do not use for English-language papers;

- if desired, the authors provide information about the grant or financial support of the research;

- the license agreement is signed automatically when the submission is created in the electronic editorial system.

2. The text of the article should be submitted with the following mandatory headings: *Introduction, Problem Statement / Problem Definition, Objective, Results, and clearly formulated Conclusions*.

Requirements for the text file

File format: *.doc, *.rtf. Applicable styles: Times New Roman font, 12 pt, without a hyphen for a line break, line spacing – 1.5. Paper size: A4, all sides – 2 cm.

Formulas are typed in Formula Editors (preferably Microsoft Equation Editor 3.0. and MathType 6.9b.) Formula Editor options are (10.5; 8.5; 7.5; 14; 10). **The width of formulas is up to 12 cm.**

Figures must be of high quality, they are provided in separate files of appropriate formats (*.png, *.jpg, *.tiff, etc.). **The width of the figures is up to 12 cm.**

Tables are created using a standard text editor built into the Table toolkit. **The width of the table is up to 12 cm.**

КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

В журналі друкуємо результати досліджень у сфері інформатики, інформаційних технологій та систем і їх застосувань у різних сферах діяльності, системного аналізу, інтелектуального керування, кібербезпеки, біологічної та медичної кібернетики, цифрової економіки та навчання в цифрову епоху тощо.

Цільова аудиторія — науковці, інженери, аспіранти та студенти вищих навчальних закладів відповідного фаху.

Вимоги до рукописів статей

1. Рукопис приймаємо в електронному виді, за можливості — на папері в одному примірнику (мова статті — англійська (*в пріоритеті*) або українська, рукопис до 30 стор.). Рукопис має містити:

- відомості про авторів англійською та українською мовами: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посаду, місце роботи, поштову адресу організації, прямі посилання авторських ідентифікаторів ORCID (за потреби *Researcher ID*) та *E-mail*, автор-кореспондент із номером телефону (*для зв'язку з редактором*);

- коротку анотацію з ключовими словами мовою статті та розширену анотацію з ключовими словами українською для англійської статті або ж англійською для українськомовної статті. Текст розширеної анотації не менше 1800 знаків з пробілами, за рубриками: *Introduction / Вступ, The purpose of the paper / Мета роботи, Methods / Методи, Results / Результати, Conclusions / Висновки, Keywords / Ключові слова* (5–8 слів);

- ЛІТЕРАТУРА — перелік джерел для українськомовних статей українською мовою оригіналу в порядку згадування в тексті, для неукраїнськомовних джерел посилання даються англійською, в квадратних дужках вказується мова оригіналу;

- REFERENCES — перелік джерел англійською мовою в порядку згадування в тексті. Для неанглійськомовних джерел в квадратних дужках вказується мова оригіналу, для українськомовних після двокрапки наводиться інформація про авторів та назва джерела мовою оригіналу. Приклади оформлення переліку посилань наведено далі;

- за бажанням автори надають інформацію про грант або фінансову підтримку дослідження;

- ліцензійний договір підписується автоматично при створенні подання в системі електронної редакції.

2. Текст статті подають з обов'язковими рубриками: *Вступ, Постановка завдання/Окреслення проблеми, Мета, Результати, чітко сформульовані Висновки.*

Вимоги до текстового файлу

Формат файлу *.doc, *.rtf. Застосовні стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, без переносів, міжрядковий інтервал — 1,5. Формат паперу А4, всі береги — 2 см.

Формули набирають у редакторах формул (бажано Microsoft Equation Editor 3.0 та MathType 6.9b.) Опції редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10).

Ширина формул — до 12 см.

Рисунки мають бути якісними, їх надають окремими файлами відповідних форматів (*.png, *.jpg, *.tiff тощо). **Ширина рисунків — до 12 см.**

Таблиці виконують стандартним вбудованим у інструментарієм «Таблиця» текстового редактора. **Ширина таблиці — до 12 см.**

Examples for design of the References

REFERENCES

The Books

1. De Vooght E. *Learning to think critically*. Academia Press, Gent , 2025, 168 p. [In Dutch]
2. Ustymenko V.A. *Adaptation of national legislation to EU law: foundations, criteria, sustainability degree*. Akadempriodyka, Kyiv, 2025, 452 p. [In Ukrainian: Устименко В.А. Адаптація національного законодавства до права Європейського Союзу: основи, критерії, виміри стійкості]
3. Divan M. J., Johri P., Guim F., Shchemelinin D., Carranza M. *Advances in Image Processing, Reliability, and Artificial Intelligence*. Elsevier, 2025.
4. *Department of Informatics of NAS of Ukraine. Historical and Biographical Directory*. Akadempriodyka, Kyiv, 2017, 286 p. [In Ukrainian: Відділення інформатики НАН України. Історико-біографічний довідник. Академперіодика]

Papers in Periodicals / Статті в періодичних виданнях

5. Zhuoqun Xia, Longfei Huang, Jingjing Tan, Yongbin Yu, Wei Hao, Kejun Long. A lightweight intrusion detection system for connected autonomous vehicles based on ECANet and image encoding. *Journal of Information Security and Applications*, Elsevier, 2025, Vol. 92 (7), Article 104082.
<https://doi.org/10.1016/j.jisa.2025.104082>
6. ZagorodnyA. G., Khimich O. M., Andon F. I., et al. Implementation of European principles of open science in the National Academy of Sciences of Ukraine. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2025, Vol. 1, 11–33.

Conferences Materials

7. Neumannova A. Organizational Culture and Digital Resilience: Competing Values Perspective. *17th IADIS International Conference Information Systems*, Porto, Portugal, 2024, 158-162. URL: <https://www.iadisportal.org/digital-library/organizational-culture-and-digital-resilience-competing-values-perspective> [Accessed 20 May. 2025]
8. Husna B. A., Munir R. 3D Traffic Scenes Reconstruction for Autonomous Vehicles Using Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM). *11th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA)*, Singapore, Issue 1, 2024, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICAICTA63815.2024.10763077>

Electronic Sources

9. Information for Authors of Springer Computer Science Proceedings: Instructions for proceedings authors (pdf). URL: <https://resource-cms.springernature.com/springer-cms/rest/v1/content/19242230/data/v17> [Accessed Mar. 2025]
10. Cyrillic Gap Analysis. W3C Group Draft Note 02 April 2025. URI: <https://www.w3.org/TR/cyrl-gap/> [Accessed 26 Jun. 2025]

Journal “*Information Technologies and Systems*” that is a merger of two academic journals with a long history – Control Systems and Computers journal ISSN (Print) 2706-8145, ISSN (Online) 2706-8153 (published since 1972) and Cybernetics and Computer Engineering journal ISSN (Print) – 2663-2578, ISSN (Online) – 2663-2586 (published since 1965). The organization responsible for publishing the journal is Institute of Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine.

The journal publishes original scientific and review papers about fundamental and applied research results of informatics and information technologies, intelligent control and systems, methods and means of information technology support of knowledge, application of the mentioned technologies in various fields of life. Number of Issues is 6 per year. Currently, the journal does not charge any fees to the authors from submission to publication. The papers are an Open Access under the CC BY-NC-ND 4.0 license.



Журнал «Інформаційні технології та системи» є результатом об'єднання двох академічних журналів з багаторічною історією – журналу «Системи керування та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) 2706-8145, ISSN (онлайн) 2706-8153 (видається з 1972 року) та журналу «Кібернетика та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) – 2663-2578, ISSN (онлайн) – 2663-2586 (видається з 1965 року). Організацією, відповідальною за видання журналу, є Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України.

Журнал публікує оригінальні наукові та оглядові статті про фундаментальні та прикладні результати досліджень інформатики та інформаційних технологій, інтелектуального керування та систем, методів та засобів інформаційно-технологічної підтримки знань, застосування згаданих технологій у різних сферах життя. Кількість випусків – 6 на рік. Наразі журнал не стягує жодних гонорарів з авторів від моменту подання до публікації. Статті знаходяться у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0.



ISSN 3083-6573 INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS 2025, N°6. 1-88