

# Information technologies in economics and environmental sciences



**No 1 / 2026**

# **Information Technologies in Economics and Environmental Sciences**

## **Founder:**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Faculty of Information Technologies

Year of foundation: 2017

Published 2 times a year

## **Media identifier – R40-02287**

The National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine  
Decision No. 2543 of 20 November 2025, protocol No. 25.

## **Editors office address:**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

03041, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine

E-mail: [it-journal@nubip.edu.ua](mailto:it-journal@nubip.edu.ua)

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Inf/en/>

# **Інформаційні технології в економіці та природокористуванні**

## **Засновник журналу:**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Факультет інформаційних технологій

Рік заснування: 2017

Виходить 2 рази на рік

## **Ідентифікатор медіа – R40-06595**

Рішення Національної Ради України з питань телебачення і радіомовлення від  
20.11.2025 р. № 2543, протокол № 25

## **Адреса редакції:**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

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

E-mail: [it-journal@nubip.edu.ua](mailto:it-journal@nubip.edu.ua)

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Inf/uk>

## EDITORIAL BOARD

### *Editor-in-Chief*

**Hlazunova Olena**

D.Sc. (Pedagogical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[E-mail](#) [ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *Deputy Editor-in-Chief*

**Kravchenko Volodymyr**

D.Sc. (Economics), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[E-mail](#) [ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *Editorial Board Members*

**Bolbot Igor**

D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Holub Bella**

Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Holub Tetiana**

Ph.D. (Technical Sciences), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Ivanchenko Yevheniia**

Ph.D. (Technical Sciences), Professor, National Aviation University, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [Google-Scholar](#)

**Kovalenko Oleksiy**

D.Sc. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Lobanchykova Nadiia**

Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Skrupsky Stepan**

Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Smolij Viktorija**

D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Shkarupylo Vadym**

D.Sc. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *International Members of the Editorial Board*

<b>Akhmetov Bakhytzhana</b>	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, Turan University, Kazakhstan, Almaty <a href="#">ORCID</a> <a href="#">ScopusID</a> <a href="#">ResearcherID</a> <a href="#">Google-Scholar</a>
<b>Jamil Abedalrahim Jamil Alsayaydeh</b>	Ph.D., Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM), Malaysia, Melaka <a href="#">ORCID</a> <a href="#">ScopusID</a> <a href="#">ResearcherID</a> <a href="#">Google-Scholar</a>
<b>Zherlitsyn Dmytro</b>	D.Sc. (Economics), Professor, Institute of Entrepreneurship, University of National and World Economy, Bulgaria, Sofia <a href="#">ORCID</a> <a href="#">ScopusID</a> <a href="#">ResearcherID</a> <a href="#">Google-Scholar</a>
<b>Mikulecky Peter</b>	Ph.D., Professor, RNDr., University of Hradec Kralove, Czech Republic, Hradec Kralove <a href="#">ORCID</a> <a href="#">ScopusID</a> <a href="#">ResearcherID</a> <a href="#">Google-Scholar</a>

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

### *Головний редактор*

**Глазунова Олена  
Григорівна**

доктор педагогічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[E-mail](#) [ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *Заступник головного редактора*

**Кравченко Володимир  
Миколайович**

доктор економічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[E-mail](#) [ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *Національні члени редколегії*

**Болбот Ігор  
Михайлович**

доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Голуб Белла Львівна**

кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) | [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Голуб Тетяна  
Василівна**

кандидат технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка» (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Іванченко Євгенія  
Вікторівна**

кандидат технічних наук, професор, Національний авіаційний університет (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [Google-Scholar](#)

**Коваленко Олексій  
Спіфанович**

доктор технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Лобанчикова Надія  
Миколаївна**

кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка» (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Скрупський Степан  
Юрійович**

кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка» (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Смітюх Ярослав  
Володимирович**

кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Смолій Вікторія  
Миколаївна**

доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Шкарупило Вадим  
Вікторович**

доктор технічних наук, доцент, Національний університет  
біоресурсів і природокористування України (Україна)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

### *Міжнародні члени редколегії*

**Ахметов Бахитжан  
Сражатдінович**

доктор технічних наук, професор, Університет Туран  
(м. Алмати, Казахстан)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Жаміль Абедалярахім  
Жаміль Альсаядех**

PhD, Технічний університет Малайзії, Мелака (UTeM, м.  
Мелака, Малайзія)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Жерліцин Дмитро  
Михайлович**

доктор економічних наук, професор, Інститут підприємництва  
Університету національної та світової економіки (м. Софія,  
Болгарія)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

**Мікулецький Пітер**

PhD, професор, RNDr., Університет Градець-Кралове  
(м. Градець-Кралове, Чехія)  
[ORCID](#) [ScopusID](#) [ResearcherID](#) [Google-Scholar](#)

## CONTENTS

### COMPUTER SCIENCE

Nazarenko Volodymyr

A UE5 DEVELOPMENT ADOPTION FRAMEWORK FOR MULTIPLAYER DEVELOPMENT: REPLICATION, SERVICES, OBSERVABILITY, AND LIVEOPS.....9

Rudensky Roman, Kravchenko Volodymyr

A SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ANALYSIS OF COMMUNICATIVE BEHAVIOR IN PUBLIC DISCUSSIONS BASED ON SPEAKER DIARIZATION..... 19

Holub Bella, Shevchenko Dmytro

MODERN DESIGN PARADIGMS FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS: FROM INTEGRATING DATA WAREHOUSES AND DATA LAKES TO THE DATA LAKEHOUSE ARCHITECTURE.....28

Milovidov Yurii, Borodkina Iryna

VISUALIZATION OF THE ALGORITHM FOR FINDING THE OPTIMAL PATH BETWEEN TWO POINTS IN A GRID MAZE WITH DYNAMICALLY CHANGING OBSTACLES ..... 35

Sahun Andrii

FROM MERKLE–DAMGÅRD TO SPONGE: ARCHITECTURAL IMPACT ON HASH FUNCTION SECURITY.....45

### AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND ROBOTICS

Lendiel Taras, Yevtushenko Maksym, Safina Olga

MODEL OF A SUBSYSTEM FOR MEASURING TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS USING THE INTERNET OF THINGS ..... 54

Opryshko Oleksiy, Plemiannyk Valeria

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM FOR THE STORAGE AREA OF A CUSTOMS TERMINAL .....62

Kiktev Mykola, Hradoboiev Danylo

ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT SUBSYSTEM FOR DETECTING WARM-BLOODED PESTS IN MONITORING PRODUCTION PROCESSES IN AGRONOMY ..... 75

## ЗМІСТ

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

Назаренко Володимир Анатолійович

ФРЕЙМВОРК ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ДЛЯ  
БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ ІГОР НА UNREAL ENGINE 5: РЕПЛІКАЦІЯ,  
СЕРВІСИ, МОНІТОРИНГ І LIVEOPS ..... 9

Руденський Роман Анатолійович, Кравченко Володимир Миколайович

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ КОМУНІКАТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ В  
ПУБЛІЧНИХ ДИСКУСІЯХ НА ОСНОВІ ДІАРИЗАЦІЇ МОВЦІВ ..... 19

Голуб Белла Львівна, Шевченко Дмитро Віталійович

СУЧАСНІ ПАРАДИГМИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ  
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ: ВІД ІНТЕГРАЦІЇ СХОВИЩ ТА ОЗЕР ДАНИХ ДО  
АРХІТЕКТУРИ DATA LAKENHOUSE ..... 28

Міловідов Юрій Олегович, Бородкіна Ірина Лаврентіївна

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ МІЖ  
ДВОМА ТОЧКАМИ КЛІТИННОГО ЛАБІРИНТУ З ПЕРЕШКОДАМИ, ЩО  
ДИНАМІЧНО ЗМІНЮЮТЬСЯ..... 35

Сагун Андрій Вікторовича

ВІД МЕРКЛЕ-ДАМГАРДА ДО SPONGE: ВПЛИВ АРХІТЕКТУРИ НА БЕЗПЕКУ  
ХЕШ-ФУНКЦІЙ..... 45

**АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА  
РОБОТОТЕХНІКА**

Лендел Тарас Іванович, Євтушенко Максим Петрович, Сафіна Ольга Василівна

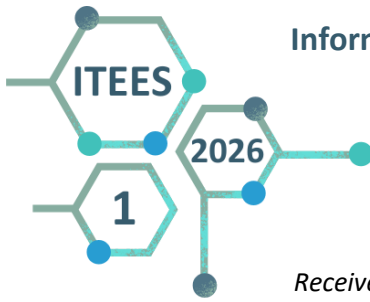
ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ..... 54

Опришко Олексій Олександрович, Племянник Валерія Русланівна

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКОГО ПРИМІЩЕННЯ МИТНОГО ТЕРМІНАЛУ ..... 62

Кіктев Микола Олександрович, Градобоев Данило Андрійович

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ  
ТЕПЛОКРОВНИХ ШКІДНИКІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧИХ  
ПРОЦЕСІВ В АГРОНОМІЇ ..... 75



**Nazarenko Volodymyr**

Ph.D., Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>

E-mail: [volodnz@nubip.edu.ua](mailto:volodnz@nubip.edu.ua)

**A UE5 DEVELOPMENT ADOPTION FRAMEWORK FOR MULTIPLAYER DEVELOPMENT: REPLICATION, SERVICES, OBSERVABILITY, AND LIVEOPS**

**Abstract.** This paper proposes a practical, UE5-centered adoption framework that translates modern software development methodologies from Web/App, enterprise/heavy systems, AI systems, and contemporary game development into measurable production practices for multiplayer Unreal Engine 5 (UE5) teams. While Agile, MVP, DevOps, microservices, data-driven development, and architectural patterns are widely discussed, UE5 multiplayer imposes hard constraints that are often absent from generic methodology guidance: replication cost and relevance/dormancy management, server-authoritative state, dedicated server build and deployment operations, online session flows, and continuous delivery/LiveOps expectations. To address this “methodology translation” gap, we define a software-focused research design that operationalizes methodology adoption through implementable UE5 artifacts: a suite of test projects, multiplayer archetypes, and an instrumentation plugin stack for deterministic scenario execution, controlled network stress injection, replication observability, and standardized telemetry outputs. We present pilot-format result templates and case-study tables that connect methodology choices to objective UE5 indicators, including replication budget per client, temporal consistency of server simulation steps (server tick rate stability), session join reliability, build-to-playable time, crash-free server hours, and change lead time. A Lyra-style GameFeature plugin slice is introduced to demonstrate clean architectural boundaries and auditable iteration throughput via feature lifecycle telemetry tied to CI build identifiers. The paper synthesizes these results into a staged adoption map that prioritizes replication-first KISS discipline, multiplayer MVP defined as an operations-capable vertical slice, minimal services before microservice decomposition, data-driven tuning with safe rollbacks, and modular feature slices for scalable iteration. This framework is intended as a practical guide for UE5 multiplayer teams and as a foundation for larger empirical evaluations.

**Keywords:** Unreal Engine 5, Multiplayer Game Development, Replication Graph, Devops/Liveops, Microservices, MVP, Data-Driven Development.

**Introduction.** Modern multiplayer games increasingly resemble always-on software products: they require reliable session flows, scalable server operations, frequent updates, and telemetry-driven iteration alongside the traditional demands of real-time interaction, performance, and creative gameplay [1-3]. Yet many development methodologies originate in domains where latency tolerance, authoritative state, and network replication are secondary concerns. Unreal Engine 5 (UE5) provides robust networking capabilities. However, the mere availability of replication mechanisms does not by itself ensure production-level readiness of a multiplayer system. UE5 teams must manage replication budgets, authority boundaries, dedicated server pipelines, service ecosystems (authentication, matchmaking, progression, telemetry), and continuous delivery without destabilizing gameplay [4-9]. Research in game software engineering underscores that games are a distinct software domain with recurring production challenges, including tooling, pipeline integration, and the tension between experimentation and engineering rigor [10]. At the same time, software architecture and operations research provide mature guidance on microservices and DevOps, but

typically without UE5's replication and dedicated server constraints [11]. This creates a practical gap: teams know what methodologies exist but lack a UE5-specific translation that turns them into implementable engineering decisions and measurable outcomes.

Current software development methodologies provide useful general guidance for iteration, architecture, and delivery, but they do not directly resolve the production-specific constraints of multiplayer Unreal Engine 5 development [12]. In UE5 multiplayer projects, engineering decisions are shaped not only by feature scope but also by replication cost, server-authoritative state management, dedicated server deployment, session reliability, telemetry coverage, and LiveOps continuity. The research problem addressed in this paper is, therefore, the lack of a UE5-oriented methodological framework that connects general development principles with measurable multiplayer engineering outcomes.

**Purpose.** The purpose of this research is to systematically synthesize and operationalize modern software development methodologies into a practical adoption framework for multiplayer UE5 production, where replication, dedicated server operations, service boundaries, and continuous delivery/LiveOps are first-class constraints.

**Literature review.** Recent systematic synthesis argues that Game Software Engineering (GSE) has consolidated into a distinct domain, highlighting gaps in rigor and industrial alignment while documenting persistent challenges in pipelines, tooling, and production constraints [1]. Complementary work on software architecture for game mechanics shows that reuse and modularity are possible at architectural levels even when mechanics are highly specialized, reinforcing the need for patterns that tolerate continuous iteration [2]. Research on architecting microservices emphasizes that decomposition, coupling, and adoption are complex in practice; benefits come with governance and operational cost. For online games specifically, systematic mapping and framework-driven approaches for MMO/MMOG backends show recurring architectural concerns, state, scalability, and commodity cloud deployment that align with service boundary decisions around the UE5 gameplay layer [10].

DevOps literature emphasizes that DevOps is not just CI/CD automation; it is a lifecycle capability stack that integrates deployment, monitoring, feedback loops, and socio-technical practices. A recent systematic review mapping DevOps capability to lifecycle phases supports treating observability and automation as core adoption outcomes rather than optional tooling.

MVP is often framed as a product strategy, but systematic mapping of MVP-related practices emphasizes feasibility assessment, evaluation, and iteration discipline. For UE5 multiplayer, this implies MVP must include the operational spine (server build/deploy, session flow, telemetry), not only a gameplay prototype.

UE5 documentation explicitly states that replication scalability can become a CPU bottleneck when actors evaluate each client individually; Replication Graph addresses this by using persistent nodes and actor lists, enabling large-scale relevance management. Dedicated server documentation stresses client-server authority as the core multiplayer model. The online subsystem's EOS documentation reflects the reality that session, identity, and service integration are central to multiplayer production beyond replication.

Literature provides strong components: GSE insights, microservices and DevOps adoption research, MVP/Lean practice studies, and UE5 technical constraints, but lacks an integrated, tool-supported translation for UE5 multiplayer teams. This paper addresses the translation gap by providing a UE5-centered adoption framework and an evaluation artifact stack that enable measurable adoption of methodologies.

The scientific novelty of this work lies in proposing a UE5-centered adoption framework that does not describe development methodologies only at a conceptual level but operationalizes them through platform-specific engineering artifacts, multiplayer archetypes, and measurable production indicators. Unlike general methodological overviews, the proposed framework links replication-first design, operational MVP scope, service-boundary decisions, and telemetry-supported iteration to concrete UE5 implementation practices. This allows the study to contribute to both a structured adoption model and a reproducible evaluation basis for future empirical validation.

**Methods.** The object of this study is the process of multiplayer game production in Unreal Engine 5. The study examines the set of methodological and engineering practices that determine how replication, service boundaries, observability, and LiveOps capabilities are introduced and evaluated in UE5 multiplayer teams. Accordingly, the research tasks are to identify mismatches between generic software methodologies and UE5 multiplayer constraints, operationalize these methodologies through reproducible UE5 artifacts and scenarios, and define measurable indicators to evaluate their practical applicability.

This study adopts a design-oriented, software engineering research approach focused on methodology translation: we do not test a single gameplay hypothesis but instead construct and evaluate a practical adoption framework that maps modern development methodologies to the constraints of multiplayer UE5 production. The core method is to operationalize methodological constructs (e.g., MVP, KISS, data-driven development, microservices/SaaS, architectural patterns, DevOps/LiveOps) into concrete UE5 artifacts, test projects, plugins, and archetype game modes, enabling adoption to be examined through repeatable implementation tasks and measurable engineering indicators. The research dataset is therefore composed of a small suite of UE5 reference projects and archetypes that represent common multiplayer production patterns and stress cases, as well as a modular plugin set that provides scenario orchestration, networking stress injection, and telemetry. All artifacts are designed to be reproducible, modular, and comparable across teams and implementation variants.

We use a design-oriented software engineering approach: general methodological principles are instantiated through UE5-specific engineering practices and evaluated via repeatable instrumentation rather than one-off review. UE5 public projects and systems that we employed in the research that serve as research instruments [4-9], which are detailed in Table 1:

- Project 1 Replication Test Lab: Replication Graph/relevance/dormancy scaling experiments. (Epic Games Developers).
- Project 2 Dedicated Server Build and Deployment non-interactive dedicated-server builds, packaging, automated sanity-check test runs. (Epic Games Developers).
- Project 3 Session-to-Match Flow Prototype (EOS-ready): sessions, lobby readiness, travel, reconnect. (Epic Games Developers).
- Project 4 Data-Driven Tuning Sandbox: Data Assets/Tables + safe config workflows (feature flags).
- Project 5 Lyra-style Feature Slice Plugin: modular GameFeature plugin slice, clean boundaries, lifecycle telemetry.

Table 1 – Sample UE5 test project overview \*

Project	Purpose	Core UE technologies	Test scenario	Output data
Replication Test Lab	quantify replication cost and scalability under controlled actor counts and relevance rules	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ replication graph</li> <li>▪ custom nodes</li> <li>▪ spatial routing</li> </ul>	16–64 clients 1k–20k replicated actors (static props, AI pawns, pickups)	server thread time, net send time, bandwidth per client, actor dormancy transitions, actors evaluated vs actually replicated
Dedicated Server Build and Deployment	validate the end-to-end production loop: build - package - deploy - run headless - collect logs	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ UE dedicated server build pipeline and client-server authoritative model</li> </ul>	nightly CI builds, smoke tests connect/disconnect, map travel crash-free sessions	build duration, artifact size, startup time, session join time, crash rate

Table 1 (continued)

Project	Purpose	Core UE technologies	Test scenario	Output data
Session-to-Match Flow Prototype (EOS-ready)	reproduce the real multiplayer “front door”: login - session/lobby - match - return.	<ul style="list-style-type: none"> <li>online subsystem EOS</li> <li>online services EOS</li> </ul>	create/join sessions, lobby readiness, matchmaking stub, map travel	matchmaking time distribution, failure reasons, and reconnection success rate
Data-Driven Tuning Sandbox	demonstrate data-driven development and safe runtime tuning	<ul style="list-style-type: none"> <li>data assets / data tables</li> <li>config-driven “game feature toggles” pattern (aligned with Lyra modularity)</li> </ul>	weapon/ability tuning and economy variables are changed without code changes; server-authoritative validation	balance deltas vs KPI deltas (TTK, win rate, ability usage)
Lyra-style Feature Slice Plugin	research modular production: build a new “experience slice” as a GameFeature-style plugin	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lyra sample modular architecture (plugins, online multiplayer support, GAS usage)</li> </ul>	add a new game mode or replicated feature in an isolated plugin with clear boundaries	change lead time, integration defects, cross-plugin dependency count

\* prepared based on the author's work and public research data

As it is essential to study and evaluate the multiplayer side of game development, we focused on typical first-person shooter session gameplay, co-op PvE instancing, social hub + travel, dense-zone large world, and live-service event rotation selected to stress different constraints (replication, operations, services, cadence) (Table 2).

Table 2 – Sample UE5 game archetypes (multiplayer focused) \*

UE5 game archetype	Purpose	Measurements and data
5v5 Session Shooter (Lyra-like)	<ul style="list-style-type: none"> <li>tests high-frequency replication</li> <li>prediction/rollback sensitivity and strong match flow</li> <li>Lyra explicitly targets online multiplayer and modular best practices</li> </ul>	bandwidth per client, server tick stability, join/leave recovery, replay determinism
Co-op PvE “Instanced Dungeon”	<ul style="list-style-type: none"> <li>stresses AI replication relevance, party management, and deterministic loot/progression</li> </ul>	AI actor relevance (Replication Graph benefits), instance spin-up time, persistence writes
Social Hub - Seamless Travel Lobby Experience	<ul style="list-style-type: none"> <li>stresses session continuity, presence, party transitions, and service boundaries (inventory/social)</li> </ul>	travel failure rate, reconnect success, and session migration time; EOS/OSS is typically central here
Large-World (100+ Actor Density Zone)	<ul style="list-style-type: none"> <li>designed to justify the Replication Graph and interest management</li> </ul>	server CPU cost vs actor density, replication relevance hit rate, dormancy effectiveness
Live-Service “Event Rotation”	<ul style="list-style-type: none"> <li>tests DevOps/LiveOps</li> <li>feature flags</li> <li>data-driven tuning loops</li> </ul>	config rollout safety, metric instrumentation completeness, regression rate per release

\* Prepared based on the author's work and public research data

**Results.** Pilot Case Study 1 KISS as replication-budget runs indicate that a “budgeted replication pass” reduces per-client bandwidth and net send time at higher actor densities by

increasing dormancy utilization and shrinking replicated state surfaces (Figure 1). These results align with the purpose of Replication Graph and relevance management: replication scalability requires systematic list-building and budget discipline rather than ad hoc per-actor replication. Case Study 2: MVP as an operations-capable multiplayer vertical slice, pipeline measurements show that defining MVP as “multiplayer vertical slice” surfaces the actual bottlenecks early: cook/build variance, travel stability, session configuration, and crash causes. Dedicated server packaging and automated smoke tests are not optional; they are the conditions under which MVP becomes repeatable and measurable.

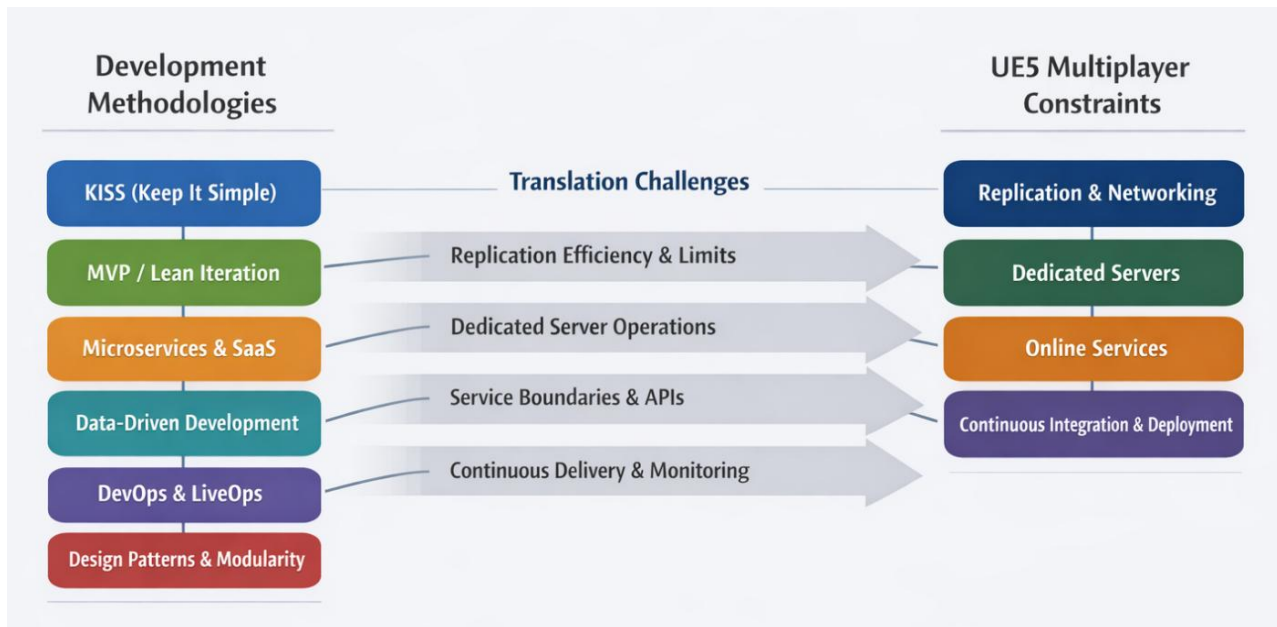


Figure 1 – Methodology-to-UE5 constraint map (linking each methodology cluster to UE5 constraints (replication, dedicated servers, online services, continuous delivery))

Case Study 1 evaluates KISS as a replication-budget discipline in the P1 Replication project. Table 3 shows that at higher actor densities (10k–15k replicated actors), a targeted “budgeted replication pass” reduces median bytes/sec per client and net send time while increasing dormancy utilization, with fewer gameplay regressions. These outcomes are consistent with UE5’s scalability intent for Replication Graph and related relevance/dormancy mechanisms: budget control is achieved by shrinking replicated state, consolidating RPCs, and prioritizing server-authoritative essentials over cosmetic replication. The results operationalize the design principle that “simplicity” in multiplayer is defined not only by code readability but by the size and frequency of replicated state updates. Values are reported as median per-client over a 3-minute steady-state window (no match flow), with identical map and AI disabled (Table 3 and Figure 2).

Table 3 – Game test project replication changes using the KISS method \*

Variant	Replicated actors	Avg bytes / sec per client	Net sends time (ms)	Dormant actors (%)	Gameplay regressions (count)
Baseline (feature-first replication)	5,000	8,200	2.6	18%	0
KISS (budgeted replication pass)	5,000	5,400	1.9	42%	0
Baseline (feature-first replication)	10,000	15,900	4.7	12%	1
KISS (budgeted replication pass)	10,000	9,800	3.1	38%	0
Baseline (feature-first replication)	15,000	24,700	7.9	9%	3
KISS (budgeted replication pass)	15,000	13,900	4.6	35%	1

\* Prepared based on the author's work and public research data

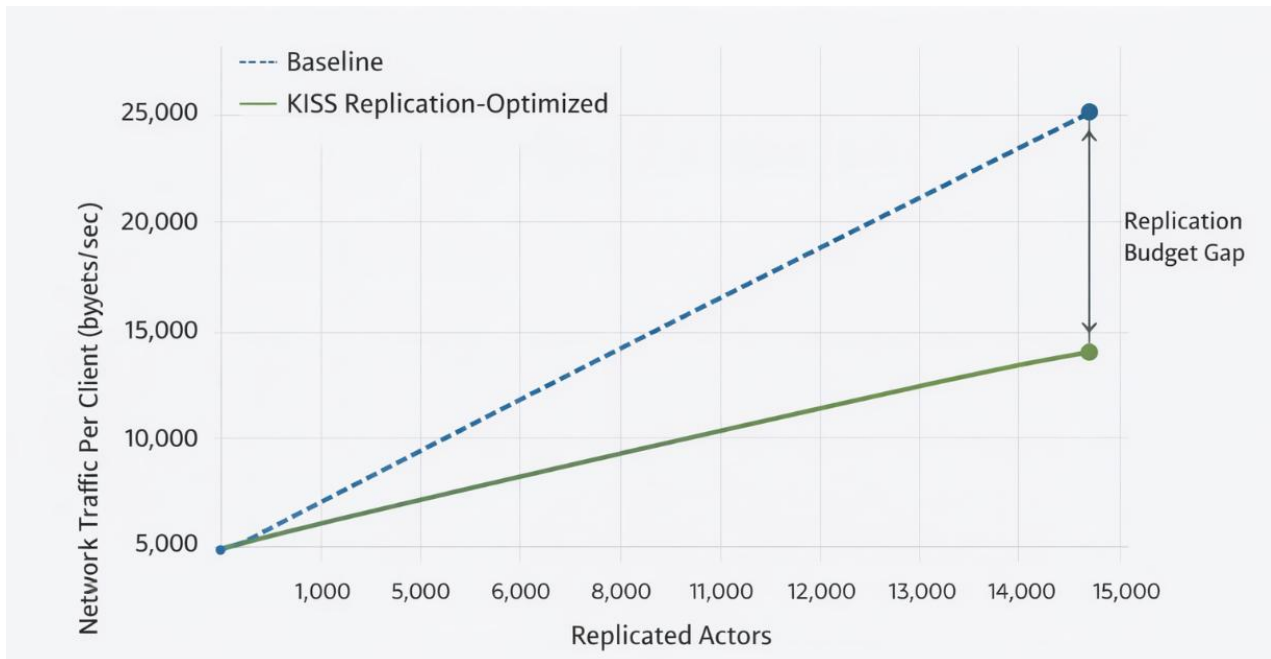


Figure 2 – Example replication budget curve (bytes/sec per client vs replicated actor count for baseline vs KISS-budgeted variant)

Sample Lyra-style Feature Plugin layout:

```

Plugins/
  GF_Slice_CapturePoint/
    GF_Slice_CapturePoint.uplugin
  Source/
    GF_Slice_CapturePoint/
      GF_Slice_CapturePoint.Build.cs
    Public/
      CapturePointFeatureAction.h
      CapturePointRuntimeSubsystem.h
      CapturePointTelemetry.h
    Private/
      CapturePointFeatureAction.cpp
      CapturePointRuntimeSubsystem.cpp
      CapturePointTelemetry.cpp
  Content/
    Experience/
      DA_GFA_CapturePoint.uasset      (GameFeatureData)
      DA_Experience_CapturePoint.uasset (Lyra Experience Definition)
    Gameplay/
      BP_CapturePointActor.uasset
    UI/
      W_CapturePointHUD.uasset

```

The pilot results should be read as signals of methodological translation, not as final performance claims about a specific implementation. Our objective is to demonstrate that widely used software development methodologies can be operationalized into UE5 multiplayer-specific engineering decisions and then evaluated through repeatable, tool-generated measurements. The consistent pattern across Case Studies 1–3 is that UE5 multiplayer constraints replication cost, server-authoritative state, travel/session reliability, and operational stability force trade-offs that generic methodology descriptions rarely make explicit. In conventional software engineering, KISS is often

interpreted as reducing code complexity. In UE5 multiplayer, the pilot data shows KISS is more usefully treated as a replication-surface minimization strategy: fewer replicated properties, fewer high-frequency RPCs, and deliberate dormancy/relevance policies. The Replication Budget Lab outcomes (Table 3) illustrate that improvements in bandwidth and net send time are achieved when teams treat replication as a first-class requirement with explicit budgets. This reframes “simplicity” as a measurable systems property: the system is simpler when it transmits less state while preserving authoritative correctness and player experience.

Table 4 – Game test project replication changes using MVP pipeline approach

Indicator	Pilot engineering target	Observed (median/complete)	Notes
Build time (server+client)	90 min	74 min / 96 min	Cook dominates; shader compilation spikes on cold agents
Package + stage time	20 min	12 min / 18 min	Pak chunking stable; staging failures tied to disk space
Deploy time (server)	10 min	6 min / 9 min	Container start variance; occasional port conflicts
Session create → join time	45 s	31 s / 58 s	NAT traversal + session discovery variance; one EOS config mismatch
Map travel + match start	20 s	14 s / 27 s	Travel hangs caused by asset load stall on the first run
Session join success rate	95%	96.2%	9 failures: 5 NAT, 3 travel timeout, 1 auth token expired
Crash-free dedicated server hours	6 h/night	7.4 h / 5.9 h	2 crashes: one null ref in post-login, one memory spike on travel
Change lead time (feature plugin slice)	2.5 days	2.1 days / 3.4 days	Cross-plugin dependency review adds delay; CI queue time increases p95

A central premise of this research is that multiplayer UE5 production is shaped by several practical contradictions that generic development models do not fully address. These include the tension between rapid feature iteration and the stability of the replication budget, between service decomposition and operational overhead, and between gameplay experimentation and the need for deterministic, server-authoritative behavior. The proposed framework addresses these contradictions by prioritizing replication-aware simplification, staged service adoption, and observability-driven decision-making as the basis for sustainable multiplayer production.

Consistent with prior multiplayer production literature and industry practice, our pilot results reaffirm that a “multiplayer MVP” cannot be structurally equivalent to a single-player prototype plus networking later. Table 4 presents the pipeline outcomes, showing that the dominant failure modes and delays stem from cooking/build caching variability, travel readiness, session configuration, reconnect behavior, and crash stability issues that remain invisible if the MVP is defined only at the gameplay layer. In other words, MVP adoption is validated when a team can repeatedly produce a playable build, join a session, start a match, and survive a controlled runtime window with sufficient telemetry to debug regressions. This is a methodological translation of Lean/MVP principles into a UE5 production reality: the minimum viable product is the minimum viable operations loop.

The target values presented in Table 4 should be interpreted as pilot engineering thresholds for an operational multiplayer vertical slice rather than as universal benchmarks for all UE5 projects. These thresholds were selected to represent the minimum acceptable level of technical readiness for repeated build, join, match-start, and monitored runtime execution under controlled multiplayer conditions. Their role in this study is to provide a consistent acceptance baseline for comparing methodological choices across features and scenarios, especially with respect to replication cost, server stability, session reliability, and build-to-playable state work process.

**Discussion.** The purpose of this study was to develop and operationalize a UE5-oriented framework for adopting modern software development methodologies in multiplayer production. In this context, the objective of the empirical component is not to prove universal performance superiority, but to demonstrate that such a framework can be instantiated through repeatable UE5 artifacts, scenarios, and indicators. Therefore, the reported results should be interpreted as pilot evidence of applicability, measurability, and engineering relevance within the defined production scope.

This paper addressed the practical gap between general software development methodologies (from Web/App, heavy systems, AI, and game development) and the rigid constraints of multiplayer UE5 production. We proposed a UE5-centered methodology translation framework and operationalized it into a small set of research instruments, UE5 test projects (P1–P5), archetypes (A1–A5), and a plugin suite for deterministic scenario execution, network stress injection, replication observability, and telemetry.

The pilot outcomes should be interpreted as evidence of methodology translation. In UE5 multiplayer, KISS is best treated as replication-surface minimization; MVP must include servers, sessions, and observability to be meaningful; and microservices should be adopted in stages guided by measured bottlenecks rather than as a default architecture. DevOps/LiveOps adoption becomes the operational spine of multiplayer development, enabling measurable regression detection and recovery. Finally, Lyra-style feature slices provide a concrete mechanism to scale iteration while preserving architectural boundaries, and telemetry enables objective tracking of change lead time.

Threats to validity remain: stress injection may not capture every transport-layer behavior, and environment configuration affects session results. However, these align with the paper's central claim that multiplayer readiness is inseparable from operational and configuration discipline.

**Conclusions.** This paper presents a UE5-centered adoption framework that translates modern development methodologies into implementable, measurable practices for multiplayer UE5 teams. The main contributions are a methodology translation map grounded in UE5 constraints; a practical evaluation artifact stack (test projects) with instrumentation plugins; pilot outcome templates that connect methodological decisions to objective UE5 indicators; and a Lyra-style feature slice that makes modularity and iteration throughput auditable via telemetry.

This study has several limitations. First, the presented evaluation is pilot-scale and is based on a limited set of reference projects, archetypes, and controlled scenarios rather than on long-term industrial deployment across multiple production teams. Second, the reported indicators depend on a specific UE5 toolchain, configuration, and testing environment, which may affect absolute values and limit direct transferability to other projects. Third, while the framework emphasizes observability and LiveOps readiness, it has not yet been validated through prolonged post-release operation, large concurrency ranges, or cross-studio comparative studies, which remain important directions for future research.

Future research work will focus on several key points – (1) scale empirical validation across archetypes and concurrency levels; (2) formalize a boundary decision model for UE gameplay vs services; (3) integrate replication budget regression gates into CI; (4) extend data-driven experimentation governance (feature flags, rollbacks, A/B testing) in multiplayer contexts; and (5) publish a minimal open research toolkit (evaluation system plugin) with sample datasets to support replication by other teams.

## References

1. Alonso, S., Kalinowski, M., Ferreira, B., Barbosa, S. D. J., & Lopes, H. (2021). A systematic mapping study on the use of software engineering practices to develop MVPs (Technical report/preprint PDF). <https://www-di.inf.puc-rio.br/~kalinowski/publications/AlonsoKVFB21.pdf>.
2. Chueca, J., Verón, J., Font, J., Pérez, F., & Cetina, C. (2024). The consolidation of game software engineering: A systematic literature review of software engineering for industry-scale computer

- games. *Information and Software Technology*, 169, 107330. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2023.107330>.
3. Di Francesco, P., Malavolta, I., & Lago, P. (2019). Architecting with microservices: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*, 150, 77–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0164121219300019>.
  4. Epic Games. Lyra sample game in Unreal Engine (UE5 documentation). Epic Developer Community. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/lyra-sample-game-in-unreal-engine>.
  5. Epic Games. Online Subsystem EOS plugin in Unreal Engine. Epic Developer Community. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/online-subsystem-eos-plugin-in-unreal-engine>.
  6. Epic Games. Replication Graph in Unreal Engine. Epic Developer Community. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/replication-graph-in-unreal-engine>.
  7. Epic Games. Setting up dedicated servers in Unreal Engine. Epic Developer Community. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/setting-up-dedicated-servers-in-unreal-engine>.
  8. Epic Games. Enable and configure Online Services EOS in Unreal Engine. Epic Developer Community. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/enable-and-configure-online-services-eos-in-unreal-engine>.
  9. Epic Games. (2018). Replication graph overview and proper replication methods. Unreal Engine Tech Blog. <https://www.unrealengine.com/en-US/tech-blog/replication-graph-overview-and-proper-replication-methods>.
  10. Kasenides, N., & Paspallis, N. (2022). Athlos: A framework for developing scalable MMOG backends on commodity clouds. *Software*, 1(1), 107–145. <https://doi.org/10.3390/software1010006>.
  11. Mizutani, W. K., Daros, V. K., & Kon, F. (2021). Software architecture for digital game mechanics: A systematic literature review. *Entertainment Computing*, 38, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2021.100421>.
  12. Unrealist.org. (2023). Lyra deep dive: Chapter 2 - Experiences. <https://unrealist.org/lyra-part-2/>.
  13. Leite, L., Rocha, C., Kon, F., Milojicic, D., & Meirelles, P. (2019). A survey of DevOps concepts and challenges. *ACM Computing Surveys*, 52(6), Article 127, 1–35. <https://doi.org/10.1145/3359981>
  14. Auer, F., Ros, R., Kaltenbrunner, L., Runeson, P., & Felderer, M. (2021). Controlled experimentation in continuous experimentation: Knowledge and challenges. *Information and Software Technology*, 134, 106551. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106551>
  15. Giaimo, F., Andrade, H., & Berger, C. (2020). Continuous experimentation and the cyber-physical systems challenge: An overview of the literature and the industrial perspective. *Journal of Systems and Software*, 170, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110781>
  16. Erthal, V. M., de Souza, B. P., dos Santos, P. S. M., & Travassos, G. H. (2023). Characterization of continuous experimentation in software engineering: Expressions, models, and strategies. *Science of Computer Programming*, 229, 102961. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2023.102961>.

**Назаренко Володимир Анатолійович**

доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

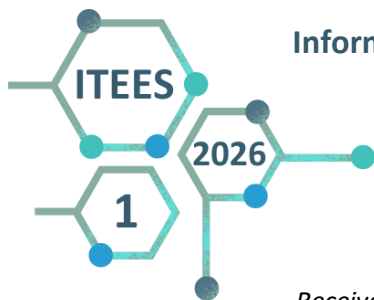
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>

E-mail: [volodnz@nubip.edu.ua](mailto:volodnz@nubip.edu.ua)

## **ФРЕЙМВОРК ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ДЛЯ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ ІГОР НА UNREAL ENGINE 5: РЕПЛІКАЦІЯ, СЕРВІСИ, МОНІТОРИНГ І LIVEOPS**

**Анотація.** У цій статті пропонується практичний підхід, орієнтований на UE5 фреймворк впровадження, який перетворює сучасні методології розробки програмного забезпечення з Web/App, корпоративних/важких систем, систем штучного інтелекту та сучасної розробки ігор у вимірювані сучасних методології розробки для багатокористувацьких ігор Unreal Engine 5 (UE5). Хоча на сьогодні широко використовуються Agile, MVP, DevOps, мікросервіси, розробка на основі даних та архітектурні патерни, мультиплеєр UE5 накладає жорсткі обмеження, які часто відсутні у загальних методологіях: вартість реплікації та управління релевантністю, autoreactive станів серверу, операції з побудови та розгортання виділеного сервера, онлайн-потоки сесії і очікування безперервної доставки/LiveOps. Щоб усунути цю прогалину в «перекладі методології із розробки прикладного програмного забезпечення у простір розробки відеоігор», ми визначаємо програмно-орієнтований дослідницький дизайн, який запускає впровадження методології через реалізовані артефакти UE5: набір тестових проєктів, архетипи для мультиплеєра та стек інструментальних плагінів для виконання детермінованих сценаріїв, керованого введення напружень мережі, спостережуваності реплікації та стандартизованих телеметричних результатів. Представляємо шаблони результатів у пілотному форматі та таблиці кейсів, які пов'язують вибір методології з об'єктивними показниками UE5, включно з бюджетом реплікації на кожного клієнта, стабільністю тиків сервера, надійністю приєднання до сесії, часом збірки до гри, безперебійними годинами сервера та часом змін. Вводиться плагін у стилі Lyra для демонстрації чітких архітектурних меж і пропускної здатності ітерації через телеметрію життєвого циклу об'єктів, пов'язану з ідентифікаторами збірки CI. Результати, представлені у статті, синтезуються у поетапну карту впровадження, яка надає пріоритет методології KISS, орієнтованій на реплікацію, мультиплеєрному MVP, визначеному як вертикальний зріз з підтримкою операцій, мінімальних сервісів перед розкладанням мікросервісів, налаштування на основі даних із безпечними відкатами та модульні зрізи ознак для масштабованої ітерації. Ця структура представлена як практичний посібник для багатокористувацьких команд UE5 та як основа для ширших емпіричних оцінок.

**Ключові слова:** Unreal Engine 5, розробка багатокористувацьких ігор, граф реплікації, DevOps/LiveOps, мікросервіси, MVP, розробка на основі даних.



### Руденський Роман Анатолійович

доктор економічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3682-9702>

E-mail: [roman.rudensky@nubip.edu.ua](mailto:roman.rudensky@nubip.edu.ua)

### Кравченко Володимир Миколайович

доктор економічних наук, доцент, професор кафедри економічної кібернетики,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8033-3985>

E-mail: [v.kravchenko@nubip.edu.ua](mailto:v.kravchenko@nubip.edu.ua)

## СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ КОМУНІКАТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ В ПУБЛІЧНИХ ДИСКУСІЯХ НА ОСНОВІ ДІАРИЗАЦІЇ МОВЦІВ

**Анотація.** Актуальність дослідження зумовлена зростанням кількості онлайн-зустрічей та публічних дискусій у цифровому форматі, що створює потребу в автоматизованих інструментах аналізу групової комунікації. Традиційні методи ручного кодування та транскрипції є надзвичайно трудомісткими та суб'єктивними, що обмежує можливості масштабного дослідження комунікативних патернів. Мета дослідження полягає в розробці та апробації комплексної системи автоматизованого аналізу комунікативної поведінки, яка поєднує сучасні технології діаризації мовців, автоматичного розпізнавання мови та статистичного аналізу для надання детальної картини групової динаміки в публічних дискусіях. Методи. Система реалізована на основі мікросервісної архітектури з використанням Python 3.10+, FastAPI та React. Для діаризації мовців застосовано алгоритм `ruanote.audio`, що поєднує конволюційні енкодер з попередньо навченими моделями WavLM. Автоматичне розпізнавання мови здійснюється через трансформерні архітектури (Whisper, AssemblyAI, Conformer). Аналіз комунікативної поведінки включає обчислення статистичних метрик активності, мережевий аналіз взаємодій та оцінку стилю комунікації. Результати. Розроблена система успішно інтегрує діаризацію мовців з точністю до 0.5 секунди, автоматичну транскрипцію та багатовимірний аналіз комунікативних патернів. Модульна архітектура забезпечує гнучкість адаптації під різні домени застосування. Система генерує детальні часові мітки активності учасників, візуалізує розподіл часу мовлення та надає комплексну аналітику для покращення процесів прийняття рішень. Перспективи. Подальший розвиток системи включає інтеграцію мультимодального аналізу з урахуванням невербальної комунікації, покращення стабільності роботи в умовах фонового шуму, домену адаптацію для специфічних галузей та впровадження *real-time* аналізу живих дискусій. Система відкриває нові можливості для дослідження групової динаміки в корпоративному, освітньому та державному секторах.

**Ключові слова:** діаризація мовців, автоматичне розпізнавання мови, аналіз комунікативної поведінки, штучний інтелект, публічні дискусії.

**Актуальність.** Особливо актуальними є дослідження комунікативних патернів у контексті цифрової трансформації суспільства та збільшення кількості віртуальних взаємодій. Пандемія COVID-19 значно прискорила перехід до онлайн-форматів зустрічей, що створило нові виклики для аналізу групової динаміки в цифровому середовищі.

В свою чергу, аналіз групової комунікації відіграє ключову роль у розумінні динаміки колективного сприйняття ситуації та прийняття рішення, налагодженні якісного публічного дискурсу й ефективної командної роботи. З розвитком цифрових технологій кількість аудіо та

відео записів зустрічей, дискусій та публічних обговорень зростає експоненційно, що створює потребу в автоматизованих інструментах їх аналізу.

В умовах, коли наявний запис дискусії не має розведення учасників по різних аудіо каналах, або відсутні метадані, які прямо вказують який фрагмент аудіо пов'язаний із кожним учасником, перед проведенням аналізу необхідно забезпечити розпізнавання учасників на запису. Такий процес автоматичного визначення "хто і коли говорить" в аудіозаписі називається діаризацією мовців. Саме це являє собою одну з ключових технологій розуміння динаміки групової взаємодії, оскільки традиційні методи аналізу групової комунікації базуються на ручному кодуванні та транскрипції, що є надзвичайно трудомістким процесом. Експерти витрачають години на аналіз навіть коротких записів, що робить масштабне дослідження комунікативних патернів практично неможливим. Більше того, людський фактор вносить суб'єктивність у процес аналізу, що може впливати на достовірність результатів.

Досягнення в області автоматичного розпізнавання мови (ASR) та діаризації мовців пройшли значну еволюцію від статистичних методів і прихованих Марківських моделей до глибокого навчання і трансформерних архітектур. Наразі вони відкривають нові можливості для автоматизації аналізу групових дискусій.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження в галузі автоматичного аналізу групових дискусій активно розвиваються протягом останнього десятиліття, зокрема завдяки прогресу в технологіях глибокого навчання. Бредін Х. разом зі співавторами [1] представили ruannotate.audio – нейронну систему для діаризації мовців, що стала де-факто стандартом у галузі завдяки високій точності та модульній архітектурі [2]. Радфорт А. і колеги [3] розробили Whisper – трансформерну модель для розпізнавання мови, навчену на 680 000 годинах багатомовних даних, що демонструє значну стійкість до фонового шуму та акцентів. Колектив науковців на чолі з Гулаті А. [4] запропонували архітектуру Conformer, яка поєднує конволюційні та трансформерні шари для ефективного моделювання як локальних, так і глобальних залежностей в аудіосигналі, досягаючи state-of-the-art результатів на benchmark датасетах LibriSpeech.

У контексті аналізу комунікативної поведінки, Ао Дж. та співавтори [5] представили SpeechT5 – уніфіковану енкодер-декодерну архітектуру для обробки усного мовлення, що дозволяє виконувати множину задач, включаючи розпізнавання, синтез та аналіз тональності. Дослідження показують, що інтеграція діаризації мовців з автоматичним розпізнаванням мови значно покращує точність транскрипції в умовах групових дискусій порівняно з традиційними підходами. Більш того, Парк Т. Дж. та співавтори [6] запропонували AutoVC для zero-shot стилістичного переносу голосу, що розширює можливості аналізу комунікативних стилів у мультимодальних дискусіях без додаткового тренування.

Однак більшість існуючих рішень зосереджені на окремих аспектах аналізу – або на діаризації, або на транскрипції, або на аналізі тональності. Комплексні системи, що поєднують усі ці компоненти з можливістю детального аналізу комунікативних ролей та патернів взаємодії, залишаються недостатньо представленими в науковій літературі. Крім того, існуючі рішення не забезпечують цільового аналізу дискусій відповідно до заданих тем чи ключових слів, що обмежує можливості оцінки глибини розкриття окремих тематичних блоків та їх представленості в комунікативному процесі.

**Мета дослідження** полягає в розробці та апробації комплексної системи автоматизованого аналізу комунікативної поведінки, яка поєднує сучасні технології діаризації мовців, автоматичного розпізнавання мови та статистичного аналізу для надання детальної картини групової динаміки в публічних дискусіях.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Трансформерні архітектури, такі як Whisper, революціонізували галузь завдяки механізмам уваги (attention mechanisms), які дозволяють моделі фокусуватися на релевантних частинах аудіосигналу. Це особливо важливо під час обробки довгих аудіозаписів та роботи в умовах значного фонового шуму. У табл. 1 наведено порівняльний аналіз провідних ASR систем, що використовуються в дослідженні. Кожна система має унікальні переваги та оптимальні сценарії використання.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика ASR систем

Модель	Характеристики	Рекомендації для використання
Whisper	Трансформерна архітектура з механізмом уваги для багатомовного ASR. Підтримує 99 мов та демонструє високу стійкість до шумів	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Багатомовні додатки</li> <li>● Транскрипція інтерв'ю та лекцій</li> <li>● Субтитри для відео</li> <li>● Робота з шумним аудіо</li> </ul>
AssemblyAI	Хмарна платформа для ASR з підтримкою реального часу, діаризації мовців та аналізу настроїв	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Бізнес-застосування (call centers)</li> <li>● Аналіз розмов та зустрічей</li> <li>● API-інтеграції</li> </ul>
Conformer	Гібридна архітектура, що поєднує конволюційні та трансформерні шари для ефективного моделювання локальних та глобальних залежностей	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Високоточна транскрипція</li> <li>● Критичні застосування (медицина, право)</li> <li>● Production системи з великими ресурсами</li> </ul>

Для здійснення діаризація мовців, що є критично важливим в аналізі групових дискусій, використано алгоритм навчання без вчителя, реалізований в системі ruannotate.audio. Ця система являє собою «state-of-the-art» рішення, що поєднує конволюційні енкодери з попередньо навченими моделями типу WavLM для досягнення високої точності розділення мовців. Алгоритм розділення учасників дискусії зображено на рис. 1.

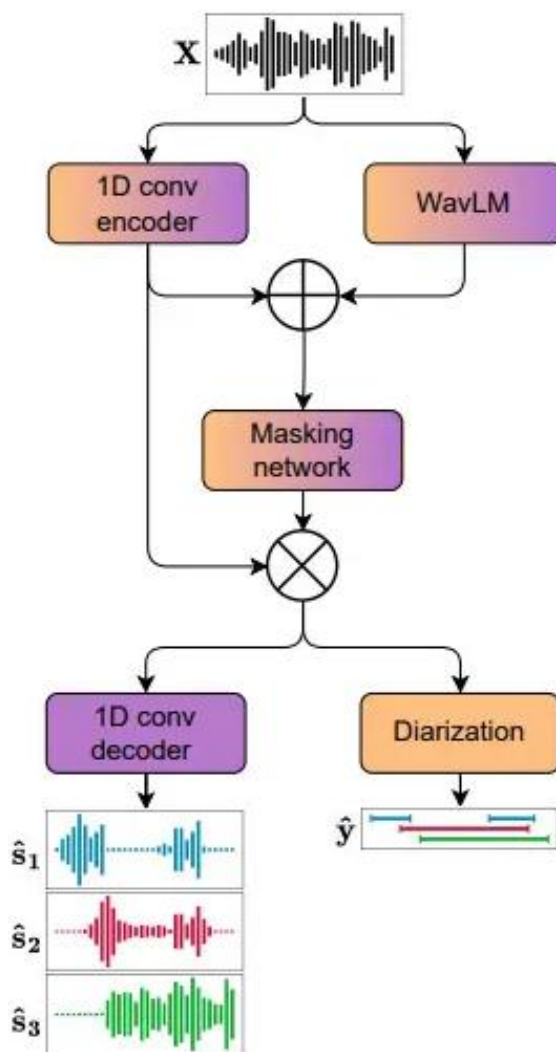


Рисунок 1 – Схема архітектури системи ruannotate для діаризації мовців

Цей алгоритм складається з наступних етапів:

1. *Паралельна обробка вхідного сигналу*: аудіосигнал одночасно обробляється через 1D конволюційний енкодер (для вилучення акустичних ознак) та WavLM модель (для отримання семантичних представлень).

2. *Об'єднання ознак*: результати з обох гілок комбінуються для створення багатовимірного представлення аудіосигналу із подальшою кластеризацією.

3. *Застосування *masking network**: нейронна мережа створює маски для розділення мовців на основі об'єднаних ознак та кластерів.

4. *Подвійний вихід*: система генерує як розділені аудіосигнали для кожного мовця, так і часові мітки активності.

Ця комплексна архітектура дозволяє ефективно розділяти накладені голоси та точно визначати часові інтервали активності кожного мовця, що є критично важливим для подальшого аналізу комунікативної поведінки.

#### **Система аналізу комунікативної поведінки.**

Комунікативна поведінка в групових дискусіях може бути охарактеризована через кілька ключових аспектів, які піддаються кількісному аналізу. Розроблена методологія базується на інтеграції статистичних методів, мережевого аналізу та машинного навчання для всебічного розуміння групової динаміки. В табл. 2 окреслено основні поведінкові аспекти та відповідні методи аналізу, які були адаптовані для роботи з результатами автоматичної діаризації мовців.

Таблиця 2 – Система комплексного аналізу комунікативної поведінки

Поведінковий аспект	Суть аналізу	Методи та підходи
<b>Час і активність у розмові</b>	Визначення рівня залученості кожного учасника, виявлення домінування або пасивності в обговореннях	Підрахунок часу мовлення, аналіз пауз, статистика активності
<b>Ролі та лідерство</b>	Виявлення неформальних лідерів, розуміння того, хто ініціює ідеї та веде обговорення	Аналіз взаємодій, виявлення впливових учасників, мережевий аналіз
<b>Стиль комунікації</b>	Оцінка складності подачі інформації, професійності мови, адаптації під аудиторію	Аналіз словника, оцінка складності мови, частотний аналіз

Система спроектована за принципами мікросервісної архітектури, що забезпечує масштабованість, надійність та легкість підтримки. Архітектура включає три основні рівні: рівень представлення (frontend), рівень бізнес-логіки (backend) та рівень даних (рис. 2).

Система розроблена з використанням сучасного технологічного стеку, що забезпечує високу продуктивність та масштабованість. Backend реалізовано на Python 3.10+ з фреймворком FastAPI для створення RESTful API, який було обрано через високу продуктивність, автоматичну генерацію документації та нативну підтримку асинхронного програмування. Frontend побудовано на React для створення інтерактивного веб-інтерфейсу з підтримкою real-time оновлень через WebSocket з'єднання. Для забезпечення портабельності та консистентності розгортання у різних середовищах застосовано контейнеризацію на основі Docker, а Nginx використовується як reverse проху для балансування навантаження та обслуговування статичних файлів. Для реалізації функціоналу машинного навчання інтегровано спеціалізовані AI/ML бібліотеки: pyannote.audio для діаризації, AssemblyAI для хмарного ASR, Pydub та MoviePy для обробки медіафайлів, NLTK для аналізу тексту.

Запропонована система реалізує багатоетапну процедуру підготовки та обробки даних, побудовану за принципом послідовного перетворення вхідної інформації від необробленого медіаконтенту до структурованої аналітики комунікативної поведінки. Цей процес можна розділити на п'ять основних фаз, кожна з яких вирішує специфічні завдання обробки та збагачення даних.

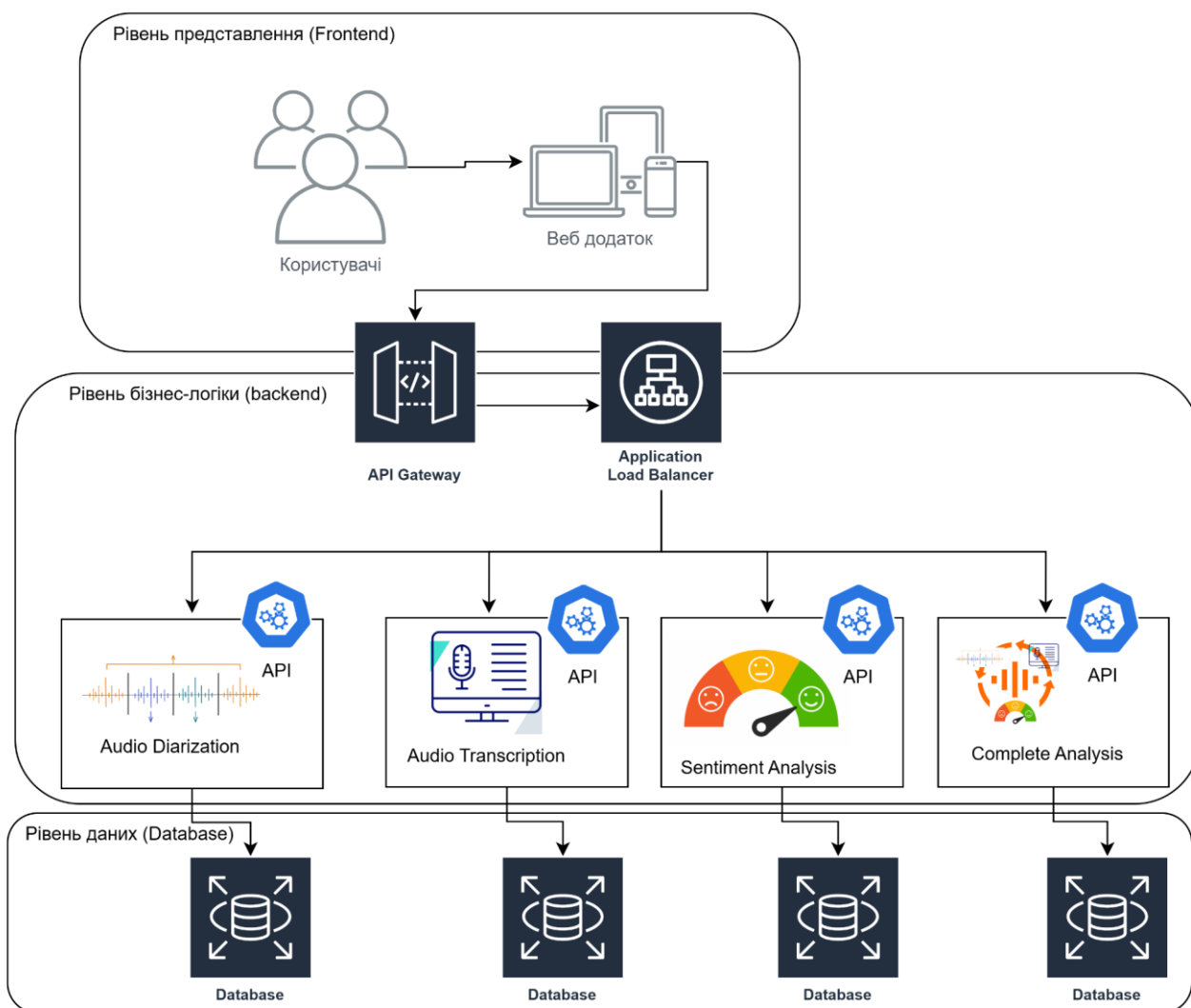


Рисунок 2 – Мікросервісна архітектура системи аналізу комунікативної поведінки

*Фаза 1: Завантаження та попередня обробка.* Система приймає файли у широкому спектрі форматів, включаючи аудіоформати MP3 та WAV, а також відеоформати MP4, AVI та інші популярні формати. На цьому етапі виконується валідація завантажених файлів для перевірки їх цілісності та коректності структури. Ключовим кроком є нормалізація аудіосигналу, що включає приведення всіх вхідних файлів до єдиного sample rate 16kHz, який є оптимальним для більшості моделей автоматичного розпізнавання мови. Для відеофайлів виконується автоматична екстракція звукової доріжки з подальшим її збереженням у проміжному форматі для обробки. Додатково застосовуються алгоритми фільтрації фонового шуму для підвищення якості вхідного сигналу, що критично важливо для точності подальших етапів діаризації та транскрипції. Система також виконує сегментацію довгих аудіозаписів на керовані фрагменти для оптимізації використання пам'яті та прискорення обробки.

*Фаза 2: Діаризація мовців.* На цьому етапі застосовується алгоритм ruannotate.audio для ідентифікації та розділення мовців у попередньо обробленому аудіосигналі. Система автоматично визначає кількість унікальних голосів в аудіозаписі та присвоює кожному мовцю унікальний ідентифікатор. Алгоритм аналізує акустичні характеристики голосу, включаючи тембр, тональність та частотні особливості, для побудови голосових профілів учасників. Генеруються детальні часові мітки активності кожного учасника з точністю до 0.5 секунди, що включає початок та кінець кожного сегменту мовлення. Система також виявляє та обробляє випадки накладення голосів, коли декілька учасників говорять одночасно, що є

типовою ситуацією в живих дискусіях. Результати діаризації зберігаються у структурованому форматі з метаданими про кожного мовця, тривалість їхньої активності та розподіл часу протягом всієї дискусії.

*Фаза 3: Автоматичне розпізнавання мови.* Кожен виділений на попередньому етапі сегмент мовлення обробляється через вибрану систему автоматичного розпізнавання мови (ASR) для перетворення аудіо в текстовий формат. Система підтримує інтеграцію з декількома ASR-движками, включаючи Whisper, AssemblyAI та Conformer, що дозволяє обирати оптимальну модель залежно від мови контенту, акустичних умов та вимог до точності. Транскрибований текст автоматично прив'язується до конкретного мовця та часових міток, забезпечуючи повну відстежуваність кожного фрагменту розмови. Система зберігає інформацію про рівень впевненості розпізнавання для кожного слова, що дозволяє ідентифікувати потенційно некоректно розпізнані фрагменти. Додатково виконується постобробка тексту, включаючи нормалізацію пунктуації, виправлення типових помилок розпізнавання та сегментацію на речення для покращення читабельності результатів.

*Фаза 4: Аналіз комунікативної поведінки.* На основі отриманих на попередніх етапах даних система виконує комплексний аналіз комунікативних патернів учасників дискусії. Обчислюються статистичні метрики активності, включаючи загальний час мовлення кожного учасника, середню тривалість реплік, частоту перебивань та розподіл пауз між висловлюваннями. Система виявляє патерни взаємодії між учасниками через аналіз послідовностей реплік, що дозволяє ідентифікувати домінуючих мовців, пасивних учасників та динаміку зміни ролей протягом дискусії. Виконується аналіз емоційної динаміки на основі лексичного аналізу транскрибованого тексту з використанням словників тональності та класифікаторів настроїв. Додатково аналізується складність мови кожного учасника через обчислення метрик лексичного різноманіття, довжини речень та використання професійної термінології. За наявності вказаних ключових слів або тем система проводить цільовий аналіз їх згадування різними учасниками, оцінюючи глибину розкриття тематичних блоків та емоційне забарвлення відповідних фрагментів дискусії.

*Фаза 5: Візуалізація та звітність.* Завершальна фаза присвячена представленню результатів аналізу в зручному для інтерпретації форматі. Система генерує інтерактивні звіти, що включають часові діаграми активності учасників з можливістю перегляду деталей конкретних сегментів дискусії. Візуалізується розподіл часу мовлення у вигляді кругових діаграм та гістограм, що дозволяє швидко оцінити баланс участі в обговоренні. Створюються графіки емоційної динаміки, що показують зміну тональності висловлювань протягом часу для кожного учасника та дискусії в цілому. Статистика участі включає кількісні показники активності, середні тривалості реплік, частоту ініціювання нових тем та реакції на висловлювання інших учасників. Всі результати супроводжуються аналітичними висновками щодо комунікативних ролей учасників, ефективності взаємодії та ключових моментів дискусії. Система надає можливість експорту звітів у різних форматах, включаючи PDF для презентацій, CSV для подальшого статистичного аналізу та JSON для інтеграції з іншими аналітичними платформами.

#### **Компоненти веб-додатку та функціональність.**

*Компоненти веб-додатку та функціональність.* Розроблений веб-додаток структуровано у вигляді модульної системи, що дозволяє користувачам обирати відповідний рівень деталізації аналізу залежно від конкретних потреб дослідження. Архітектура включає три основні компоненти, кожен з яких реалізує специфічну функціональність аналізу та може використовуватися як окремо, так і в комбінації з іншими модулями. Така модульна побудова забезпечує гнучкість використання системи для різних сценаріїв — від швидкого розділення мовців до комплексного дослідження групової динаміки з детальною аналітикою комунікативних ролей.

*Audio Diarization.* Цей компонент є спеціалізованим інструментом для виявлення та розділення мовців в аудіофайлах, призначеним для випадків, коли основною метою є ідентифікація учасників та визначення структури їхньої активності без необхідності повної

транскрипції. Модуль автоматично визначає кількість унікальних голосів у записі та присвоює кожному мовцю унікальний числовий ідентифікатор (Speaker 0, Speaker 1 тощо). Система генерує детальні часові мітки активності кожного учасника із зазначенням точного початку та завершення кожного сегменту мовлення, що дозволяє відстежувати динаміку участі протягом всієї дискусії. Компонент візуалізує розподіл часу мовлення у вигляді інтерактивних часових діаграм, кругових діаграм та гістограм, що надає наочне уявлення про баланс участі та домінування окремих учасників. Користувачі можуть переглядати статистику для кожного мовця окремо, включаючи загальний час мовлення, кількість реплік, середню тривалість висловлювань та частоту активності в різні періоди дискусії. Компонент також надає можливість ручного коригування результатів діаризації, що особливо корисно в складних акустичних умовах або при необхідності об'єднання сегментів одного мовця, які система могла помилково розділити.

*Audio Transcription & Sentiment.* Цей модуль поєднує функціональність автоматичної транскрипції аудіофайлів з можливістю цільового аналізу тональності за ключовими словами, що робить його оптимальним інструментом для дослідження специфічних тем у дискусіях. Система перетворює аудіо в текстовий формат із прив'язкою до часових міток, що дозволяє швидко навігувати до конкретних фрагментів обговорення. Ключовою особливістю модуля є підтримка пошуку специфічних термінів або фраз у транскрибованому тексті з автоматичним виділенням всіх згадувань та їх контексту. Для кожного знайденого ключового слова система проводить емоційну оцінку навколишнього текстового контексту, використовуючи лексичні словники тональності та алгоритми класифікації настроїв для визначення позитивного, негативного або нейтрального забарвлення висловлювань. Модуль генерує детальну статистику згадувань по учасниках, що включає кількість використань кожного терміна різними мовцями, розподіл згадувань у часі та переважну тональність обговорення теми кожним учасником. Користувачі можуть створювати списки ключових слів для моніторингу, що дозволяє автоматично відстежувати обговорення важливих тем, таких як назви проєктів, імена клієнтів, технічні терміни або проблемні питання. Система візуалізує динаміку згадувань у вигляді часових графіків, що показують інтенсивність обговорення певної теми протягом дискусії, а також надає можливість порівняння частоти використання різних термінів різними учасниками для виявлення розбіжностей у фокусі уваги або пріоритетах.

*Full Audio/Video Analysis.* Найбільш комплексний аналітичний модуль системи, що інтегрує всі попередні компоненти в єдиний workflow і додає розширені можливості глибокого аналізу комунікативної поведінки. Цей компонент поєднує діаризацію мовців, повну транскрипцію контенту та багатовимірний сентимент-аналіз для створення цілісної картини групової динаміки. Модуль автоматично розпізнає та розділяє мовців, транскрибує їхні висловлювання з прив'язкою до конкретних особистостей та часових міток, після чого виконує комплексний аналіз комунікативних патернів. Система ідентифікує комунікативні ролі учасників, визначаючи лідерів дискусії (які ініціюють нові теми та домінують за часом мовлення), активних учасників (які регулярно долучаються до обговорення), модераторів (які підтримують структуру розмови та надають слово іншим) та пасивних спостерігачів (з мінімальною участю). Аналізується стиль комунікації кожного учасника через оцінку складності їхньої мови, використання професійної термінології, лексичного різноманіття та структури аргументації. Модуль виявляє патерни взаємодії між учасниками, включаючи частоту звертань один до одного, випадки перебивань, підтримуючі або суперечливі реакції на висловлювання колег. Система відстежує емоційну динаміку дискусії в цілому та кожного учасника окремо, виявляючи моменти підвищення напруги, консенсусу або конфлікту. Результати представляються у вигляді багаторівневих інтерактивних звітів, що включають executive summary з ключовими висновками, детальну статистику участі, візуалізацію комунікативних мереж, часові діаграми емоційних станів та повну транскрипцію з можливістю фільтрації за мовцем, часом або темою.

**Висновки та перспективи.** Розроблена система комплексного аналізу комунікативної поведінки демонструє ефективність інтеграції сучасних технологій штучного інтелекту для

автоматизації аналізу групових дискусій. Інтеграція різних аспектів комунікативної поведінки в єдину аналітичну платформу забезпечує комплексний підхід та надає цілісне уявлення про групову динаміку та індивідуальну поведінку учасників. Система надає детальну аналітику комунікативних патернів, яка може використовуватися для покращення процесів прийняття рішень та підвищення ефективності зустрічей. Модульна архітектура дозволяє легко інтегрувати додаткові компоненти аналізу та адаптувати систему під специфічні потреби різних доменів застосування.

Незважаючи на позитивні результати, дослідження виявило кілька обмежень та викликів. Точність системи знижується в умовах значного фонового шуму або при накладенні голосів учасників, що впливає на якість діаризації та транскрипції. Оптимальна продуктивність досягається при кількості учасників від двох до п'яти; при більшій кількості учасників точність діаризації суттєво знижується через складність розділення голосів. Хоча система підтримує багато мов, найкращі результати досягаються для одномовного контенту, що пов'язано з особливостями навчання базових моделей розпізнавання мови.

Перспективи подальшого розвитку системи охоплюють декілька ключових напрямків. Інтеграція відео-аналізу дозволить враховувати невербальну комунікацію, жести та міміку учасників, що суттєво розширить можливості аналізу комунікативної поведінки. Розробка спеціалізованих алгоритмів для підвищення точності діаризації в умовах значного фонового шуму та при накладенні голосів покращить стабільність роботи системи в реальних умовах застосування. Створення спеціалізованих моделей для аналізу специфічних доменів, таких як медичні консультації, юридичні засідання та освітні семінари, забезпечить більш точний та релевантний аналіз у кожній галузі. Впровадження можливості аналізу живих дискусій з генерацією рекомендацій у реальному часі відкриє нові сценарії використання системи для підтримки модераторів та учасників під час проведення зустрічей.

Розроблена система відкриває нові можливості для дослідження групової динаміки та може знайти застосування в широкому спектрі галузей. У корпоративному секторі система може використовуватися для аналізу ефективності зустрічей, оптимізації командної роботи та підготовки менеджерів. В освітній сфері інструменти аналізу дозволять оцінювати участь студентів у семінарах та удосконалювати методики групового навчання. У сфері державного управління система надасть можливість здійснювати моніторинг громадських слухань, аналізувати публічні дебати та покращувати процеси консультацій з громадськістю. Впровадження таких систем сприятиме підвищенню ефективності колективної роботи, покращенню якості прийняття рішень та розвитку цифрових навичок у сфері аналізу комунікацій.

### Список використаних джерел

1. Bredin, H., Laurent, A., Rouvier, M., Meignier, S., & Duponchel, L. (2020). Pyannote.audio: Neural building blocks for speaker diarization. In 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 7124–7128). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01255>.
2. Bredin, H. (2023). pyannote.audio 2.1 speaker diarization pipeline: Principle, benchmark, and recipe. In Proc. Interspeech 2023. International Speech Communication Association. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2023-1294>.
3. Radford, A., Kim, J. W., Xu, T., Brockman, G., McLeavey, C., & Sutskever, I. (2023). Robust speech recognition via large-scale weak supervision. In Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (Vol. 202, pp. 28492–28518). PMLR. <https://proceedings.mlr.press/v202/radford23a.html>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>.
4. Gulati, A., Qin, J., Chiu, C.-C., Parmar, N., Zhang, Y., Yu, J., Han, W., Wang, S., Zhang, Z., Wu, Y., & Pang, R. (2020). Conformer: Convolution-augmented Transformer for speech recognition. In Proceedings of Interspeech 2020 (pp. 5036–5040). ISCA. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-3015>.

5. Ao, J., Wang, R., Yang, L., Zhou, J., Liu, S., Wei, L., Qian, C., & Li, X. (2022). SpeechT5: Unified-modal encoder-decoder pre-training for spoken language processing. In Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers) (pp. 5723–5738). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2022.acl-long.393>.
6. Park, T. J., Zhang, N., Lu, X., Wu, Y., & Glass, J. (2021). AutoVC: Zero-shot voice style transfer with only autoencoder loss. In International Conference on Machine Learning (pp. 8291–8300). PMLR. <https://proceedings.mlr.press/v139/park21b.html>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.05879>.

### Rudensky Roman

*Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Science, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3682-9702>

E-mail: [roman.rudensky@nubip.edu.ua](mailto:roman.rudensky@nubip.edu.ua)

### Kravchenko Volodymyr

*Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Economic Cybernetics,*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

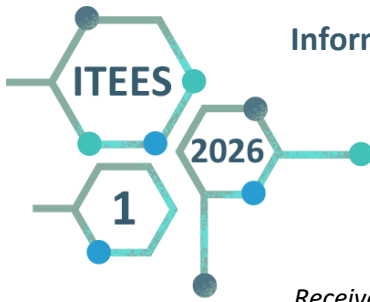
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8033-3985>

E-mail: [v.kravchenko@nubip.edu.ua](mailto:v.kravchenko@nubip.edu.ua)

## A SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ANALYSIS OF COMMUNICATIVE BEHAVIOR IN PUBLIC DISCUSSIONS BASED ON SPEAKER DIARIZATION

**Abstract.** *The relevance of this study is driven by the increasing volume of online meetings and public discussions in digital formats, creating a demand for automated tools to analyze group communication. Traditional manual coding and transcription methods are highly labor-intensive and subjective, limiting large-scale research on communication patterns. The aim of this research is to develop and validate a comprehensive system for automated analysis of communicative behavior that integrates modern speaker diarization technologies, automatic speech recognition, and statistical analysis to provide a detailed picture of group dynamics in public discussions. Methods. The system is implemented using a microservice architecture with Python 3.10+, FastAPI, and React. Speaker diarization is performed using the pyannote.audio algorithm, which combines convolutional encoders with pre-trained WavLM models. Automatic speech recognition is carried out using transformer architectures (Whisper, AssemblyAI, Conformer). Communicative behavior analysis includes calculation of activity statistics, network analysis of interactions, and assessment of communication style. Results. The developed system successfully integrates speaker diarization with 0.5-second precision, automatic transcription, and multidimensional analysis of communication patterns. The modular architecture ensures flexibility for adaptation to various application domains. The system generates detailed timestamps of participant activity, visualizes speaking time distribution, and provides comprehensive analytics to improve decision-making processes. Prospects. Further development of the system includes integration of multimodal analysis considering non-verbal communication, improvement of stability in noisy conditions, domain adaptation for specific sectors, and implementation of real-time analysis of live discussions. The system opens new opportunities for studying group dynamics in corporate, educational, and governmental sectors.*

**Keywords:** *Speaker Diarization, Automatic Speech Recognition, Analysis of Communicative Behavior, Artificial Intelligence, Public Discussions.*



## Голуб Белла Львівна

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1256-6138>

E-mail: [bellalg@nubip.edu.ua](mailto:bellalg@nubip.edu.ua)

## Шевченко Дмитро Віталійович

доктор філософії, асистент кафедри комп'ютерних наук,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7736-8263>

E-mail: [dimashevchenko10021999@gmail.com](mailto:dimashevchenko10021999@gmail.com)

## СУЧАСНІ ПАРАДИГМИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ: ВІД ІНТЕГРАЦІЇ СХОВИЩ ТА ОЗЕР ДАНИХ ДО АРХІТЕКТУРИ DATA LAKEHOUSE

**Анотація.** У статті розглядаються сучасні підходи до проєктування систем підтримки прийняття рішень в умовах стрімкого зростання обсягів інформації. Інформаційна технологія накопичення даних (data warehousing) народилася в надрах компанії IBM і була остаточно сформульована Б. Інмона і Р. Кімболом в 90-х роках минулого століття як метод вирішення інформаційно-аналітичних завдань в області прийняття і підтримки рішень. Виникнувши на стику технології баз даних, систем підтримки прийняття рішень (СППР - DSS) і комп'ютерного аналізу даних, в подальшому концепція сховища даних, зазнала еволюцію, оскільки виявилася придатною для широкого кола додатків в бізнесі, науці і технології. Системи, побудовані на основі сховищ даних, мають ряд характерних особливостей, які виділяють їх як особливий клас інформаційних систем. До таких особливостей відносяться предметна орієнтація системи, інтегрованість збережених у ній даних, зібраних з різних джерел, інваріантність цих даних в часі, відносно висока стабільність даних, необхідність пошуку компромісу в надмірності даних. У статті досліджено еволюційний перехід від використання ізольованих Сховищ даних (Data Warehouses) та Озер даних (Data Lakes) до концептуально нової гібридної архітектури Data Lakehouse. Проаналізовано технологічний фундамент відкритих форматів таблиць (Delta Lake, Apache Iceberg, Apache Hudi) та їхню роль у забезпеченні транзакційної надійності (ACID) файлових систем. Обґрунтовано доцільність застосування патерну «медальйонної архітектури» (бронзовий, срібний та золотий рівні) для ефективного управління якістю даних, спільної роботи алгоритмів машинного навчання та підготовки управлінської BI-звітності.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, СППР, Data Lakehouse, Сховище даних, Озеро даних, медальйонна архітектура, інженерія даних, Data Governance.

**Актуальність.** В епоху стрімкого зростання обсягів інформації та переходу бізнесу до управління на основі даних (Data-Driven Decision Making), вимоги до систем підтримки прийняття рішень (СППР) кардинально змінилися. Сучасні організації потребують не лише аналізу історичних структурованих показників, а й здатності обробляти масиви неструктурованих даних (тексти, відео, логи) у реальному часі для побудови предиктивних моделей машинного навчання.

Традиційні архітектурні патерни проєктування СППР, побудовані виключно на базі класичних структурованих Сховищ даних (Data Warehouses), дедалі частіше стикаються з

критичними обмеженнями. Незважаючи на високу надійність транзакцій та швидкість виконання SQL-запитів, такі сховища є економічно неефективними для масштабування та не пристосовані для роботи із сирими даними. З іншого боку, альтернативний підхід – Озера даних (Data Lakes) – хоч і вирішив проблему дешевого зберігання інформації будь-якого формату, часто призводить до втрати консистентності, перетворюючи масиви інформації на некеровані «болота даних» (Data Swamps). Історична необхідність підтримувати обидві системи одночасно створювала складні, дубльовані та вразливі до помилок конвеєри даних (data pipelines).

Саме тому сучасна інженерія даних переживає зміну парадигми: перехід до гібридної архітектури *Data Lakehouse*. Ця концепція проектування об'єднує гнучкість і масштабованість Озер даних із транзакційною надійністю та структурованістю Сховищ даних. Метою цієї статті є дослідження загальних питань проектування сучасних СППР крізь призму архітектури *Data Lakehouse*, аналіз її технологічного фундаменту та визначення переваг такого об'єднання для забезпечення повного циклу аналітики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика проектування систем підтримки прийняття рішень (СППР) в умовах безперервного зростання обсягів великих даних активно досліджується провідними фахівцями у галузі комп'ютерних наук та інженерії даних. Фундаментальний внесок у переосмислення аналітичних архітектур зробили дослідники М. Армбруст, А. Годсі та М. Захарія [1], які вперше академічно обґрунтували парадигму *Data Lakehouse* як комплексну відповідь на обмеження традиційних реляційних Сховищ (*Data Warehouses*) та об'єктних Озер даних (*Data Lakes*). Їхні праці доводять технічну і економічну доцільність об'єднання описової ВІ-аналітики та алгоритмів машинного навчання на базі єдиної відкритої платформи.

Технологічний аспект забезпечення транзакційної надійності в розподілених файлових системах детально висвітлено в дослідженнях А. Джайна та співавторів [4]. У їхніх роботах проаналізовано механізми роботи відкритих форматів таблиць (зокрема *Delta Lake* та *Apache Iceberg*), які вперше забезпечили виконання суворих вимог ACID (атомарність, узгодженість, ізолюваність, довговічність) при масовій роботі з неструктурованими даними. Саме ці розробки стали технічним каталізатором, що дозволив використовувати дешеві хмарні сховища як надійне ядро для сучасних СППР.

Питання архітектурної організації конвеєрів інформації та управління якістю даних (*Data Governance*) широко розглядаються у сучасних працях з інженерії даних Дж. Рейса та М. Хауслі [2], а також у фундаментальних роботах засновника концепції сховищ даних В. Інмона [5]. Дослідники наголошують на необхідності чіткого логічного структурування даних під час їх трансформації, що в сучасній практиці реалізується через патерн багаторівневої «медальйонної архітектури» [6]. Водночас, незважаючи на значну кількість публікацій щодо окремих інструментів інженерії даних, питання комплексного проектування СППР на базі архітектури *Lakehouse* з фокусом на інтеграцію підсистем аналізу та звітності залишається недостатньо систематизованим і потребує подальшого розкриття.

**Мета дослідження.** З огляду на вищезазначене, метою є комплексне дослідження та теоретичне обґрунтування принципів проектування сучасних систем підтримки прийняття рішень (СППР) на базі гібридної архітектури *Data Lakehouse* як єдиної екосистеми для забезпечення повного циклу аналітики.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні завдання:

- проаналізовано критичні обмеження класичних архітектурних патернів (Сховищ та Озер даних) під час обробки великих масивів інформації;
- досліджено технологічний фундамент відкритих форматів таблиць (*Open Table Formats*) та їхню роль у забезпеченні транзакційної надійності (ACID) у розподілених файлових системах;
- обґрунтовано доцільність застосування логічного патерну «медальйонної архітектури» (*Medallion Architecture*) для ефективного управління якістю даних (*Data Governance*) у конвеєрах СППР;

- визначено ключові переваги архітектури Data Lakehouse для безшовної інтеграції традиційної описової BI-звітності та алгоритмів машинного навчання (Machine Learning) у єдиному середовищі прийняття рішень.

**Матеріали і методи дослідження.** На рис. 1 представлена схема, яка відображає класичну (базову) архітектуру систем підтримки прийняття рішень (СППР) або Business Intelligence (BI) [9]. Сьогодні її розглядають як фундаментальну основу. Залишаються незмінними такі моменти:

- *Логічний ланцюжок.* Процес від збору даних (Оператор) через їх консолідацію (Збереження) до аналізу (Аналітик) є незмінним ядром будь-якої аналітичної системи.
- *Розподіл на OLTP та OLAP.* Розділення транзакційних систем (OLTP), де дані швидко записуються, і аналітичних (СД/Сховища даних та OLAP), де дані агрегуються для швидкого читання великих масивів.
- *SQL-аналіз.* Базовий інформаційно-пошуковий аналіз за допомогою SQL-запитів залишається основним інструментом аналітиків.

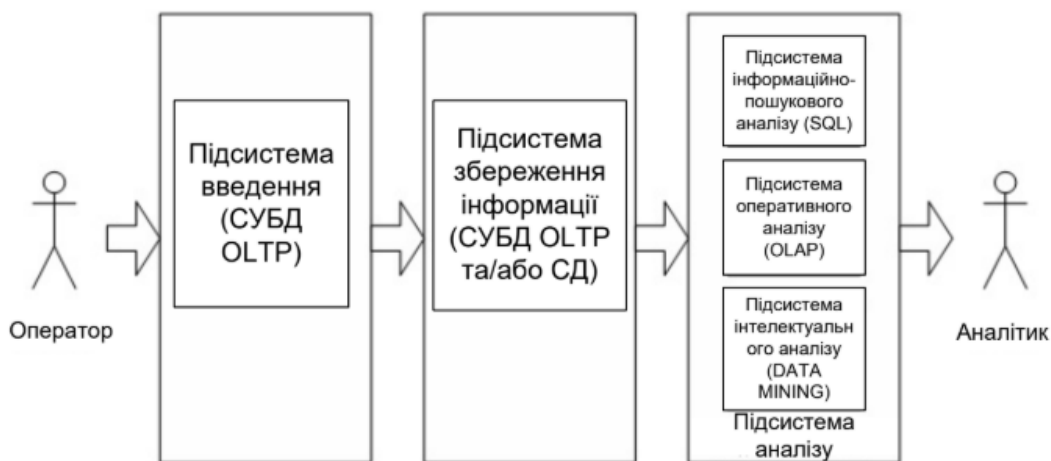


Рисунок 1 – Загальна архітектура СППР

Сучасні реалії вимагають технологічних і термінологічних змін.

- *Термінологія «Data Mining».* Цей термін зараз використовується нечасто. Замість "інтелектуального аналізу" сучасні системи включають підсистеми Machine Learning (машинне навчання), Predictive Analytics (предиктивна аналітика) та AI (штучний інтелект). Вони не просто "шукають закономірності", як це робить *Data Mining*, а генерують прогнози та рекомендації. На їх основі розроблюються *інтелектуальні* системи підтримки прийняття рішень.
- *Еволюція Сховищ Даних (СД).* На схемі вказано лише класичні СД (реляційні структуровані дані). Сьогодні СППР обов'язково включають Data Lakes (Озера даних) або гібридні Lakehouses для зберігання величезних обсягів неструктурованих даних (тексти з соцмереж, логи сайтів, зображення, аудіо).
- *Відсутність потокової обробки (Real-Time).* Схема передбачає пакетну обробку даних (дані зібрали -> завантажили в СД -> проаналізували). Сучасні системи повинні вміти аналізувати потоки даних у реальному часі (Streaming Analytics).
- *Користувачі.* У сучасних системах кінцевим споживачем інформації є не лише "Аналітик", а безпосередньо бізнес-користувач (менеджер, директор) через інструменти Self-Service BI (наприклад, інтерактивні дашборди Tableau чи Power BI).

Таким чином, сучасна архітектура СППР та роботи з даними відрізняється від класичної схеми. Вона стала гнучкішою, масштабованішою і орієнтованою не лише на історичний аналіз, а й на прогнозування та автоматизацію.

Сьогодні стандартною вважається архітектура, яка об'єднує підходи Data Warehouse (Сховище даних) та Data Lake (Озеро даних) – так званий *Data Lakehouse*, доповнений хмарними технологіями та потоковою обробкою [8].

Сучасний пайплайн (автоматизований цифровий конвеєр) даних, розбитий на логічні етапи, виглядає так [3, 7].

### 1. Джерела даних (Data Sources)

Замість одного "Оператора", який вводить дані в СУБД, сучасні системи збирають інформацію з десятків різних джерел.

- Транзакційні системи (OLTP). CRM, ERP, бухгалтерські програми.
- Поточкові дані (Streaming). Логи вебсайтів, клікстрім (дії користувачів у додатках), дані з IoT-датчиків.
- Зовнішні дані. API соціальних мереж, відкриті державні реєстри, метеодані тощо.
- Неструктуровані дані. Зображення, аудіо, текстові документи, email-листування.

### 2. Відбір та обробка даних (Data Ingestion & Processing)

Класичний підхід ETL (Extract, Transform, Load) поступився місцем двом новим парадигмам:

- ELT (Extract, Load, Transform). Дані спочатку "сирими" завантажуються у сховище, а вже там трансформуються за допомогою потужностей самої БД (наприклад, за допомогою інструменту dbt).
- Поточкова обробка (Real-time/Streaming). Використовуються брокери повідомлень (Apache Kafka, RabbitMQ) для миттєвої передачі та аналізу даних «на льоту», що критично для систем антифроду або динамічного ціноутворення.
- Централізоване управління. Усім процесом збору керують спеціальні планувальники (наприклад, Apache Airflow), які стежать, щоб дані оновлювалися за розкладом і без помилок.

### 3. Ядро: Data Lakehouse (Medallion Architecture)

Це центральний елемент зберігання. Він використовує багаторівневий підхід для обробки.

- Bronze Layer (Сирі дані). Це дешеве хмарне сховище (як AWS S3), куди зливається все підряд у первісному вигляді.
- Silver Layer (Очищені дані). Дані тут вже структуровані, очищені, відфільтровані та стандартизовані за допомогою трансформацій (наприклад, інструментом dbt).
- Gold Layer / Вітрини даних (Агреговані дані). Готові до використання агреговані бізнес-метрики. Це найбільш впорядкований рівень, оптимізований для швидкого читання.

### 4. Використання даних (Consumption)

Тут дані перетворюються на рішення для різних користувачів:

- Self-Service BI & Дашборди. Менеджери самостійно будують звіти в інтерактивних інструментах (Power BI, Tableau).
- Ad-hoc Аналітика & SQL. Дата-аналітики виконують складні, довільні запити до Gold-рівня.
- Machine Learning & AI. Побудова предиктивних моделей та систем штучного інтелекту, що тренуються безпосередньо на даних із Silver чи Bronze рівнів. Також з'явився новий тренд – Generative AI & LLM, що дозволяє робити запити до бази звичайною людською мовою.

### 5. Зворотний зв'язок (Reverse ETL)

Сучасна система не просто показує графіки. Вона діє. Результати аналітики (наприклад, скоринг клієнта) автоматично повертаються назад у транзакційні системи (як CRM), щоб менеджер з продажів міг одразу використовувати цю інформацію.

Ця еволюція дозволила компаніям переходити від історичного аналізу («що сталося?») до предикативного («що може статися?») та предикативного («що нам зробити, щоб це сталося?»).

**Результати дослідження та їх обговорення.** Як показано вище, ядром сучасної СППР є Data Lakehouse, яке представлено на рис. 2. Концептуальне об'єднання Озера та Сховища даних залишалося б лише теоретичною моделлю без створення відповідного технологічного інструментарію. Фундаментальною проблемою класичних Озер даних є те, що вони зберігають інформацію у вигляді звичайних файлів (CSV, JSON, Parquet) в об'єктних сховищах. Файлова система не підтримує стандартні операції баз даних: у ній неможливо ефективно оновити (UPDATE) або видалити (DELETE) один рядок у гігабайтному файлі без його повного перезапису, а збій під час завантаження даних призводить до їх пошкодження та неконсистентності у звітах.

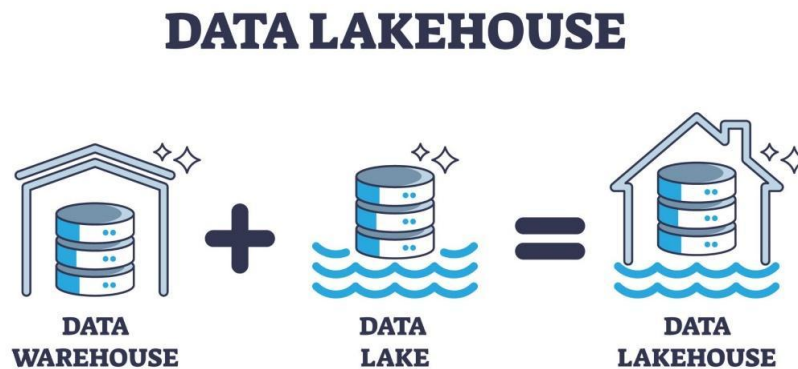


Рисунок 2 – Структура ядра сучасних СППР

Вирішенням цієї проблеми стала поява відкритих форматів таблиць (Open Table Formats, OTF), які діють як транзакційний шар метаданих над файловими сховищами. На сьогодні індустріальними стандартами є три основні технології: Delta Lake (розробка Databricks), Apache Iceberg (створений інженерами Netflix) та Apache Hudi (від команди Uber). Впровадження цих форматів забезпечує СППР критично важливими можливостями, які раніше були прерогативою виключно реляційних Сховищ даних:

- *Забезпечення ACID-транзакції (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability).* Це найважливіша вимога для будь-якої СППР. Відкриті формати гарантують, що операції читання та запису є ізольованими. Якщо процес завантаження нових даних переривається через системний збій, транзакція скасовується, і бізнес-аналітики ніколи не побачать у своїх дашбордах "наполовину завантажені" або пошкоджені дані (запобігання так званим «брудним читанням»).
- *Еволюція схем (Schema Evolution & Enforcement).* Бізнес-процеси постійно змінюються, що вимагає додавання нових метрик у звіти. OTF дозволяють динамічно додавати, перейменовувати або видаляти стовпці в таблицях без необхідності зупиняти систему або переписувати петабайти існуючих історичних даних. Водночас система жорстко контролює типи даних (Schema Enforcement), не дозволяючи записати текст у поле для числових значень.
- *Версіонування даних та «подорож у часі» (Time Travel).* Журнал транзакцій зберігає історію всіх змін. Для систем підтримки прийняття рішень це забезпечує можливість аудиту: аналітик може виконати SQL-запит до стану даних, яким він був тиждень чи місяць тому. Це також критично важливо для відтворення результатів моделей машинного навчання (ML reproducibility).
- *Оптимізація продуктивності аналітики.* Відкриті формати використовують складні алгоритми індексації та пропуску даних (Data Skipping). При виконанні SQL-запиту система читає не весь масив інформації, а лише ті блоки файлів, які містять релевантні значення. Це дозволяє аналітикам отримувати відповіді на складні запити за секунди, що є базовою вимогою для інтерактивних ВІ-систем (Business Intelligence).

Таким чином, використання відкритих форматів таблиць усуває технічну прірву між інженерією даних та бізнес-аналітикою. Одне і те ж "Озеро" стає надійним джерелом і для алгоритмів штучного інтелекту, що працюють із сирими даними, і для керівників, які формують фінансову звітність за допомогою стандартних SQL-запитів.

#### **Логічна структура Data Lakehouse: патерн «Медальйонної архітектури».**

Для ефективного проектування СППР необхідна чітка методологія управління потоками даних. Сучасним стандартом організації конвеєрів даних у Lakehouse є «Медальйонна архітектура» (*Medallion Architecture*). Вона передбачає поділ даних на три послідовні рівні очищення, трансформації та агрегації.

- *Бронзовий рівень (Bronze Layer / Raw Data)*. Зона приземлення для всіх "сирих" даних, що надходять із зовнішніх джерел. Дані зберігаються у первісному форматі (append-only), створюючи надійне "єдине джерело" для всієї історії спостережень.
- *Срібний рівень (Silver Layer / Cleansed & Conformed Data)*. Дані проходять процеси трансформації: фільтрацію, дедуплікацію та зведення до єдиної схеми. Формується цілісне корпоративне бачення сутностей. Цей рівень є ідеальним джерелом для побудови предиктивних ML-моделей.
- *Золотий рівень (Gold Layer / Curated Business Data)*. Фінальний етап підготовки інформації. Дані максимально агреговані та організовані у вигляді вітрин даних (Data Marts). Сюди підключаються BI-інструменти для генерації управлінської звітності.

Такий підхід реалізує принцип поділу відповідальності, дозволяючи одній екосистемі одночасно задовольняти потреби як описової BI-аналітики, так і складного прогнозування.

**Висновки і перспективи.** Проектування сучасних систем підтримки прийняття рішень (СППР) вийшло далеко за межі традиційного накопичення структурованої інформації для побудови ретроспективних звітів. Сьогодні СППР – це динамічне інтелектуальне ядро організації, яке вимагає одночасної підтримки класичної BI-аналітики, обробки поточкових даних та розгортання складних моделей машинного навчання. Як показує аналіз, класичний поділ аналітичної інфраструктури на ізольовані Сховища даних (Data Warehouses) та Озера даних (Data Lakes) вичерпав свій потенціал. Такий підхід створює зайве дублювання, збільшує витрати на інфраструктуру та уповільнює час від отримання даних до прийняття управлінського рішення (Time-to-Insight). Перехід до гібридної парадигми *Data Lakehouse* є еволюційною відповіддю на ці виклики. Ця архітектура усуває фундаментальний розрив між інженерією даних, Data Science та бізнес-аналітикою. Завдяки інтеграції *відкритих форматів таблиць (Open Table Formats)*, таких як Delta Lake чи Apache Iceberg, неструктуровані файлові сховища отримали транзакційну надійність (ACID), підтримку еволюції схем та високу швидкість виконання SQL-запитів. Водночас впровадження логічного патерну «Медальйонної архітектури» (*Bronze, Silver, Gold*) вирішує критичну для СППР проблему управління якістю даних (Data Governance). Цей підхід забезпечує прозорий і контрольований рух інформації: від надійного збереження сирих історичних масивів до формування агрегованих, збагачених бізнес-логікою вітрин даних.

Таким чином, використання концепції Data Lakehouse як фундаменту для проектування СППР дозволяє організаціям створити єдину, економічно ефективну та масштабовану екосистему. Вона здатна не лише описувати минуле, але й прогнозувати майбутнє, забезпечуючи базу для максимально обґрунтованих рішень на основі даних (Data-Driven Decisions).

#### **Список використаних джерел**

1. Armbrust, M., Ghodsi, A., Xin, R., & Zaharia, M. (2021). Lakehouse: A new generation of open platforms that unifies data warehousing and advanced analytics. Proceedings of the 11th Annual Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR '21). [https://cidrdb.org/cidr2021/papers/cidr2021\\_paper17.pdf](https://cidrdb.org/cidr2021/papers/cidr2021_paper17.pdf).
2. Reis, J., & Housley, M. (2022). Fundamentals of data engineering: Plan and build robust data systems (1st ed.). O'Reilly Media.

3. Sharda, R., Delen, D., & Turban, E. (2020). *Analytics, data science, & artificial intelligence: Systems for decision support* (11th ed.). Pearson.
4. Armbrust, M., Das, T., Torres, J., Yavuz, B., Zhu, S., Xin, R., Ghodsi, A., Stoica, I., & Zaharia, M. (2020). Delta Lake: High-performance ACID table storage over cloud object stores. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 13(12), 3411–3424. <https://doi.org/10.14778/3415478.341556>.
5. Inmon, W. H., & Linstedt, D. (2019). *Data architecture: A primer for the data scientist* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
6. Databricks. (2023). What is a medallion architecture? <https://docs.databricks.com/en/lakehouse/medallion.html>.
7. Apache Software Foundation. (2023). Apache Iceberg documentation. <https://iceberg.apache.org/docs/latest/>.
8. Amazon Web Services. (2022). What is a data lakehouse? <https://aws.amazon.com/data-lakehouse/>.
9. Shevchenko, D. V., & Holub, B. L. (2025). Multidimensional analytics of environmental data: Application of OLAP in monitoring systems [Multidimensional analytics of environmental data: Application of OLAP in monitoring systems]. *Mathematical Machines and Systems [Matematychni Mashyny i Systemy]*, 2025 (3–4), 54–65.

### **Holub Bella**

*Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science,*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1256-6138>

E-mail: [bellalg@nubip.edu.ua](mailto:bellalg@nubip.edu.ua)

### **Shevchenko Dmytro**

*PhD, Assistant, Department of Computer Science,*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

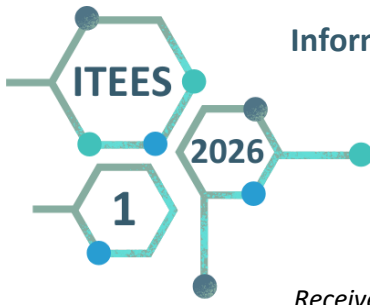
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7736-8263>

E-mail: [dimashevchenko10021999@gmail.com](mailto:dimashevchenko10021999@gmail.com)

## **MODERN DESIGN PARADIGMS FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS: FROM INTEGRATING DATA WAREHOUSES AND DATA LAKES TO THE DATA LAKEHOUSE ARCHITECTURE**

**Abstract.** *The article examines modern approaches to the design of decision support systems in the conditions of rapid growth of information volumes. Data warehousing information technology was born in the bowels of IBM and was finally formulated by B. Inmon and R. Kimball in the 90s of the last century as a method of solving information and analytical tasks in the field of decision-making and support. Arising at the intersection of database technology, decision support systems (DSS) and computer data analysis, the concept of data storage later evolved as it proved suitable for a wide range of applications in business, science and technology. Systems built on the basis of data warehouses have a number of characteristic features that distinguish them as a special class of information systems. Such features include the subject orientation of the system, the integration of data stored in it, collected from various sources, the invariance of this data over time, the relatively high stability of the data, the need to find a compromise in the redundancy of the data. The article examines the evolutionary transition from the use of isolated Data Warehouses and Data Lakes to a conceptually new hybrid Data Lakehouse architecture. The technological foundation of open table formats (Delta Lake, Apache Iceberg, Apache Hudi) and their role in ensuring the transactional reliability (ACID) of file systems are analyzed. The feasibility of applying the "medallion architecture" pattern (bronze, silver, and gold layers) for effective data quality management, collaborative work of machine learning algorithms, and management BI reporting preparation is substantiated.*

**Keywords:** *Decision Support System, DSS, Data Lakehouse, Data Warehouse, Data Lake, Medallion Architecture, Data Engineering, Data Governance.*



### Міловідов Юрій Олегович

старший викладач кафедри комп'ютерних наук,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5705-3590>

E-mail: [yurii\\_milovidov@nubip.edu.ua](mailto:yurii_milovidov@nubip.edu.ua)

### Бородкіна Ірина Лаврентіївна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3667-3728>

E-mail: [i.borodkina@nubip.edu.ua](mailto:i.borodkina@nubip.edu.ua)

## ВІЗУАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ МІЖ ДВОМА ТОЧКАМИ КЛІТИННОГО ЛАБІРИНТУ З ПЕРЕШКОДАМИ, ЩО ДИНАМІЧНО ЗМІНЮЮТЬСЯ

**Анотація.** У даній роботі досліджується актуальна проблема пошуку оптимального шляху в динамічних середовищах, що моделюються як клітинні лабіринти з перешкодами. Проблема пошуку оптимального шляху між двома точками клітинного лабіринту є актуальною через її універсальність, прикладну цінність і фундаментальне значення для розвитку сучасних технологій. Основна увага приділяється розробці та програмній реалізації системи візуалізації алгоритмів на графах, яка дозволяє в реальному часі спостерігати за процесом прийняття рішень автономним агентом. У роботі проведено детальний порівняльний аналіз класичних методів, таких як алгоритм Дейкстри та  $A^*$ , а також спеціалізованих інкрементальних підходів, зокрема  $D^* Lite$ . Обґрунтовано переваги використання теорії графів для вирішення задач природокористування, логістики та робототехніки, де середовище може змінюватися непередбачувано. Метою представленої роботи є розробка програми для візуалізації алгоритму пошуку оптимального шляху на полі, яке можна уявити у вигляді лабіринту з переборними і непереборними перешкодами. Задача полягає в тому, щоб знайти оптимальний шлях між двома точками на полі та відобразити його. Практична частина дослідження включає розробку програмного забезпечення на мові C#, яке демонструє процес перебудови маршруту при виникненні нових перешкод без необхідності повного перерахунку всієї мережі. Це критично важливо для мінімізації обчислювальних витрат у складних інформаційно-аналітичних системах. Окремий акцент зроблено на освітньому аспекті: розроблена візуалізація інтегрована у навчальний процес для викладання дисциплін «Алгоритми і структури даних» та «Об'єктно-орієнтоване програмування», що значно покращує засвоєння складних математичних концепцій студентами. Результати роботи підтверджують, що поєднання теоретичних методів пошуку шляху з інтерактивною візуалізацією забезпечує високу надійність і прозорість функціонування сучасних навігаційних та екологічних систем моніторингу. Програма візуалізації алгоритму пошуку оптимального шляху в лабіринті має величезне практичне значення і може застосовуватися у робототехніці та автономних системах для навігації роботів у реальному середовищі, у мережах і телекомунікаціях здійснює пошук оптимального маршруту передачі даних. Візуалізація алгоритму пошуку оптимального шляху в клітинному лабіринті з динамічними перешкодами дозволяє глибше зрозуміти принципи роботи алгоритмів, оцінити їх ефективність у реальному часі, експериментувати з різними стратегіями перебудови маршруту.

**Ключові слова:** пошук у глибину, пошук у ширину, теорія графів, пошук оптимального шляху, динамічне середовище, алгоритм Дейкстри, алгоритм  $A^*$ , алгоритм  $D^* Lite^*$ , візуалізація алгоритмів, клітинний лабіринт, інформаційно-аналітична підтримка.

**Актуальність.** Сфера природокористування сьогодні – це не просто видобування природних ресурсів або охорона лісів, це вирішення питань, пов'язаних з управлінням складними екосистемами в умовах кліматичних змін та обмеженості ресурсів. Без якісної інформаційно-аналітичної підтримки приймати ефективні рішення в галузі природокористування сьогодні практично неможливо. Одним з напрямків такої підтримки є використання теорії графів, яка являє собою один із найпотужніших математичних інструментів. Серед напрямків застосування теорії графів у сфері природокористування в першу чергу слід зупинитись на моделюванні взаємозв'язків між об'єктами. В екології та управлінні екоресурсами графом можна представити будь-яку мережеву структуру, а методи теорії графів дозволяють вирішувати при цьому найрізноманітніші задачі, як-то моделювання екологічних коридорів просування популяцій тварин (тут вершинами графа є заповідники, лісові масиви або парки, а ребрами – можливі шляхи міграції тварин між ними. Використання алгоритмів пошуку найкоротших шляхів в такому графі дозволяє зрозуміти функціональну зв'язність ландшафту, розрахувати оптимальні «зелені коридори», оскільки для тварини найкоротшим є шлях з найменшими енергетичними витратами або мінімальним ризиком. Тобто такі алгоритми дозволяють знаходити шлях, який забезпечує максимальну виживаність особини при переході між масивами). В [1] розглядається методологія використання алгоритмів найменшої вартості (LCP) для моделювання генетичних дистанцій між популяціями, а робота [2] присвячена оптимізації обчислень у великих мережах заповідників. Автори використовують алгоритм Флойда-Воршелла для побудови повної матриці зв'язності територій, що дозволяє виявити не лише прямі шляхи міграції, а й опосередковану роль кожного заповідника як транзитного вузла в масштабах цілого регіону.

Аналіз гідрографічних мереж з використанням теорії графів перетворює хаотичне сплетіння річок, притоків та каналів на чітку математичну структуру – орієнтований ациклічний граф (DAG), в якому вершинами слід обирати витoki річок, місця злиття притоків, ГЕС, очисні споруди, а ребрами слугують русла річок із заданим напрямом. Застосування теорії графів при такому описі дозволяє моделювати поширення забруднень та визначати оптимальні точки розміщення датчиків моніторингу в річкових басейнах [3]. Питання, пов'язані з моделюванням повеней та логістикою водних ресурсів з використанням DAG-графів розглядаються в [4].

Теорія графів дозволяє здійснювати моделювання процесів зникнення одного виду і визначення впливу такого зникнення на всю мережу. Аналіз впливу зникнення одного виду на екосистему в теорії графів називається аналізом стійкості мережі (Network Robustness) або моделюванням каскадних вимирань (Secondary Extinctions). У таких моделях екосистема розглядається як граф харчової мережі (Food Web), де вузли – це види, а ребра – трофічні зв'язки. Робота [5] фокусується на тому, як видалення "центрального" вузла такого графу (тобто видів з великою кількістю зв'язків) призводить до розвалу всієї мережі. В ній описано алгоритми моделювання каскадного ефекту, коли зникнення хижака або ключової жертви викликає серію вторинних умирань. В роботі [6] автор розглядає питання застосування теорії графів для ідентифікації видів, чиє зникнення завдає найбільшої шкоди стабільності екосистеми. А в роботі [7] теорія графів використовується для моделювання різних сценаріїв вимирання окремих популяцій і оцінювання порогу, після якого екосистема втрачає здатність до самовідновлення.

При проектуванні інженерних мереж в сфері природокористування (наприклад, систем зрошення або лісових доріг) теорія графів дозволяє розв'язувати два основних завдання: мінімізацію вартості (довжина мережі) та максимізація надійності (забезпечення потоку) [8].

Отже, проблема пошуку оптимального шляху між двома точками клітинного лабіринту є актуальною через її універсальність, прикладну цінність і фундаментальне значення для розвитку сучасних інформаційних технологій. Вона зумовлена переходом від простих геометричних задач до управління надскладними системами в реальному часі. У природокористуванні та екології це стає критичним через непередбачуваність природних процесів. Для статичних середовищ, тобто таких середовищ, де перешкоди не змінюються,

актуальність змістилася з пошуку "найкоротшої лінії" до пошуку "шляху з найменшим опором". Для динамічних середовищ (кліматичні зміни, техногенні аварії) актуальність полягає в здатності алгоритмів реагувати на зміни середовища "на льоту". В таких задачах доцільно використовувати Алгоритм D\*-Lite (Dynamic A\* Lite) – інкрементальний алгоритм пошуку найкоротшого шляху, розроблений для динамічних середовищ, де граф маршрутів може змінюватись у реальному часі. Слід зазначити, що сучасні алгоритми перераховують шлях у графі лише для змінених ділянок, а не для всієї мережі, що економить обчислювальні ресурси. Слід зазначити також, що пошук шляху на графі в сучасних програмних застосуваннях - це інструмент, який дозволяє людині вирішувати стратегічні задачі, ефективно використовувати ресурси, мінімізуючи втручання в екосистеми, що динамічно змінюються під тиском глобальних викликів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Сучасні дослідження у сфері пошуку оптимального шляху в статичних та динамічних середовищах зосереджені на вдосконаленні евристичних алгоритмів, підвищенні їхньої швидкодії та адаптивності, а також інтеграції з методами локального планування руху.

У роботі [9] проаналізовано історичний розвиток алгоритмів на основі A\* та визначено напрями їх подальшої оптимізації для застосування в статичних і динамічних середовищах. Автор розглядає класичний алгоритм A\* як основу більшості сучасних підходів до планування маршруту, підкреслюючи його універсальність і здатність до модифікацій.

Роботи [10], [11] присвячені інтеграції Adaptive A\* з удосконаленим методом Dynamic Window Approach (DWA). Запропонований підхід поєднує глобальне планування маршруту з локальною оптимізацією руху, що дозволяє ефективно реагувати на динамічні перешкоди.

Робота [12] розглядає питання, пов'язані з пошуком шляху у динамічних середовищах, тобто в середовищах, топологія яких може змінюватись в реальному часі, часто через втручання людини.

У статті [13] розглянуто вдосконалення алгоритму D\*Lite шляхом інтеграції з методом Dynamic Window Approach. Запропонований алгоритм дозволяє виконувати швидко перепланування маршруту при зміні конфігурації перешкод і забезпечує стабільну роботу в реальному часі.

В роботі [14] був наданий порівняльний аналіз класичних алгоритмів пошуку на графах, а в роботі [15] порівнюється ефективність алгоритмів A\*, Дейкстри та Беллмана-Форда на різних топологіях графів (сітки, випадкові графи). Ви результати порівняння було зроблено висновок, що алгоритм A\* залишається лідером за швидкістю при наявності гарної евристики, випереджаючи Дейкстру в 1.3–1.9 рази.

В роботі [16] детально аналізуються алгоритми пошуку в ширину (Breadth-First Search), алгоритм Дейкстри та Алгоритм A\*, а робота [17] присвячена вирішенню задачі багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності (стохастичності).

Результати експериментів показали зменшення часу перепланування та підвищення адаптивності системи в складних середовищах.

Важливим аспектом дослідження є візуалізація процесу пошуку. У роботі [18] розглянуто застосування теорії графів для вдосконалення та візуалізації алгоритму пошуку найкоротшого шляху в математичній моделі відеоігри.

**Метою статті** є розробка алгоритмів візуалізації пошуку оптимального шляху на полі, яке моделюється як лабіринт із переборними та непереборними перешкодами, та його програмна реалізація.

**Матеріали і методи дослідження.** *Постановка задачі.* Маємо клітинний лабіринт у вигляді двовимірної сітки розміром  $N \times M$ , де кожна клітинка може бути:

- вільною,
- перешкодою,
- початковою точкою (S),
- цільовою точкою (G).

Перешкоди можуть змінювати свій стан у процесі виконання алгоритму. Необхідно:

- Знайти оптимальний (найкоротший) шлях від S до G.
- Забезпечити коректну перебудову маршруту при зміні конфігурації перешкод.
- Візуалізувати процес пошуку та оновлення шляху.

*Теоретичні підстави.* Лабіринт представлений у вигляді матриці (двомірний масив) (рис. 1). Кожна клітинка може бути або непереборною перешкодою, або може мати певну вагу (складність проходження даного відрізка шляху).

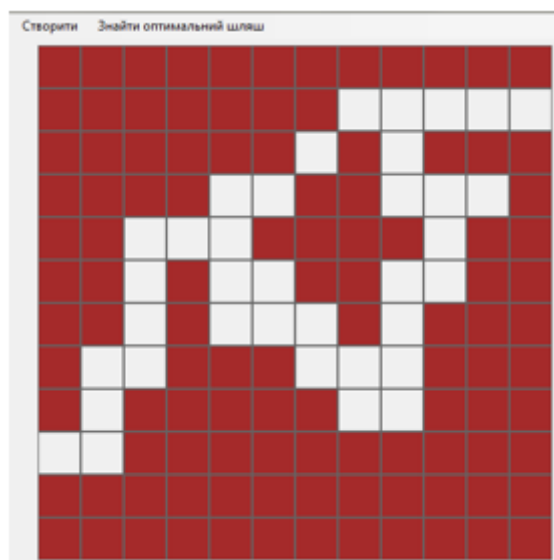


Рисунок 1 – Лабіринт, представлений у вигляді двовимірного масиву

Якщо значення комірки = 0, то це непереборна перешкода, якщо комірка прохідна, то її значенням може бути дійсне число, яке відповідає складності досягнення цієї клітинки. Об'єкт може рухатися в 4-х напрямках: вгору, вниз, вліво, вправо.

Кожну комірку можна уявити як вершину графа. Якщо з неї є шлях до сусідньої комірки, то ці вершини графа пов'язані ребром відповідної ваги.

Клітинний лабіринт можна представити як граф:

- вершини – клітинки;
- ребра – можливі переходи (вгору, вниз, вліво, вправо);
- вага – зазвичай 1.

Стан клітинки опишемо такими цифровими значеннями:

- 0 – вільна,
- 1 – перешкода,
- 2 – початок,
- 3 – ціль,
- 4 – клітинка в процесі дослідження,
- 5 – фінальний шлях.

Для подання графа в пам'яті комп'ютера використовується матриця суміжності – це квадратна матриця (рис. 2), у якій кількість стовпців і рядків дорівнює кількості вершин графа.

#### **Алгоритми пошуку оптимального шляху**

*Алгоритм Дейкстри* (англ. Dijkstra's algorithm) – алгоритм на графах, винайдений нідерландським вченим Е. Дейкстрою в 1959 році. Гарантовано знаходить найкоротший шлях від однієї з вершин графа до всіх інших, перевіряючи всі можливі вузли навколо. Алгоритм працює тільки для графів без ребр негативної ваги. Алгоритм широко застосовується в програмуванні і технологіях, наприклад, його використовують протоколи маршрутизації OSPF і IS-IS. В екології цей алгоритм використовується для побудови екологічних мереж, де ваги ребер заздалегідь відомі (наприклад, карта опору ландшафту). Алгоритм Дейкстри застосовується для зваженого графа у разі, коли треба знайти шляху до всіх вершин у графі.

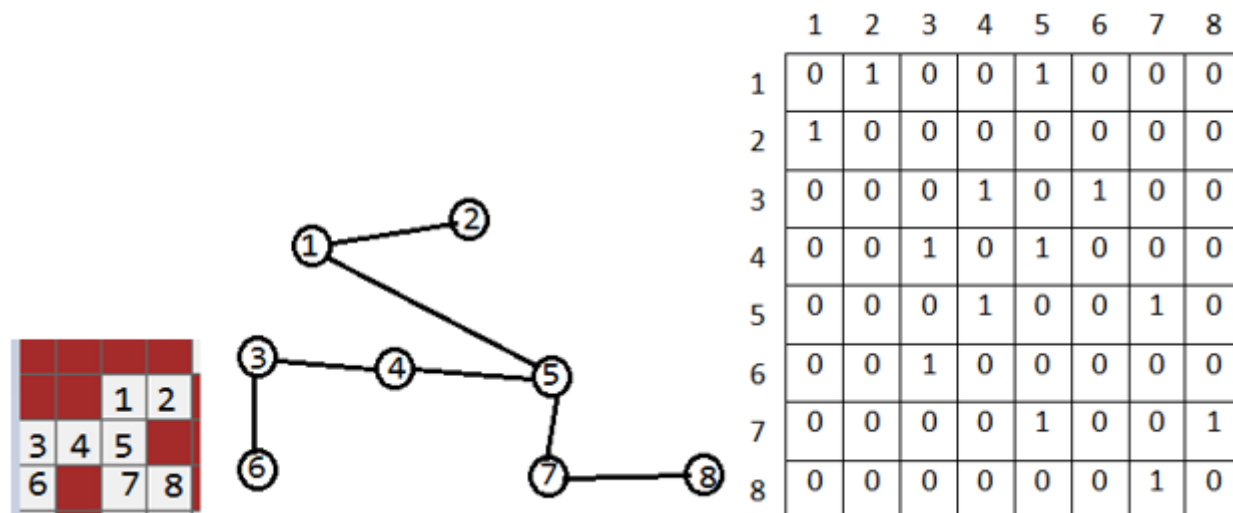


Рисунок 2 – Граф і відповідна матриця суміжності

Кожній вершині зіставимо мітку – мінімальну відому відстань від цієї вершини до  $a$ . Алгоритм працює покроково – на кожному кроці він «відвідує» одну вершину і намагається зменшувати мітки. Робота алгоритму завершується, коли всі вершини відвідані.

Переваги алгоритму полягають у тому, що він гарантує знаходження оптимального шляху та підходить для сітки з однаковими або різними вагами переходів. Тоді як до недоліків відноситься те, що не використовує евристику та може бути повільним для великих лабіринтів.

*Алгоритм A (A-Star)\** – це один з найефективніших алгоритмів для пошуку шляху в сіткових структурах. Він являє собою модифікацію алгоритму Дейкстри, яка використовує прогноз відстані до цілі, що робить його значно швидшим. В екології цей алгоритм є основним стандартом для ГІС-пакетів (Linkage Mapper, ArcGIS) при моделюванні міграційних коридорів. Він використовує фактичну вартість шляху  $g(n)$  й евристичну оцінку до цілі  $h(n)$ . Функція оцінки:

$$f(n) = g(n) + h(n).$$

Переваги алгоритму A\*: швидший за алгоритм Дейкстри при використанні допустимої евристики; добре підходить для візуалізації. Серед недоліків зазначається складніша реалізація та потреба у додаткових структур даних.

*Алгоритми для динамічного середовища.* У випадку змін перешкод у реальному часі класичний A\* потребує повного перезапуску. Для оптимізації використовують D\*Lite – це інкрементальний евристичний алгоритм пошуку шляху, призначений для роботи в середовищах, що змінюються. Його основна перевага — перебудова лише змінених частин маршруту, а не повний перерахунок, як у випадку з A\* search algorithm.

На відміну від A\*, який будує шлях від старту до цілі, D\*Lite працює у зворотному напрямку – від цілі до старту. Алгоритм підтримує дві основні оцінки для кожної вершини:

$g(v)$  – поточна найкраща відома вартість шляху;

$rhs(v)$  – однокрокова оцінка (lookahead value).

Ключова умова узгодженості:

$$g(v) = rhs(v).$$

Якщо рівність порушена – вершина вважається "неузгодженою" і потребує оновлення.

Алгоритм D\*Lite використовує:

- пріоритетну чергу (відкритий список),

- евристичну функцію  $h(v)$ ,
- ключ вершини:

$$key(v) = [\min(g(v), rhs(v)) + h(start, v) + km, \min(g(v), rhs(v))],$$

де  $km$  – коефіцієнт корекції при зміні позиції агента.

Основні етапи роботи:

*Крок 1 – Ініціалізація:*

- $g(v) = \infty$  для всіх вершин,
- $rhs(goal) = 0$ ,
- $goal$  додається в чергу.

*Крок 2 – Обчислення найкоротшого шляху.* Алгоритм:

- витягує вершину з мінімальним ключем,
- оновлює її значення,
- поширює зміни на сусідів.

*Крок 3 – Рух агента.* Агент:

- рухається до сусідньої вершини з мінімальним  $g$ ;
- при зміні середовища ініціює оновлення.

Переваги використання D\*Lite:

- ефективність у великих лабіринтах,
- миттєва реакція на зміну перешкод,
- підходить для реального часу,
- мінімізує обчислювальні витрати.

Недоліки:

- складніша реалізація,
- потребує додаткових структур даних,
- вища ймовірність помилок при програмуванні.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Для розробки програми обрана мова програмування C#. Програма має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс у застосунку Windows Forms (рис. 3).

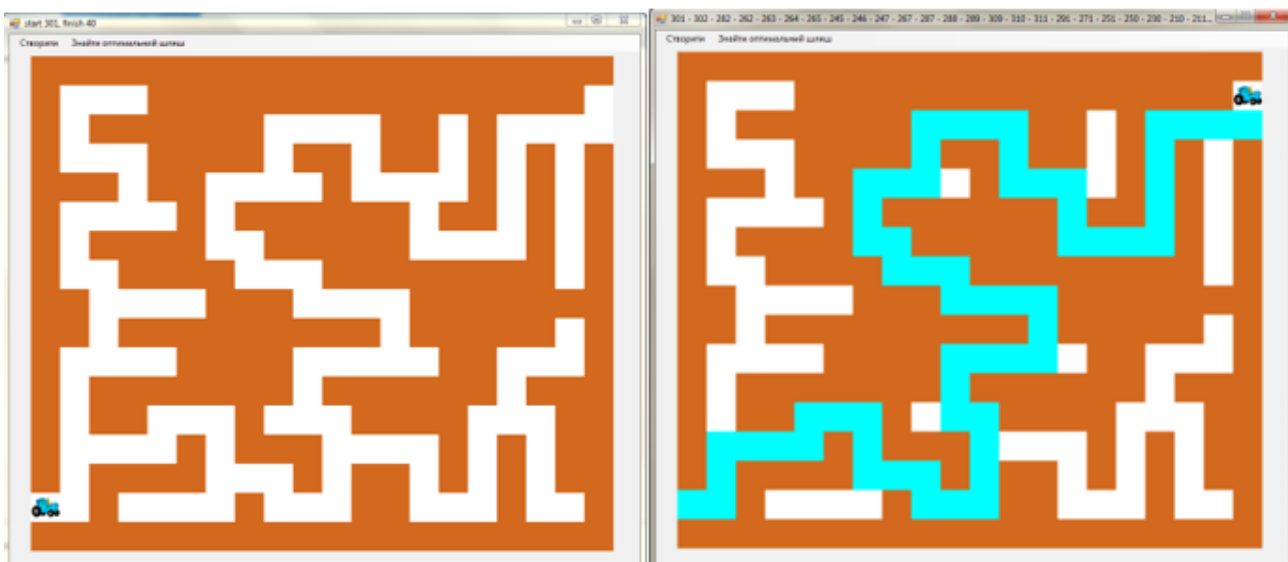


Рисунок 3 – Відображення оптимального шляху

Для пошуку оптимального шляху в лабіринті застосовані як алгоритм Дейкстри з використанням класу Dijkstra так і алгоритм D\*Lite з використанням класів DstarLite (основний клас), PriorityQueue (Пріоритетна черга), Node (Модель вузла).

Діаграма класів з використанням алгоритму Дейкстри зображена на рис. 4.

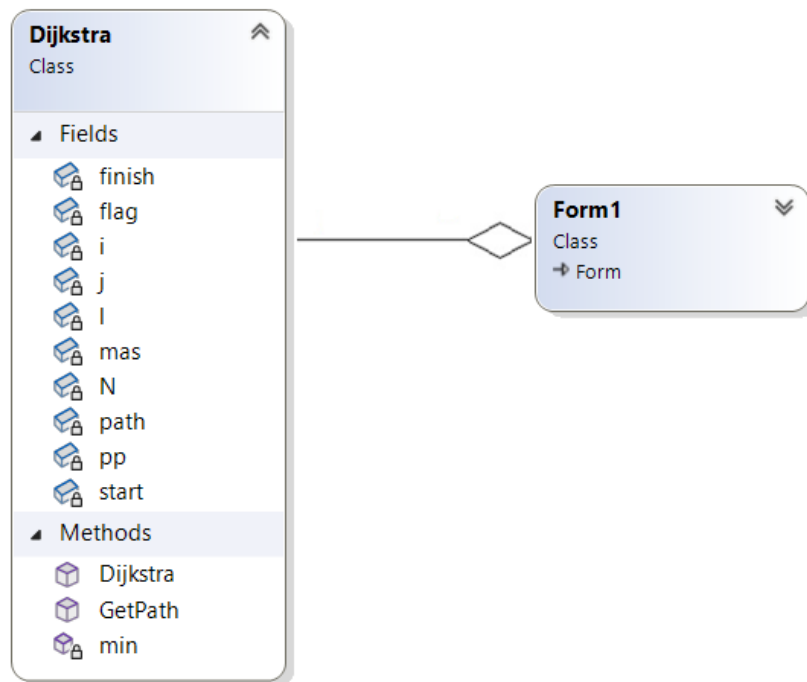


Рисунок 4 – Діаграма класів з використанням алгоритму Дейкстри

Діаграма класів з використанням алгоритму D\*Lite зображена на рис. 5.

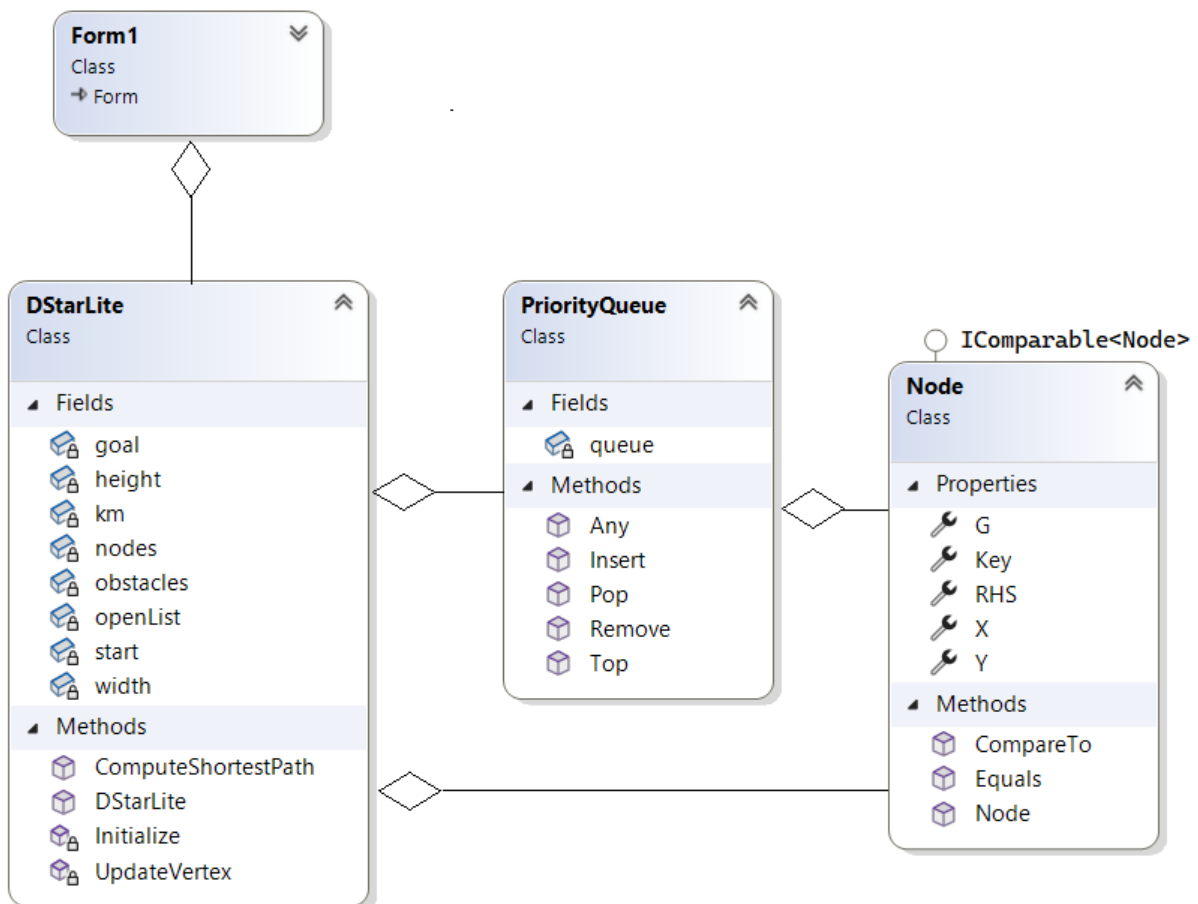


Рисунок 5 – Діаграма класів з використанням алгоритму D\*Lite

Порівнюючи два алгоритми можна зробити висновок, що реалізація з використанням алгоритму Дейкстри набагато простіше, ніж реалізація з використанням алгоритму D\*Lite, тому незважаючи на зазначені вище недоліки (може бути повільним для великих лабіринтів) добре підходить для візуалізації невеликих лабіринтів, таких як на рис. 3. Якщо маємо великі лабіринти і потрібна миттєва реакція на зміну перешкод, доцільно застосовувати алгоритм D\*Lite, незважаючи на суттєво складнішу реалізацію і необхідність застосування додаткових структур даних.

Візуалізація алгоритмів пошуку шляху – це потужний інструмент, який поєднує теорію з практикою. Вона широко використовується в сучасних технологіях від роботів до навігаційних систем і допомагає як розробникам, так і дослідникам краще розуміти та вдосконалювати алгоритми. Програма візуалізації алгоритму пошуку оптимального шляху в лабіринті має величезне практичне значення і може застосовуватися у робототехніці та автономних системах для навігації роботів у реальному середовищі, допомагає уникати перешкод і знаходити найкоротший шлях, дозволяє інженерам бачити, як робот «приймає рішення» в реальному часі.

В навігаційних системах візуалізація допомагає аналізувати маршрути, оптимізувати трафік, демонструвати альтернативні шляхи. У логістиці та складських системах це оптимізація маршрутів для працівників, роботів, доставки товарів. У мережах і телекомунікаціях здійснює пошук оптимального маршруту передачі даних. Візуалізація дозволяє аналізувати затримки, знаходити перевантажені вузли. У медичних та біологічних задачах аналогії з лабіринтами використовуються в нейронних мережах, аналізі ДНК. В освіті та навчанні допомагає студентам зрозуміти як працюють алгоритми. Інтерактивні симуляції значно покращують засвоєння матеріалу.

**Висновки та перспективи.** Проведені в роботі дослідження дозволяють сформулювати такі висновки щодо використання алгоритмів пошуку оптимального шляху та їх візуалізації:

Задача пошуку оптимального шляху в лабіринтах із динамічними перешкодами є критично важливою для сучасного природокористування, екології, робототехніки, логістики та навігаційних систем. Використання теорії графів дозволяє ефективно моделювати складні екосистеми, наприклад, екологічні коридори для міграції тварин або гідрографічні мережі.

Проведене в роботі порівняння алгоритмів дозволило зробити такі висновки.

Алгоритм Дейкстри гарантує знаходження найкоротшого шляху і добре підходить для візуалізації невеликих лабіринтів завдяки простішій реалізації, хоча може бути повільним на великих об'єктах.

Алгоритм A\* є ефективнішим за алгоритм Дейкстри в статичних середовищах завдяки використанню евристичних оцінок відстані до цілі.

Алгоритм D\*Lite є оптимальним для динамічних середовищ, оскільки дозволяє перераховувати лише змінені частини маршруту замість повного перезапуску, що критично для роботи в реальному часі.

Програмна візуалізація роботи алгоритмів пошуку оптимального шляху на графі є потужним інструментом, що дозволяє бачити процес «прийняття рішень» автономними системами в реальному часі, аналізувати затримки та оптимізувати маршрути.

Інтерактивні симуляції та розроблена програма на мові C# довели свою ефективність при практичному використанні, допомагаючи наочно зрозуміти принципи роботи алгоритмів пошуку оптимального шляху на графі.

Практична цінність запропонованого в роботі підходу сприяє мінімізації витрат ресурсів та антропогенного втручання в екосистеми, забезпечуючи при цьому максимальну надійність і наочність результатів.

Основними перспективними напрямками для подальшого розвитку запропонованих в роботі підходів можна вважати розробку гібридних моделей, де класичні алгоритми пошуку шляху (A\*, D\* Lite) поєднуюватимуться з нейронними мережами для прогнозування появи перешкод у динамічних середовищах на основі історичних даних, та розширення можливостей візуалізації шляхом впровадження 3D-візуалізації та технологій доповненої реальності (AR)

для наукового моделювання рішень автономних систем безпосередньо на місцевості (наприклад, для навігації сільськогосподарських роботів на складних рельєфах).

### Список використаних джерел

1. Minor, E.S., Urban, D.L. (2008), A Graph-Theory Framework for Evaluating Landscape Connectivity and Conservation Planning. *Conservation Biology*, 22: 297-307. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00871.x>.
2. Shanu, S., Wattasseril, J. I., Qureshi, Q., & Jhala, Y. V., Bhattacharya S. (2016). A graph theoretic approach for modelling wildlife corridors. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.01939>
3. Choi, S., Ullah, Z., & Son, M. (2026). A graph-based machine learning framework for river water quality management under data limitations. *Journal of Environmental Management*, 398, 128575. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128575>.
4. Aho, K., Kriloff, C., Godsey, S. E., Ramos, R., Wheeler, C., You, Y., Warix, S., Derryberry, D., Zipper, S., Hale, R. L., Bond, C. T., & Kuehn, K. A. (2023). Non-perennial stream networks as directed acyclic graphs: The R-package streamDAG. *Environmental Modelling & Software*, 167, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105775>.
5. Dunne, J. A., & Williams, R. J., Martinez N. D. (2002). Food-web structure and network theory: The role of connectance and size, 99 (20) 12917-12922. <https://doi.org/10.1073/pnas.19240769>
6. Longjas, A. ; Tejedor, A. ; Fofoula-Georgiou, E. (2017). Graph Theory Approach for Studying Food Webs. American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract #IN33B-0119. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFMIN33B0119L/abstract>.
7. Evans D.M., Pocock M.J. O., Memmott J. (2013). The robustness of a network of ecological networks to habitat loss. *Ecology Letters*, 16(7). <https://doi.org/10.1111/ele.12117>.
8. Ormsbee, L. E., & Lansley, K. E. (2024). Graph theory applications in water distribution system design and optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(4), 04023012. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6001>.
9. Zheng, Y. (2025) Historical Evolution and Future Optimization of A\*-Based Path Planning in Static and Dynamic Environments. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. <https://hsetdata.com/index.php/ojs/article/view/838>.
10. Liao, T., Chen, F., Wu, Y., Zeng, H., Ouyang, S., Guan, J. (2024) Research on Path Planning with the Integration of Adaptive A-Star Algorithm and Improved Dynamic Window Approach *Electronics* 13(2), 455; <https://doi.org/10.3390/electronics13020455>.
11. Sinkevych, O., Boyko, Y., Sokolovskyy, B., Rechynskiy, O. (2024) Study of Pathfinding Approach Based on A\* With Adaptive Occupancy Grid. *ACPS*. 9(2)6, 95–100, <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.095>.
12. Stawarz, P., Ozog, D., Łabuński, W. (2024) Supported Influence Mapping for Mobile Robot Pathfinding in Dynamic Indoor Environments *Sensors*. 24(22), 7240, <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/22/7240>.
13. Gao, Y., Han, Q., Feng, S., Wang, Z., Meng, T., Yang, J. (2024) Improvement and Fusion of D\*Lite Algorithm and Dynamic Window Approach for Path Planning in Complex Environments *Machines*, 12(8), 525; <https://doi.org/10.3390/machines12080525>.
14. Chen, L., & Wang, Y. (2025). Time and memory trade-offs in shortest-path algorithms for dynamic road networks. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 71(3), 442–459. <https://doi.org/10.1007/s12190-025-01842-x>.
15. Aldhafferi N. (2025) Time and Memory Trade-Offs in Shortest-Path Algorithms Across Graph Topologies: A\*, Bellman–Ford, Dijkstra, AI-Augmented A\* and a Neural Baseline. *Computers*, 14(12), 545; <https://doi.org/10.3390/computers14120545>.
16. Patel, A. (n.d.). Introduction to the A\* algorithm. Red Blob Games. Retrieved May 22, 2024, <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>.
17. Ji, Y., Zuo, T., & Hu, L. (2023). Pareto optimal path generation algorithm in stochastic transportation networks with reliability constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 148, Article 104039. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104039>.

18. Vanin, V., Zalevska, O., Jablonskiy, P. (2020). The application of graph theory for improving and rendering algorithm for finding the shortest path in the mathematical models of video games [Zastosuvannia teorii hrafiv dlia udoskonalennia ta vizualizatsii alhorytmu poshuku naikorotshoho shliakhu v matematychnii modeli videoihry]. *Applied Geometry and Engineering Graphics*. 97, 23–28, <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.97.23-28>.

### **Milovidov Yurii**

*Senior Lecturer of the Department of Computer Science,  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5705-3590>  
E-mail: [yurii\\_milovidov@nubip.edu.ua](mailto:yurii_milovidov@nubip.edu.ua)

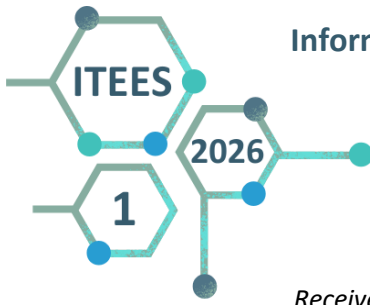
### **Borodkina Iryna**

*Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Computer Science,  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3667-3728>  
E-mail: [i.borodkina@nubip.edu.ua](mailto:i.borodkina@nubip.edu.ua)

## **VISUALIZATION OF THE ALGORITHM FOR FINDING THE OPTIMAL PATH BETWEEN TWO POINTS IN A GRID MAZE WITH DYNAMICALLY CHANGING OBSTACLES**

**Abstract.** *This paper investigates the current problem of finding the optimal path in dynamic environments modeled as cellular labyrinths with obstacles. The problem of finding the optimal path between two points of a cellular labyrinth is relevant due to its versatility, applied value and fundamental importance for the development of modern technologies. The main attention is paid to the development and software implementation of a system for visualizing algorithms on graphs, which allows real-time observation of the decision-making process of an autonomous agent. The paper provides a detailed comparative analysis of classical methods, such as Dijkstra's algorithm and A\*, as well as specialized incremental approaches, in particular D\* Lite. The advantages of using graph theory for solving problems in environmental management, logistics and robotics, where the environment can change unpredictably, are substantiated. The purpose of the presented work is to develop a program for visualizing the algorithm for finding the optimal path on a field, which can be represented as a labyrinth with surmountable and insurmountable obstacles. The task is to find the optimal path between two points on the field and display it. The practical part of the research includes the development of software in C#, which demonstrates the process of rerouting the route when new obstacles arise without the need for a complete recalculation of the entire network. This is critically important for minimizing computational costs in complex information and analytical systems. A special emphasis is placed on the educational aspect: the developed visualization is integrated into the educational process for teaching the disciplines "Algorithms and Data Structures" and "Object-Oriented Programming", which significantly improves the assimilation of complex mathematical concepts by students. The results of the work confirm that the combination of theoretical methods of pathfinding with interactive visualization provides high reliability and transparency of the functioning of modern navigation and environmental monitoring systems. The program for visualizing the algorithm for finding the optimal path in a maze has great practical importance and can be used in robotics and autonomous systems for robot navigation in a real environment, in networks and telecommunications it searches for the optimal data transmission route. Visualizing the algorithm for finding the optimal path in a cellular maze with dynamic obstacles allows for a deeper understanding of the principles of operation of algorithms, to assess their effectiveness in real time, and to experiment with different strategies for rerouting the route.*

**Keywords:** *Depth First Search, Breadth First Search, Graph theory, Pathfinding, Dynamic environment, Dijkstra's algorithm, A-star algorithm (A)\*, D Lite algorithm\*, Algorithm visualization, Grid-based maze, Decision support systems.*



## Sahun Andrii

PhD, Associated Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

E-mail: [a.sahun@nubip.edu.ua](mailto:a.sahun@nubip.edu.ua)

## FROM MERKLE–DAMGÅRD TO SPONGE: ARCHITECTURAL IMPACT ON HASH FUNCTION SECURITY

**Abstract.** The paper investigates the influence of cryptographic hash function architecture on their cryptographic strength. The main focus is on a comparative analysis of the classical Merkle–Damgård architecture used in the SHA-2 family and the Sponge architecture implemented in the SHA-3 standard. It is shown how the design features of the Sponge architecture, in particular the division of the internal state into speed (rate) and capacity parts, provide an increased margin of cryptographic strength and ensure low vulnerability to the inherent Merkle–Damgård constructions, including the message extension attack. The possibility of estimating the dispersion index for attributing a hash function to a cryptographic type has been confirmed. At the same time, the question remains about the unambiguity of the correspondence between theoretical statistical indicators of the quality of hash functions. The only known indicator of the quality of hash functions is based on the variance indicator and unambiguously shows only whether a particular hash function belongs to cryptographic or non-cryptographic. At the same time, it has been confirmed that the  $\chi^2$  test, as a “bias detector” can prove that the hash function is hack-resistant with high probability. But the question remains about the unambiguity of the correspondence between theoretical statistical indicators of the hash functions quality.

**Keywords:** Cryptographic Hash Functions; SHA-3; SHA-2; Merkle–Damgård Architecture; Sponge Architecture; Crypto Resistance; Safety Margin; Post-quantum Security.

**Introduction.** Today cryptographic hash functions play a critical role in contemporary cybersecurity, enabling secure data storage, digital signatures, authentication subsystems, blockchain technologies and others applications. Modern secure hash function must satisfy principal properties such as preimage resistance, second preimage resistance, collision resistance.

For decades, the construction of Merkle–Damgård, using in SHA-1, SHA-2 hash-functions served as the de facto standard for building the most popular iterative hash functions. Despite its theoretical foundations, practical cryptanalysis has demonstrated that the MD paradigm introduces structural vulnerabilities that can be exploited independently of the underlying compression function [1, 2].

Otherwise, the Sponge construction, standardized through SHA-3, demonstrates a significant architectural departure.

**The purpose of the research** is to establish and demonstrate the relationship between the statistical parameters of hash functions based on the Merkle–Damgård and sponge architectures and cryptographic stability and the Security Margin parameter.

**Literature Review.** Today, there are three main approaches to constructing cryptographic hash functions:

- Merkle–Damgård.
- HAIFA;
- Sponge.

It is known from a number of sources that the sponge architecture of the SHA-3 hash function is significantly different from the architecture of the SHA-2 function based on Merkle–Damgård [3–4]. From practical application and results of cryptanalysis, it is known that the architecture determines the resistance to structural attacks, the possibility of expansion and the level of cryptographic reserve [5–7].

Modern cryptographic hash functions mainly consist of: 1) a block of internal permutation/compression function; 2) message processing mode block. At the same time, the sponge architecture has a unique resistance not only to the existing traditional methods of cryptanalysis, but also to quaternary methods of co-promotion of the function [4, 8, 9].

The sponge architecture of the SHA-3 function provides a disproportionately higher level of structural cryptoresistance compared to the classic Merkle–Damgård architecture used in the SHA-2 function. The division of the internal state into "rate" and "capacity" in SHA-3 allows this algorithm to formally control the margin of cryptographic strength. The same division eliminates the vulnerabilities of the SHA-3 hash function by the length-extension type, which makes it optimally suitable for modern information systems with increased security.

Comparing the theoretical cryptographic strength, one can see a strong difference between these three basic architectures (Table 1).

*Table 1 – Comparison of theoretical cryptographic strength of basic hash function architectures*

Indicators of cryptoresistance	Architecture of hash functions		
	Merkle–Damgård (MD5, SHA-1, SHA-2)	HAIFA (BLAKE, SHAvite-3)	Sponge (SHA-3)
Construction type	iterative	iterative (extended)	permutation
Inner state	$n$ bits	$n$ bits + salt + counter	$b = r + c$ bits
Function of compression	available	available (modified)	disable
Padding	obligated	obligated	obligated
Length-extension attack	possible	removed partial	removed
Salt / randomization	disable	available	available (capacity)
Formal security evidence	limited	partial	strong
Output length flexibility	disable	disable	available (XOF, SHAKE)

**Materials and Methods.** Merkle–Damgård is a classic iterative scheme that involves initial addition of the input bit data, dividing it into blocks, followed by compression on each block. The scheme includes an initializing vector (IV) for 4 registers. At the end of the last round, we get the final hash value. This architecture is used in hash functions MD5, SHA-1, SHA-2.

In connection with the revealed presence of problems related to the cryptoresistance of hash functions based on the Merkle–Damgård architecture, described in [10-14], its modification - HAIFA architecture (Hash Iterative Framework Alternative) was proposed over time. This construction is an extension of Merkle–Damgård with some modifications. Namely: the cryptographic "salt" is a pseudo-random value for each call (eliminates reproducible hashes); block counter — takes into account the position of the block in the message; a modified compressor including an initialization vector (IV), a salt, and a counter.

All modifications of the basic Merkle–Damgård scheme available in the HAIFA architecture significantly improve its quality. This provides the following advantages to the HAIFA architecture: the Salt mechanism protects the architecture from attacks using "rainbow" tables by pre-calculating hash tables; the block counter counter neutralizes certain forms of attacks related to block positions.

Overall, such architectural improvements provide better security control compared to the classic Merkle–Damgård architecture. At the same time, there are certain limitations associated with the fact that the Merkle–Damgård architecture is based on an iterative approach. Therefore, not all the weaknesses of the well-studied Merkle–Damgård scheme are excluded (the "length-extension" type dependence is only partially reduced, but not completely excluded - unlike the sponge architecture). Therefore, the HAIFA architecture requires the use of additional mechanisms for increasing stability (salt, counter) — therefore, it has a more complex implementation.

Table 2 summarizes the comparative characteristics of resistance to popular vulnerabilities of all three considered hash function architectures.

*Table 2 – Comparative characteristics of resistance to popular vulnerabilities of the Merkle–Damgård, HAIFA, Sponge architectures*

Hash function architecture name	Sensitivity to vulnerability type			
	Length-extension	Capacity-based	Flexibility	Theoretical safety evidence
Merkle–Damgård	possible	disable	fixed	limited
HAIFA	partially reduced	partially available	improved	average
Sponge	disable	yes	high (XOF)	formal, strong

A theoretical comparison of the security levels of the classical (Merkle–Damgård) architecture of hash functions of the SHA type, its modernized version (HAIFA, and the Sponge architecture is particularly revealing. Table 3 shows the results of the collision resistance of classical and quantum evaluation.

*Table 3 – Security level comparison under classical and quantum attack models*

Construction	Collision resistance (classical)	Prototypical resilience	Quantum assessment (Grover)
Merkle–Damgård (SHA-256)	$\approx 2^{128}$	$\approx 2^{256}$	$\approx 2^{128}$
HAIFA (256 bit)	$\approx 2^{128}$	$\approx 2^{256}$	$\approx 2^{128}$
Sponge (SHA3-256)	$\approx 2^{128}$	$\approx 2^{256}$	$\approx 2^{128}$
Sponge (SHA3-512)	$\approx 2^{256}$	$\approx 2^{512}$	$\approx 2^{256}$

When interpreting the quantum security assessment for all hash functions listed in Table 3, we take into account that the Grover algorithm is optimal [15]. As can be seen from the data in Table 3, the overall estimates of collision occurrence in hash functions for classical brute-force and the quantum estimation algorithm (Grover) coincide, which is expected. The advantage of the Grover algorithm is that it speeds up traditional brute-force by allowing collision detection much faster than classical methods, while reducing the computational complexity to  $\Theta(2^{n/2})$ .

Therefore, to counter quantum attacks, it is considered necessary to at least double the hash size (for example, from SHA-256 to SHA-512, etc.).

For a more objective comparison, we programmatically implement the MD5 hash function algorithms according to its official description given in the source [14], and the SHA-3 hash function algorithms according to the description given in [16].

**Results and Discussion.** We have the obtained results for the data of the input test examples, formed in the following indicators:

- 1) the average proportion of "1" bits;
- 2) bit dispersion values for hash functions;

- 3) indicator of the avalanche effect;
- 4) distribution of integer values of digests.

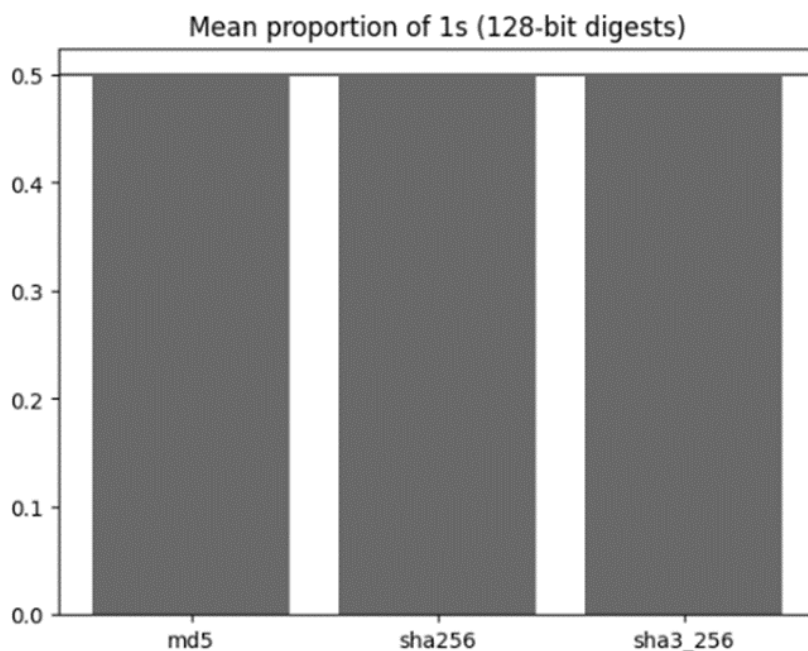


Figure 1 – The average proportion of "1" bits

The average proportion of "1" bits (Fig. 1) for MD5 is 0.499548 (0.0904%), for SHA3-128 this parameter = 0.5005 (0.1%), and for SHA-256 it is 0.499444 (0.112%). All indicators are very close to the theoretical 0.5.

To further investigate the quality of hash functions, we will use  $\chi^2$  tests. Such a test is an important statistical tool for assessing the quality of hash functions because for cryptographic applications, a hash function should have a uniform distribution of values (resulting in a reduced probability of collisions). This is the uniformity of the distribution (uniformity) [17].

If a hash function has such flaws, it will most likely create "hot spots" — areas where values fall more often than others.

The generalized analysis with the added  $\chi^2$ -test of uniformity and comparison of MD5 against SHA-2 (SHA-256) and SHA-3 (SHA3-256) is shown in Table 4.

Table 4 – Bit uniformity values

Algorithm's name	Characteristics			
	Average proportion of bis «1»	Dispersion	$\chi^2$ (bits)	p-value
MD5	0.499548	0.250000	0.522	0.46999
SHA-256	0.499444	0.250000	0.792	0.37347
SHA3-256	0.498905	0.249999	3.071	0.07969

Analyzing the data presented in Table 3, it can be stated that all statistical indicators are very close to theoretical ones: the average proportion of bits "1" = 0.5, the dispersion value typical for cryptographic functions = 0.25 [7], and the p-value parameter > 0.05 in all cases (there is no reason to reject the existing hypothesis of uniformity). But the SHA-3 algorithm showed a slightly larger value of the  $\chi^2$  parameter, but this is a statistically insignificant number. Next, we obtain the  $\chi^2$ -test for uniformity of bytes (0..255) – Table 5.

Table 5 –  $\chi^2$ -byte uniformity test (0..255)

Algorithm's name	$\chi^2$ (bytes)	p-value
MD5	282.94	0.11045
SHA-256	314.38	0.00660
SHA-3-256	251.90	0.54315

In the  $\chi^2$  test for byte uniformity, the SHA-3 algorithm showed the best uniformity of byte distribution, and SHA-256 has a uniformity index of  $p < 0.01$ , which is formally a statistical deviation from ideal uniformity (Figure 2). But such a deviation does not mean cryptographic weakness - under the conditions of using a large sample, even small fluctuations remain statistically significant. The MD5 algorithm in this test showed the accepted uniformity.

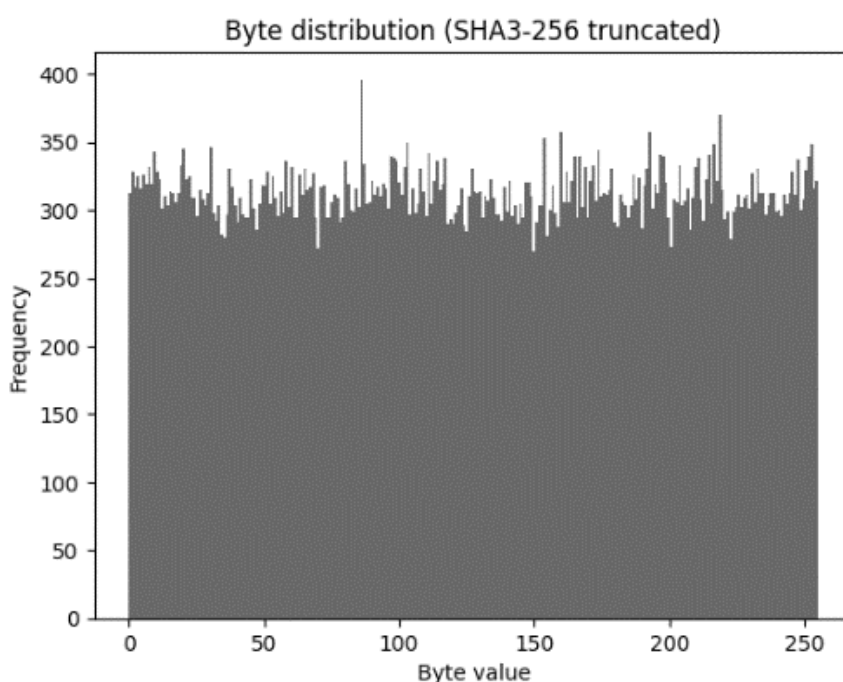


Figure 2 – Graphics of byte distribution for SHA3-256 truncated

The avalanche effect is of great importance as a characteristic of a hash function. The theoretical ideal for a 128-bit value is calculated as:  $128/2 = 64$ , for a 256-bit value it is 128 bits.

Table 6 – Parameters of hash-function near-perfect avalanche effect

Algorithm's name	Average Hamming's distance	Std
MD5	63.953	5.695
SHA2-256	64.034	5.599
SHA-3-256	63.888	5.894

All algorithms are shown on Table 6 demonstrate a near-perfect avalanche effect, but SHA2-256 showed a result closest to the theoretical value of 64. Graphically, the distribution has a shape close to normal (corresponding to the binomial distribution  $B(128, 0.5)$ ) and is shown in Figure 3.

The definition of the Security margin parameter in modern hash functions is particularly relevant. This is due to the fact that the Security margin is the difference between the declared theoretical stability of the algorithm and the computational complexity of the most effective known cryptoattack (expressed in the number of rounds or bits of endurance).

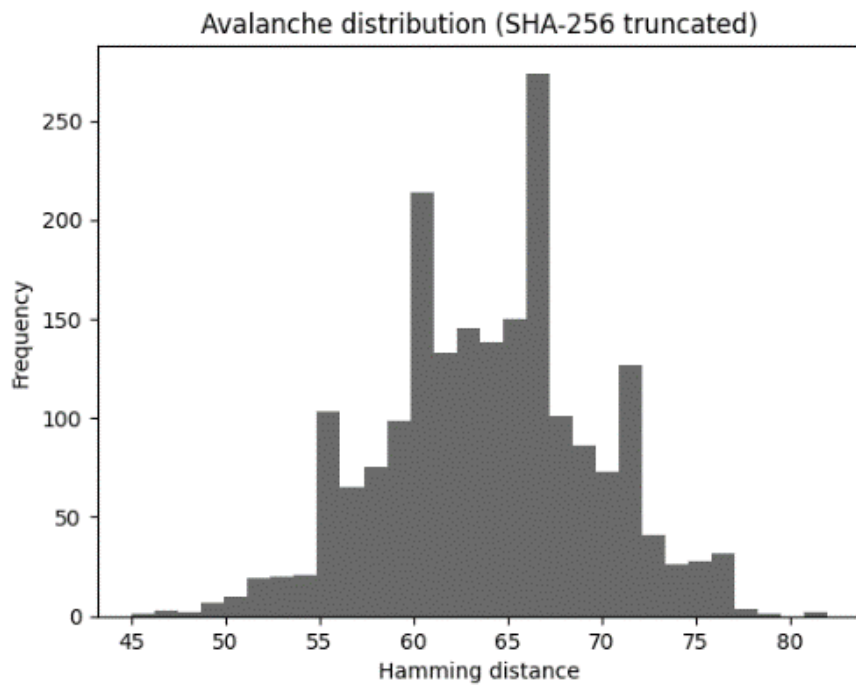


Figure 3 – Avalanche distribution for SHA-256 truncated

In fact, this parameter shows how reliable the function is if some of its rounds are compromised. Naturally, the increased reserve provides resistance to future cryptanalytic discoveries. Let's evaluate the Security margin parameter for two candidates (SHA2-256 and SHA3-256) as the most promising functions (Figure 4).

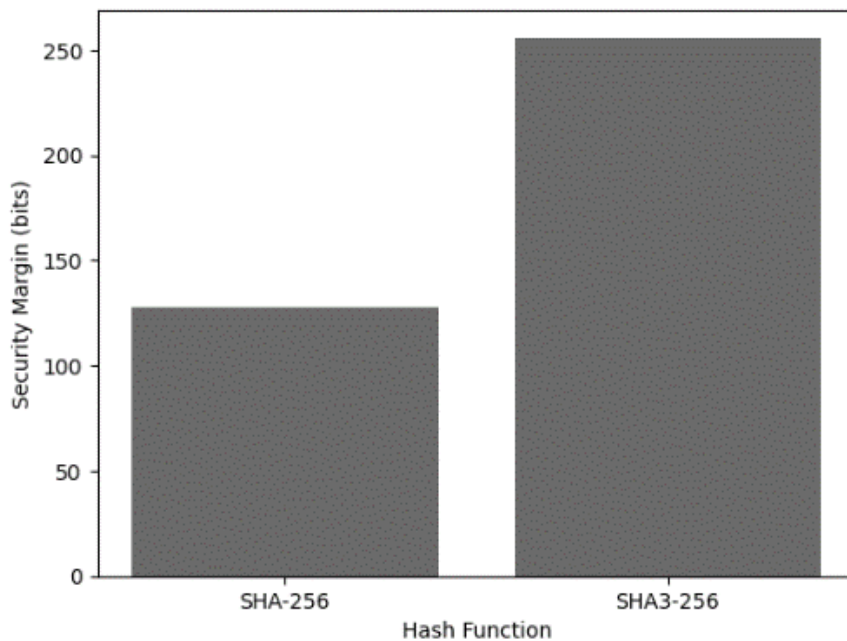


Figure 4 – Security Margin Comparison: SHA-2 vs SHA-3

We show in Figure 5 a graph with a comparison of the traditional and quantum estimates of the Security margin parameter, taking into account the results of the classical birthday paradox algorithm and the Grover algorithm for the SHA2-256 and SHA-3 hash functions. As you can see, due to its Sponge architecture, the Security Margin parameter is clearly almost an order of magnitude higher for the SHA3-256 algorithm. At the same time, all algorithms demonstrate: proximity to an

equiprobability distribution and a dispersion close to 0.25 (typical for all purely cryptographic functions) and a perfect avalanche effect. But, although MD5 algorithm statistically "looks good" by qualitative statistical parameters, it is not cryptographically secure. At the same time, SHA-2 and SHA-3 demonstrate equally good basic statistical properties. SHA-3 algorithm based on Sponge architecture demonstrates slightly better byte uniformity. Although SHA-256 and SHA3-256 provide the same nominal collision resistance of  $2^{128}$  operations, SHA-3 offers a significantly larger security margin due to its sponge construction with a 512-bit capacity, resulting in an effective margin of  $2^{256}$  operations.

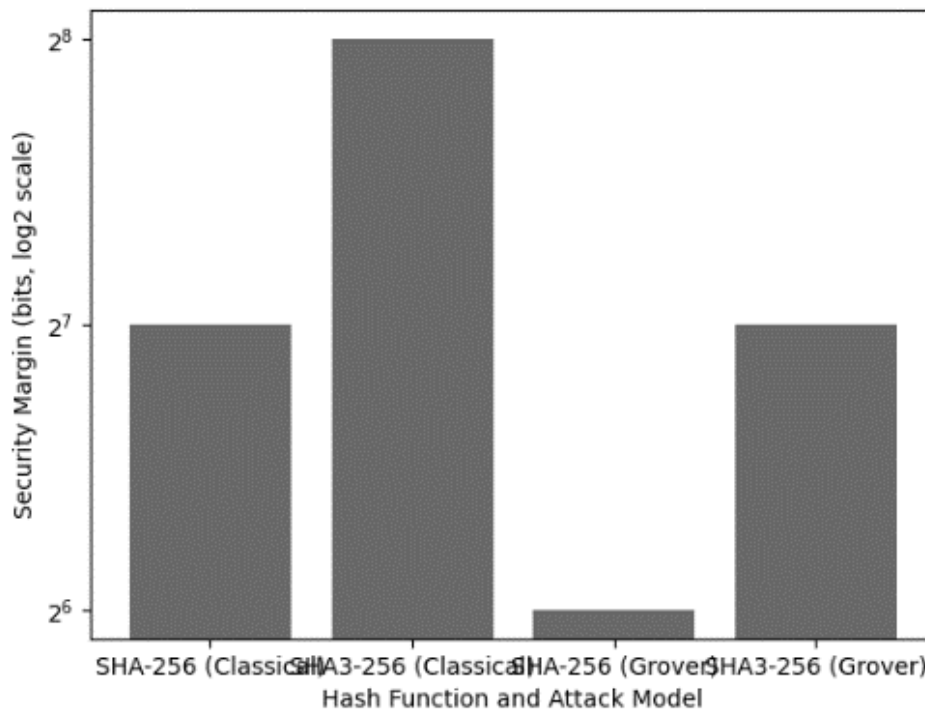


Figure 5 – Security Margin Comparison of SHA-2 and SHA-3 (Classical vs Quantum)

**Conclusions.** As can be seen from the research, the sponge architecture provides a safety margin of up to  $2^{256}$  operations for collision attacks and completely eliminates the class of length-extension attacks for the Sponge type construction. It is clear that the internal state of the Sponge architecture, with a volume of 1600 bits, provides a theoretical increase in structural cryptographic strength of more than  $2^{128}$  times compared to the minimum required level of security.

At the same time, it can be stated that the security of a hash function is determined not only by the cryptographic strength of its internal compression function and the length of the output value. It can be possible also by the architectural scheme of construction, although for a long time this paradigm of improving the security of hash functions prevailed in a number of scientific sources.

These findings, combined with advances in attack methodologies and increasing security demands, led to a paradigm shift toward more flexible hash constructions. At the same time, the question remains about the unambiguity of the correspondence between theoretical statistical indicators of the quality of hash functions. After all, in practical application, the  $\chi^2$  test, as a “bias detector”, can only prove that the hash function is hack-resistant, but does not assess the quality of the functions.

The results of the evaluation of the Security Margin Comparison of SHA-2 and SHA-3 (Classical vs Quantum) parameter obtained in Figure 2 differ significantly, although they characterize the same indicator. This raises the question of which algorithm (classical brute force or Grover's optimal target algorithm) is more appropriate for estimating the security margin in hash functions. This issue requires further research.

---

**References**

1. Wang, X., & Yu, H. (2005). How to break MD5 and other hash functions. In R. Cramer (Ed.), *Advances in cryptology – EUROCRYPT 2005 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3494, pp. 19–35)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/11426639\\_2](https://doi.org/10.1007/11426639_2).
2. Bertoni, G., Daemen, J., Peeters, M., & Van Assche, G. (2015). Keccak. *Cryptology ePrint Archive, Paper 2015/389*. <https://eprint.iacr.org/2015/389>.
3. Bertoni, G., Daemen, J., Peeters, M., & Van Assche, G. (2007). Sponge functions [Public comment to NIST]. *Ecrypt Hash Workshop*. [http://www.csrc.nist.gov/pki/HashWorkshop/PublicComments/2007 May.html](http://www.csrc.nist.gov/pki/HashWorkshop/PublicComments/2007%20May.html).
4. Damgård, I. (1989). A design principle for hash functions. In G. Brassard (Ed.), *Advances in cryptology – CRYPTO '89 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 435, pp. 416–427)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/0-387-34805-0\\_39](https://doi.org/10.1007/0-387-34805-0_39).
5. Hamlin, B., & Song, F. (2019). Quantum security of hash functions and property-preservation of iterated hashing. In A. Boldyreva & D. Micciancio (Eds.), *Advances in cryptology – CRYPTO 2019 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11692, pp. 329–349)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25510-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25510-7_18).
6. Sahun, A., Nikitenko, Y., Gikalo, P., Panasko, O., & Dudykevych, V. (2025). Method of quick hash functions quality determination. In I. Oprisky et al. (Eds.), *Proceedings of the Cyber Security and Data Protection (CSDP 2025) (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4042, pp. 291–299)*. CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-4042/short2.pdf>.
7. Hoch, Jonathan J.; Shamir, Adi (2008). "On the Strength of the Concatenated Hash Combiner when All the Hash Functions Are Weak". *Automata, Languages and Programming. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 5126. pp. 616–630. doi:10.1007/978-3-540-70583-3\_50.
8. Biham, Eli & Dunkelman, Orr. (2007). A framework for iterative hash functions-HAIFA. *IACR Cryptology ePrint Archive*. 2007. 278. <https://eprint.iacr.org/2007/278>.
9. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). Hash functions and data integrity. In *Handbook of applied cryptography (Chap. 9)*. CRC Press. <https://cacr.uwaterloo.ca/hac/about/chap9.pdf>.
10. Joux, A. (2004). Multicollisions in Iterated Hash Functions. Application to Cascaded Constructions. In: Franklin, M. (eds) *Advances in Cryptology – CRYPTO 2004*. CRYPTO 2004. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 3152. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-28628-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-540-28628-8_19).
11. Kelsey, John & Kohno, Tadayoshi. (2005). Herding Hash Functions and the Nostradamus Attack.. *IACR Cryptology ePrint Archive*. 2005. 281.
12. Kelsey, J., & Schneier, B. (2004). Second preimages on n-bit hash functions for much less than  $2^n$  work. *Cryptology ePrint Archive, Paper 2004/304*. <https://eprint.iacr.org/2004/304>.
13. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information (10th anniversary ed.)*. Cambridge University Press. <https://profmcruz.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/quantum-computation-and-quantum-information-nielsen-chuang.pdf>.
14. Rivest, R. (1992). The MD5 message-digest algorithm (RFC 1321). *Internet Engineering Task Force (IETF)*. <https://doi.org/10.17487/RFC1321>
15. Bertoni, G., Daemen, J., Peeters, M., & Van Assche, G. (2011). The Keccak SHA-3 submission. Keccak Team. <https://keccak.team/files/Keccak-submission-3.pdf>.
16. Greenwood, C., & Nikulin, M. S. (1996). *A guide to chi-squared testing*. Wiley.

**Сагун Андрій Вікторович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

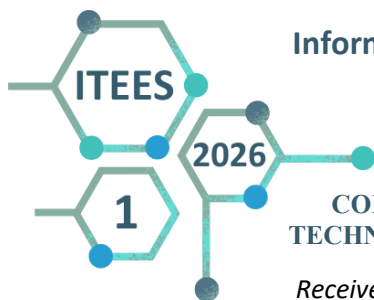
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

E-mail: [a.sagun@nubip.edu.ua](mailto:a.sagun@nubip.edu.ua)

**ВІД МЕРКЛЕ-ДАМГАРДА ДО SPONGE: ВПЛИВ АРХІТЕКТУРИ НА БЕЗПЕКУ ХЕШ-ФУНКЦІЙ**

***Анотація.** У статті досліджується вплив архітектури криптографічних хеш-функцій на їхню криптографічну стійкість. Основна увага приділяється порівняльному аналізу класичної архітектури Меркла-Дамгарда, що використовується в сімействі SHA-2, та архітектури Sponge, реалізованої в стандарті SHA-3. Показано, як конструктивні особливості архітектури Sponge, зокрема поділ внутрішнього стану на частини gate та capacity, забезпечують підвищений запас криптографічної стійкості та гарантують низьку вразливість до властивих конструкцій Меркла-Дамгарда, включаючи атаку розширення повідомлення. Підтверджено можливість оцінки індексу дисперсії для віднесення хеш-функції до криптографічного типу. Водночас залишається питання щодо однозначності відповідності між теоретичними статистичними показниками якості хеш-функцій. Єдиний відомий показник якості хеш-функцій базується на показнику дисперсії та однозначно показує лише те, чи належить певна хеш-функція до криптографічних чи некриптографічних. Водночас підтверджено, що  $\chi^2$ -тест, як «детектор зміщення», може з високою ймовірністю довести, що хеш-функція є стійкою до злому. Але залишається питання щодо однозначності відповідності між теоретичними статистичними показниками якості хеш-функцій.*

***Ключові слова:** криптографічні хеш-функції, SHA-3, SHA-2, архітектура Меркла-Дамгарда, архітектура Sponge, криптостійкість, запас міцності, постквантова безпека.*



### Лендел Тарас Іванович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6356-1230>

E-mail: [taraslendel@gmail.com](mailto:taraslendel@gmail.com)

### Євтушенко Максим Петрович

аспірант кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1125-1514>

E-mail: [maks202evtyshenko@gmail.com](mailto:maks202evtyshenko@gmail.com)

### Сафіна Ольга Василівна

голова циклової комісії автоматизації технологічних процесів та моніторингу навколишнього середовища, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист,  
ВСП "Київський фаховий коледж міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського"

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4063-5501>

E-mail: [safina.olha@tnu.edu.ua](mailto:safina.olha@tnu.edu.ua)

## ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

**Анотація.** У статті розглянуто питання побудови моделі підсистеми вимірювання технологічних параметрів процесу виробництва біогазу. Вказана підсистема вимірювання виконуватиме збір даних процесу бродіння біосировини (органічної сировини) для інтелектуальної системи керування технологічним процесом виробництва біогазу. При цьому у процесі збору даних зазначатиметься тип використовуваної органічної сировини. Це необхідно для формування керуючої дії в алгоритмі функціонування автоматизованої системи керування виробництвом біогазу. Проаналізовано особливості анаеробного зброджування біомаси та із проведеного аналізу літературних джерел зазначено основні технологічні параметри. Означене впливає на ефективність процесу утворення біогазу. Запропонована модель підсистеми вимірювання, що розглядається як технічний інструмент вимірювання параметрів процесу бродіння органічної сировини, при цьому вказаний підхід реалізується з використанням технологій інтернет речей. Розроблено структуру апаратного забезпечення вимірювальної підсистеми та наведено розрахунки похибок вимірювання інформаційно-вимірювального каналу. Наведено реалізацію технології інтернет речей на базі створеного web-сервера, що функціонує по принципу клієнт-серверної системи за HTTP-запитами. У розробленій моделі підсистеми вимірювання технологічних параметрів передбачено вимірювання у системі реального часу, а також усі дані вимірювання будуть зберігатися в окремий файл до енергонезалежної пам'яті, а саме до картки пам'яті типу micro-SD. Файл вимірюваних даних зберігатиметься в формат CSV, що дозволить опрацьовувати дані через хмарні сервіси або пакет прикладних програм Microsoft Office Excel. Означений підхід дозволить також виконувати систематизацію даних і можливість оперативного коригування, за необхідності, технологічного процесу. Функціональні можливості запропонованої моделі підсистеми вимірювання технологічних параметрів можливо збільшувати завдяки удосконаленню програмного та апаратного забезпечення.

**Ключові слова:** біогаз, анаеробне зброджування, підсистема вимірювання, біореактор, інтернет речей.

**Актуальність.** У сьогоднішній кожна країна формує свою національну безпеку, однією із складових якої є енергетична незалежність та можливість планувати використання енергоресурсів. При цьому сучасний розвиток енергетики характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії. Серед різних напрямів відновлювальних джерел енергетики перспективним напрямком є використання технологій виробництва біогазу, що дозволяють переробляти органічні відходи у відновлювану енергію. Біогаз утворюється внаслідок анаеробного зброджування органічної біомаси під дією анаеробних мікроорганізмів [1, 2].

Щодо основних компонентів біогазу, то у його склад входять метан, вуглекислий газ, а також різні домішки водню, сірководню та водяної пари. Ефективність біогазового виробництва значною мірою залежить від параметрів технологічного процесу та властивостей використовуваної органічної сировини [2, 3].

Різноманітність підходів щодо використання різних типів органічної сировини як біоматеріалу для зброджування і виробництва біогазу створює окреме завдання у проведенні досліджень динаміки процесу бродіння, і при цьому отримання значного набору даних [3]. Означений набір даних необхідно виконувати для подальшого формування алгоритмів керування процесом бродіння із врахуванням типу сировини та динаміки проходження процесу. Також збережені дані в подальшому можна використати як базу знань для виконання прогнозування виробництва біогазу з урахуванням типу сировини [4].

Виникає потреба у створенні підсистеми вимірювання технологічних параметрів виробництва біогазу для отримання набору даних, які будуть використані для визначення керуючої дії процесу бродіння..

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Анаеробне зброджування є складним біохімічним процесом, який включає кілька послідовних стадій: гідроліз, ацетогенез та метаногенез. На кожному етапі відбувається перетворення органічних речовин у простіші сполуки, що в кінцевому результаті призводить до утворення метану [2].

Можна виокремити окремі параметри, які визначають ефективність процесу ферментації, а саме: температура, кислотність середовища (рН), концентрація летких жирних кислот та концентрація метану у біогазі [1-3].

Для керування процесом бродіння необхідною умовою є виконання вимірювання технологічних параметрів. Кожен тип сировини, який зброджується, характеризується своєю структурною особливістю. При проектуванні автоматизованих систем керування процесом виробництва біогазу також розглядається визначення якості сировини перед внесенням у біореактор [5].

У сучасних системах автоматизованого керування широко використовуються технології інтернет речей, хмарних технологій, штучного інтелекту та експертних систем підтримки прийняття рішень [6-8].

**Мета дослідження** – створити модель програмно-апаратного забезпечення підсистеми вимірювання технологічних параметрів процесу виробництва біогазу з використанням технології інтернет речей.

**Матеріали і методи дослідження.** Для реалізації моделі програмно-апаратного забезпечення підсистеми вимірювання обрано комплекс технічних засобів Arduino. Це апаратно-програмна платформа з відкритим синтаксисом програмування і використовується для реалізації електронних пристроїв у робототехніці та автоматизації. Програмне забезпечення є безкоштовним та доступним для подальшої модифікації створюваних окремих пристроїв та систем у цілому.

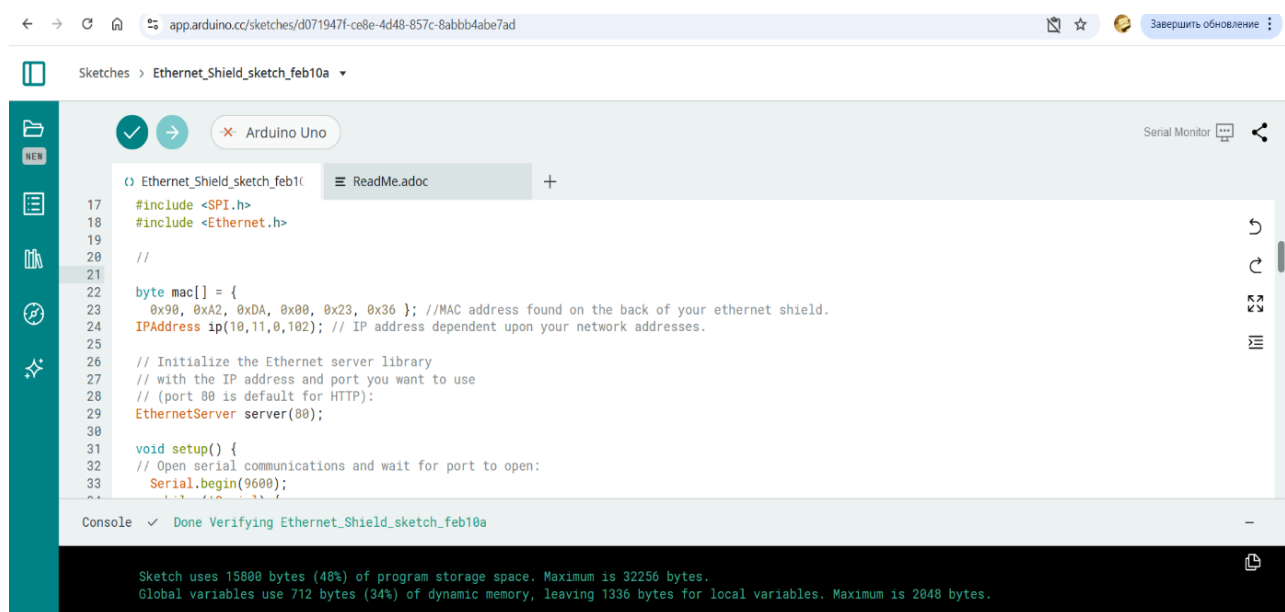
Як керуючий пристрій підсистеми вимірювання розглянуто модель Arduino Mega 2560, що виконана на базі мікроконтролера Atmega2560. Сенсори (сприймаючі елементи) для виконання вимірювання з'єднуються з керуючим пристроєм, до якого також подається живлення згідно з його технічними характеристиками.

Для реалізації технології інтернет речей вказаний керуючий пристрій з'єднано з модулем Ethernet Wiznet W5500, що виконує функцію зв'язку керуючого пристрою через мережеві

протоколи. Ethernet Wiznet W5500 за технічними характеристиками забезпечує мережевий (IP) обмін даними, де підтримується протоколи TCP і UDP. При цьому на зазначеному модулі зв'язку є роз'єм для картки пам'яті типу micro-SD, що використовується для зберігання файлів даних. Arduino Mega 2560 під час функціонування взаємодіє одночасно з модулем Ethernet Wiznet W5500 і з SD-картою за допомогою шини SPI (через роз'єм ICSP). Сенсори для вимірювання технологічних параметрів підключатимуться до керуючого пристрою, який виконує вимірювання.

Технологія інтернет речей реалізовується через створення web-серверу підсистеми вимірювання. Web-сервер створено на базі комплексу технічних засобів Arduino Mega 2560 та Ethernet Wiznet W5500. У процесі свого функціонування виконуватиметься приймання HTTP-запитів від клієнтів. Для з'єднання клієнт використовує веббраузер. Після вказаного запиту клієнти отримують HTTP-відповіді, де буде наведено виміряні технологічні параметри. Усі вимірювання у системі реального часу також будуть записані окремим файлом в micro-SD. Файл даних зберігатиметься в формат CSV, що дозволить опрацьовувати дані через хмарні сервіси або пакет прикладних програм Microsoft Office Excel.

З'єднання користувача з web-сервером виконується через внутрішню мережу та апаратне забезпечення мережевих пристроїв. Для запропонованої підсистеми вимірювання розроблена програма, фрагмент тексту програми наведено на рис. 1. Програмування виконується на мові програмування C++ при використанні продукту Arduino Web Editor (можливе використання програмного компілятора Arduino IDE).



```
17 #include <SPI.h>
18 #include <Ethernet.h>
19 //
20 //
21 //
22 byte mac[] = {
23   0x90, 0xA2, 0xDA, 0x00, 0x23, 0x36 }; //MAC address found on the back of your ethernet shield.
24 IPAddress ip(10,11,0,102); // IP address dependent upon your network addresses.
25 //
26 // Initialize the Ethernet server library
27 // with the IP address and port you want to use
28 // (port 80 is default for HTTP):
29 EthernetServer server(80);
30 //
31 void setup() {
32   // Open serial communications and wait for port to open:
33   Serial.begin(9600);
```

Рисунок 1 – Вигляд фрагменту програмного забезпечення

Структурна схема підсистеми вимірювання технологічних параметрів наведена на рис. 2.

**Результати дослідження та їх обговорення.** За результатами випробування користувачі можуть дистанційно отримувати дані вимірювань, а також при цьому всі виконані вимірювання записуються в окремий файл на карту пам'яті. Скріншот випробування моменту вимірювання наведено як сторінку веббраузера (рис. 3).

При цьому загальний алгоритм роботи запропонованої підсистеми наведено на рис. 4. Під час випробування розробки визначили можливість некоректної роботи одночасного функціонування мережевого модуля Ethernet Wiznet W5500 та запису даних на карту пам'яті. Некоректна робота виникає через SPI-конфлікт, тобто використання спільної шини SPI-протоколу в однакові такти часу [9-11]. Тому в загальному алгоритмі роботи передбачено перевірку помилок SD-карти і мережі з'єднання, що забезпечує функціонування апаратної платформи Arduino як web-сервера.

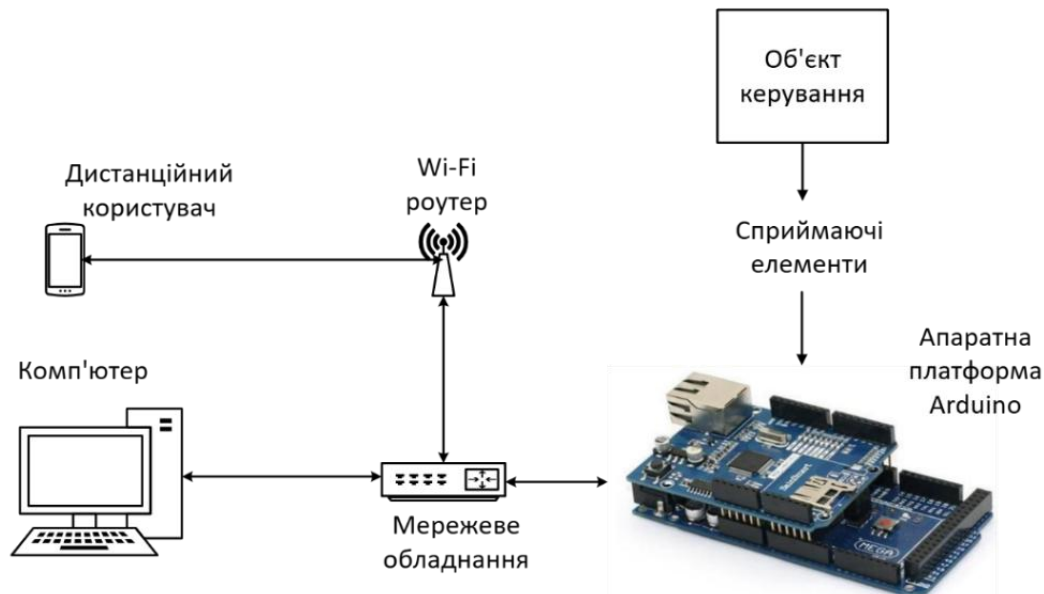


Рисунок 2 – Структурна схема підсистеми вимірювання технологічних параметрів



Рисунок 3 – Випробування підсистеми вимірювання (на прикладі температури)

У вказаному протоколі для означеної системи, що побудована на апаратній платформі Arduino, моделлю Mega 2560 спільно використовуються лінії зв'язку MOSI, MISO, SCK для мережевого модуля та блоку SD-карти. Для цього у окремі такти часу виконується керування лінією сигналів вибору пристрою CS-контакту. У кожен такт часу активним вказується тільки один із SPI-пристроїв, тому неможливо одночасне передавання даних по мережі та запису даних на карту пам'яті. Саме через уникнення конфлікту SPI, кожному пристрою призначається окремий CS-контакт, і в окремий такт часу активним є лише один пристрій. Перед початком роботи всі CS-контакти встановлюються в логічну одиницю, а після завершення обміну SPI-пристроїв обов'язково деактивується. Проте при керуванні тактами часу обміну даними слід чітко встановлювати частоту роботи спільної шини. Збільшення частоти SPI для досягнення більшої швидкодії призводить до спотворення сигналів даних або ж до зростання кількості помилок передачі.

У роботі не нехтуються можливі помилки запису даних на карту пам'яті. Окрім некоректності роботи протоколу SPI помилки запису даних можуть бути спричинені: несумісністю файлової системи, нестабільністю живлення та некоректного формування CSV-рядків, яке може призводити до зміщення колонок даних. При проєктуванні запропонованої підсистеми важливою характеристикою функціонування є точність вимірювання. Для оцінки точності вимірювання необхідно визначити похибки інформаційно-вимірювальних каналів (ІВК) [13, 15]. Розрахунок похибок ІВК виконано згідно з окремою методикою [13, 14].

Проведено оцінку роботи інформаційно-вимірювального каналу на прикладі температури.

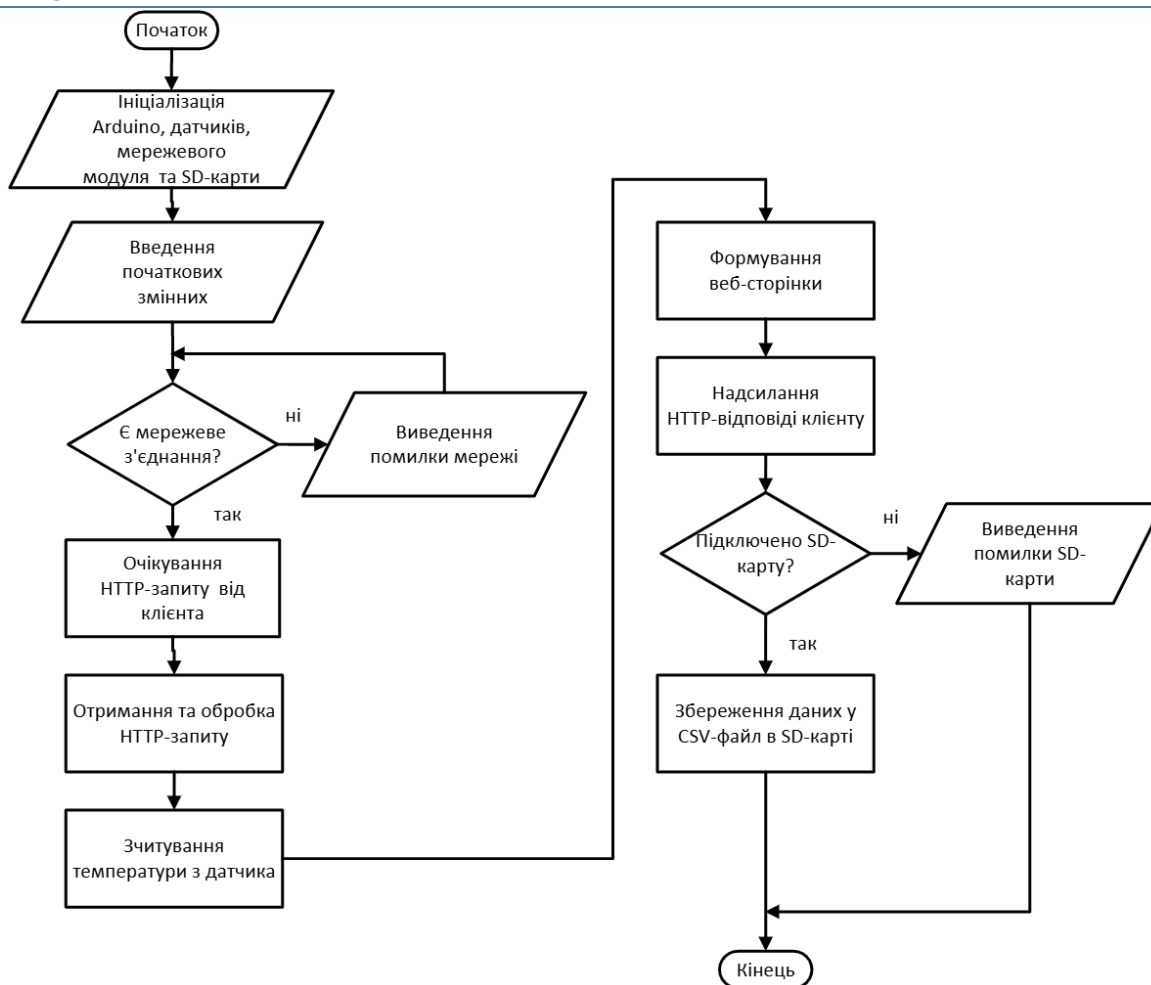


Рисунок 4 – Загальний алгоритм роботи підсистеми на базі web-сервера

Визначено допустиму абсолютну похибку давача інформації DS18B20 водонепроникного:

$$\Delta t_{\text{допд}} = \frac{K_{\text{ТД}} \cdot \text{ДВ}_\text{д}}{100} = \frac{0,1(85 - (-10))}{100} = 0,095 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

де  $\Delta t_{\text{допд}}$  – допустима абсолютна похибка давача інформації;  $K_{\text{ТД}}$  – точність давача інформації;  $\text{ДВ}_\text{д}$  – діапазон вимірювання за паспортними даними.

Для довірчої ймовірності  $P_\text{д} = 0,95$  визначено середньо-квадратичну похибку в абсолютних значеннях за виразом для кожного елемента системи вимірювання

$$\Delta_{0,95} = K_{\text{Н}(0,95)} \sigma, \quad (2)$$

де  $K_{\text{Н}(0,95)} = 1,96$  – коефіцієнт Стюдента під час проведення безперервної кількості вимірювань та довірчої ймовірності  $P_\text{д} = 0,95$ ;  $\sigma$  – середньо-квадратична похибка.

З виразу (2) визначено середньо-квадратичну похибку давача інформації  $\sigma_\text{д}$ :

$$\sigma_\text{д} = \frac{\Delta_{\text{допд}}}{K_{\text{Н}(0,95)}} = \frac{0,095}{1,96} = 0,048 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Визначено допустимі абсолютну та середньо-квадратичну похибки для ліній зв'язку (ЛЗ):

$$\Delta \theta_{\text{доплз}} = \frac{K_{\text{ТЛЗ}} \cdot t_{\text{вим}}}{100} = \frac{0,4 \cdot 42}{100} = 0,168 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

де  $\Delta t_{\text{ДОПЛЗ}}$  – допустима абсолютна похибка лінії зв'язку;  $K_{\text{ТЛЗ}}$  – точність передачі сигналу лінією зв'язку ( $K_{\text{ТЛЗ}} = 0,4$ );  $t_{\text{ВИМ}}$  – виміряна температура від давача інформації.

$$\sigma_{\text{ЛЗ}} = \frac{\Delta t_{\text{ДОПЛЗ}}}{K_{H(0,95)}} = \frac{0,168}{1,96} = 0,086 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

де  $\sigma_{\text{ЛЗ}}$  – середньо-квадратична похибка ЛЗ.

Допустима абсолютна та середньо-квадратична похибки аналогово-цифрового перетворювача (АЦП):

$$\Delta t_{\text{ДОПАЦП}} = \frac{K_{\text{ТАЦП}} \cdot t_{\text{ВИМ}}}{100} = \frac{0,25 \cdot 42}{100} = 0,105 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{АЦП}} = \frac{\Delta t_{\text{ДОПАЦП}}}{K_{H(0,95)}} = \frac{0,06}{1,96} = 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

де  $K_{\text{ТАЦП}}$  – точність передачі сигналу АЦП ( $K_{\text{ТАЦП}} = 0,25$ );  $\Delta t_{\text{ДОПАЦП}}$  – абсолютна допустима похибка АЦП;  $\sigma_{\text{АЦП}}$  – середньо-квадратична похибка АЦП.

Визначено допустимі абсолютну та середньо-квадратичну похибки для блока нормування (БН) мікропроцесорної плати апаратної платформи:

$$\Delta \theta_{\text{ДОПБН}} = \frac{K_{\text{ТБН}} \cdot t_{\text{ВИМ}}}{100} = \frac{0,2 \cdot 42}{100} = 0,084 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{БН}} = \frac{\Delta \theta_{\text{ДОПБН}}}{K_{H(0,95)}} = \frac{0,084}{1,96} = 0,043 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (9)$$

де  $K_{\text{ТБН}}$  – точність передачі сигналу блоком нормування ( $K_{\text{ТБН}} = 0,2$ );  $\Delta \theta_{\text{ДОПБН}}$  – абсолютна допустима похибка блока нормування;  $\sigma_{\text{БН}}$  – середньо-квадратична похибка блока нормування.

Розрахуємо середньо-квадратичну похибку інформаційно-вимірювального каналу температури [13-15]:

$$\sigma_{\text{ВКт}} = \sqrt{\sigma_{\text{Д}}^2 + \sigma_{\text{ЛЗ}}^2 + \sigma_{\text{АЦП}}^2 + \sigma_{\text{БН}}^2} = \sqrt{0,048^2 + 0,086^2 + 0,05^2 + 0,043^2} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

де  $\sigma_{\text{ВКт}}$  – середньо-квадратична похибка інформаційно-вимірювального каналу за температурою.

Визначено допустиму абсолютну похибку інформаційно-вимірювального каналу:

$$\Delta_{\text{ВКт}} = \pm K_{H(0,95)} \sigma_{\text{ВКт}} = \pm 1,96 \cdot 0,12 = 0,2353 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (11)$$

де  $\Delta_{\text{ВКт}}$  – абсолютна похибка інформаційно-вимірювального каналу температури.

Зведена похибка інформаційно-вимірювального каналу дорівнює:

$$\gamma_{\text{ВК}} = \pm \frac{\Delta_{\text{ВКт}}}{t_{\text{ВИМ}}} = \frac{0,2353}{42} = 0,0056 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (12)$$

За виконаною методикою можна визначити похибки інформаційно-вимірювального каналу для всіх інших технологічних параметрів вимірювання, враховуючи паспортні дані давачів інформації кожного параметру.

**Висновки і перспективи.** Запропоновано підсистему вимірювання технологічних параметрів виробництва біогазу на базі комплексу технічних засобів Arduino. У розробленій підсистемі використано технологію інтернет речей для можливості дистанційного виконання вимірювань та передбачено запис даних на карту пам'яті. Виконано випробування моделі

лабораторного стенду підсистеми у лабораторних умовах. Наведена розробка для вимірювання технологічних параметрів може бути використана під час модернізації існуючих систем керування. Визначено допустиму абсолютну похибку та зведену похибку інформаційно-вимірювального каналу за температурою.

### Список використаних джерел

1. Holub, H. A. (Ed.), Kukharets, S. M., Marus, O. A., Pavlenko, M. Yu., Sera, K. M., & Chuba, V. V. (2017). Bioenergy systems in agricultural production: A textbook [Bioenerhetychni systemy v ahrarnomu vyrobnytstvi: Navchalnyi posibnyk]. NUBiP Ukrainy.
2. Skliar, O. H., Skliar, R. V., Boltianskyi, B. V., Syrotiuk, S. V., Korobka, S. V., & Stukalets, I. H. (2024). Analysis of methods of improving the process of processing organic animal waste in methane tanks [Analiz metodiv udoskonalennia protsesu pererobky orhanichnykh vidkhodiv tvarynnytstva u metantenkakh]. Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University, 14(1). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-6>.
3. Skliar, O.H., Skliar, R.V., & Akulov, V.D. (2024). Ways to increase the energy efficiency of a biogas installation [Shliakhy pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti biohazovoi ustanovky]. Proceedings of the Tavria State agrotechnological university, 24(2), 27–36. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-3>.
4. Abdurrahman, A. H., Kirom, M. R., & Suhendi, A. (2020). Biogas production volume measurement and Internet of Things based monitoring system. In 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat) (pp. 213-217). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Comnetsat50391.2020.9328948>.
5. Lysenko, V., Lendiel, T., Bolbot, I., & Pavlov, S. (2023). Mobile system for monitoring plant environment parameters for biogas production. Machinery & Energetics, 14(4), 111–120. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2023.111>.
6. Motornyi, A., & Kabachii, V. (2025). Automation of Household Waste Processing Enterprises: World Experience and Prospects for Ukraine [Avtomatyzatsiia pidpriemstv pererobky pobutovykh vidkhodiv: Svitovyi dosvid ta perspektyvy dlia Ukrainy]. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, (4), 8–16. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-181-4-8-16>.
7. Zhou, M., & Zou, Z. (2018). Design of an intelligent control system for rural biogas engineering. In 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (pp. 1636-1639). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469547>.
8. Onu, P., Mbohwa, C., & Pradhan, A. (2023). Artificial intelligence-based IoT-enabled biogas production. In 2023 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCAD57653.2023.10152349>.
9. Tohoiev, O. R., Puzyrov, S. V., Havrylko, S. M., & Zhulanov, M. O. (2025). Software and hardware complex for organizing voice communication in decentralized mesh networks [Prohramno-aparatnyi kompleks dlia orhanizatsii holosovoho zviazku v detsentralizovanykh mesh-merezhakh]. Methods and Devices of Quality Control, (2)(55), 121–129. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2\(55\)-121-129](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2(55)-121-129).
10. Vozár, M., & Ludas, N. (2025). Application of Arduino microcomputer. In 15th International Scientific Conference on Distance Learning in Applied Informatics: DiVAI 2024 (p. 271). Springer Nature.
11. Rani, D., Kaur, A., Mittal, R., Kaur, A., & Garg, N. (2025). Exploring Arduino board applications in embedded systems: The role of AI, cloud computing, and edge computing. In 2025 3rd International Conference on Communication, Security, and Artificial Intelligence (ICCSAI) (pp. 1730–1734). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSAI64074.2025.11063918>.
12. Raju, S. S., Wu, S., & Wang, N. (2025). Design and implementation of a multi-protocol converter supporting SPI, I2C, and UART interfaces. In 2025 8th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP) (pp. 677–681). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICSP66564.2025.11338395>.

13. Tsiutsiura, V. D., & Tsiutsiura, S. V. (2003). Metrology and fundamentals of measurements: A textbook [Metrolohiia ta osnovy vymiriuvan: Navchalnyi posibnyk]. Znannia-Pres.
14. Lysenko, V. P., Bolbot, I. M., Lendiel, T. I., & Chernov, I. I. (2014). Prohramno-aparatne zabezpechennia systemy fitomonitorynhu v teplytsi [Hardware and software support of the phytomonitoring system in a greenhouse]. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, (154), 42–45.
15. Palamar, M. I., Strembitskyi, M. O., & Palamar, A. M. (2019). Design of computerized measurement systems and complexes: A textbook [Proektuvannia kompiuteryzovanykh vymiriuvalnykh system i kompleksiv: Navchalnyi posibnyk]. TNTU.

### **Lendiel Taras**

*Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko,*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6356-1230>

E-mail: [taraslendel@gmail.com](mailto:taraslendel@gmail.com)

### **Yevtushenko Maksym**

*Postgraduate student, Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8852-0884>

E-mail: [maks202evtyshenko@gmail.com](mailto:maks202evtyshenko@gmail.com)

### **Safina Olga**

*Head of the cyclical commission for automation of technological processes and environmental monitoring, specialist of the highest category, teacher-methodologist, VSP "Kyiv Professional College of Urban Economy of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University"*

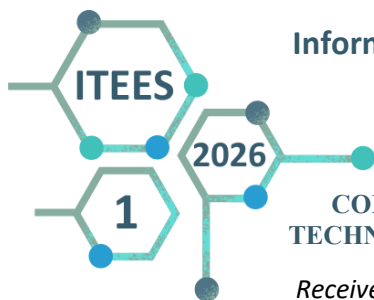
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4063-5501>

E-mail: [safina.olha@tnu.edu.ua](mailto:safina.olha@tnu.edu.ua)

## **SOFTWARE AND HARDWARE OF THE SUBSYSTEM FOR MEASURING TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS USING THE INTERNET OF THINGS**

**Abstract.** The article considers the issue of building a model of a subsystem for measuring technological parameters of the biogas production process. The specified measurement subsystem will collect data on the fermentation process of biomaterials (organic raw materials) for an intelligent control system for the technological process of biogas production. In this case, the type of organic raw materials used will be indicated in the data collection process. This is necessary for forming a control action in the algorithm of the functioning of the automated biogas production control system. The features of anaerobic biomass fermentation are analyzed and the main technological parameters are indicated from the analysis of literary sources. This affects the efficiency of the biogas production process. A model of the measurement subsystem is proposed, which is considered as a technical tool for measuring parameters of the fermentation process of organic raw materials, while the specified approach is implemented using Internet of Things technologies. The structure of the hardware of the measurement subsystem is developed and calculations of measurement errors of the information and measurement channel are given. The implementation of the Internet of Things technology is presented on the basis of the created web server, which operates on the principle of a client-server system using HTTP requests. The developed model of the subsystem for measuring technological parameters provides for measurements in the real-time system, and all measurement data will be stored in a separate file to non-volatile memory, namely to a micro-SD memory card. The measured data file will be stored in CSV format, which will allow data to be processed via cloud services or the Microsoft Office Excel application package. The specified approach will also allow data systematization and the possibility of prompt adjustment, if necessary, of the technological process. The functionality of the proposed model of the subsystem for measuring technological parameters can be increased by improving software and hardware.

**Keywords:** Biogas, Anaerobic Digestion, Measurement Subsystem, Bioreactor, Internet of Things.



### Опришко Олексій Олександрович

доцент, кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-3566>

E-mail: [ozon.kiev@nubip.edu.ua](mailto:ozon.kiev@nubip.edu.ua)

### Племянник Валерія Русланівна

студент освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» ОС «Магістр»,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: [akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua](mailto:akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua)

## РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКОГО ПРИМІЩЕННЯ МИТНОГО ТЕРМІНАЛУ

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності функціонування митних терміналів України в умовах постпандемічних викликів, зокрема забезпечення належних параметрів мікроклімату складських приміщень. Обґрунтовано необхідність впровадження систем автоматичного керування для підтримання температури, вологості та якості повітря з метою збереження товарів і забезпечення безпечних умов праці персоналу. Проведено аналіз сучасних підходів до автоматизації систем вентиляції та кондиціонування, визначено їхні обмеження щодо застосування в специфічних умовах митних об'єктів. Розроблено функціональну схему автоматизації припливно-витяжної вентиляційної системи з рекуперацією тепла та створено математичну модель температурного режиму будівлі митного терміналу на основі рівнянь теплового балансу. На базі імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink синтезовано цифрову систему керування з ПІ-регулятором та визначено її параметри. Дослідження показали, що запропонована система забезпечує стійке та точне регулювання без перерегулювання і статичної похибки, а також ефективно підтримує якість повітря. Підтверджено асимптотичну стійкість системи за критерієм Джурі та доведено її практичну доцільність. Запропоновано комплексне технічне рішення на базі сучасного програмованого логічного контролера (ПЛК110), що забезпечує високу дискретність обробки сигналів та надійність у промислових умовах. Практична значущість роботи підкреслюється розробкою людино-машинного інтерфейсу (HMI) для дистанційного моніторингу, що забезпечує прозорість логістичних процесів та можливість оперативного втручання персоналу. Результати моделювання та техніко-економічні розрахунки доводять, що впровадження запропонованої системи дозволяє знизити енерговитрати на підтримку мікроклімату на 15-20% при одночасному підвищенні точності стабілізації параметрів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації митної інфраструктури та впровадження цифрових систем моніторингу і керування мікрокліматом у складських приміщеннях.

**Ключові слова:** автоматизація, мікроклімат, митний термінал, програмований логічний контролер, алгоритм керування, CoDeSys, енергоефективність, моніторинг.

**Актуальність.** Пандемія вірусу COVID-19 та її наслідки суттєво вплинули на економіку та всі складові державної політики України. Найбільших випробувань та трансформацій зазнала митна справа. Питанням розвитку митної політики та забезпечення митної безпеки України в екстремальних умовах займалися такі вітчизняні дослідники, як Осіпчук Д. С., Підгорний О. Ю. та інші, які у своїх працях досліджували механізми адаптації митних органів до кризових ситуацій, адміністрування митних платежів та забезпечення безперебійного

функціонування логістичних ланцюгів в умовах глобальних викликів [1]. Поява цих викликів зумовила виникнення гострої потреби у забезпеченні суворого контролю за умовами зберігання вантажів на митних терміналах.

Поява пандемії зумовила виникнення таких проблем у внутрішньому стані митної політики України:

- зменшення прибутковості бізнесу через закриття деяких митних постів та введення карантинних обмежень;
- посилення вимог для юридичних та фізичних осіб при проходженні митного контролю і ускладнення його;
- неготовність митної служби перейти у дистанційний режим обслуговування громадян;
- відсутність належного фінансового забезпечення, яке б дозволило швидко переорієнтуватись митниці, відповідно до погіршення економічного стану в країні;
- збільшення скарг учасників митного процесу на діяльність митної системи;
- зростання випадків контрабанди та корупції в органах митної служби;
- недостатній рівень інформування населення та власників підприємств про правила проведення митного процесу у період карантину;
- погана обізнаність працівників митниці щодо виконання посадових обов'язків у період пандемії;
- повільний етап проведення вакцинації серед працівників митниці;
- низький рівень епідеміологічного захисту працівників митниці, що призвів до захворюваності вірусної інфекцією серед них.

У цей період виникла гостра потреба у забезпеченні суворого контролю за умовами зберігання вантажів на митних терміналах. Ефективне функціонування таких об'єктів неможливе без впровадження високоточних систем автоматичного керування (САК) мікрокліматом. Недотримання параметрів температури та вологості повітря у складських приміщеннях призводить до значних економічних збитків через псування товарів, що перебувають під митним контролем.

Використання мікропроцесорних засобів автоматизації, зокрема програмованих логічних контролерів (ПЛК), дозволяє не лише стабілізувати ці параметри, а й забезпечити віддалений моніторинг у реальному часі. Це є критично важливим для забезпечення прозорості та безпеки митних операцій у післяпандемічний період. Таким чином, розроблення надійної цифрової САК мікрокліматом складського приміщення митного терміналу є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на модернізацію транспортно-логістичної інфраструктури України.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблематика автоматизації систем забезпечення мікроклімату (HVAC) та вибору алгоритмів керування широко висвітлена в сучасній науковій літературі. Дослідження методів математичного моделювання температурних режимів та оптимізації мікроклімату проводили Зубенко В.О. та Березюк І.А. [2], які довели, що для усунення дефіциту або надлишку тепла необхідно враховувати теплову інерційність конструкцій та масу повітря. Питання забезпечення інваріантності систем автоматичного керування до зовнішніх збурень розглядалися у працях Збруцького О.В. та Осокіна В. С. [3], які довели, що використання інтегральної складової у структурі регулятора (зокрема, ПІ- чи ПІД-закону) дозволяє компенсувати накопичену похибку та гарантувати задану точність системи навіть за умов тривалих випадкових збурень.

Надійність архітектур на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) для систем моніторингу та регулювання мікроклімату підтверджена результатами досліджень Братішка В.В. та Граняка В.Ф. [4], які довели високу ефективність та завадостійкість застосування ПЛК для безперебійної реєстрації температурних параметрів в умовах промислової експлуатації. Водночас, хоча для складних об'єктів часто пропонуються нейромережеві системи керування, їх впровадження стримується високою обчислювальною

складністю та потребою в специфічному обладнанні, що робить класичні цифрові ПІ-регулятори більш доцільними та надійними для стандартної автоматизації. Окремим важливим напрямом є дослідження Макаренко Л. та Приймака О. [5], які обґрунтували необхідність забезпечення оптимальної кратності повітрообміну та моніторингу якості повітря (зокрема за рівнем CO<sub>2</sub>) для зниження ризику передачі інфекцій та дотримання жорстких санітарно-гігієнічних вимог ВООЗ у закритих приміщеннях.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених автоматизації систем HVAC, питання розробки цифрових алгоритмів керування мікрокліматом, адаптованих до специфічних умов роботи сучасних митних терміналів, залишається недостатньо вивченим. Більшість існуючих рішень не враховують необхідність комплексного підходу, який би одночасно забезпечував жорсткі температурні режими для збереження різнотипних вантажів та епідеміологічний захист персоналу шляхом моніторингу концентрації вуглекислого газу.

**Метою дослідження** є розробка системи автоматичного керування параметрами мікроклімату на митному терміналі для забезпечення оптимального температурно-вологісного режиму роботи митного персоналу, запобігання потраплянню іноземних вірусів і хвороб у країну, покращення умов зберігання митних товарів, із операторським інтерфейсом системи контролю та керування.

Задачі досліджень:

- дослідження особливостей формування мікрокліматичного режиму на території митних терміналів, принципів побудови припливно-витяжних систем вентиляції із рекуперацією тепла в таких приміщеннях;
- розробка функціональної схеми системи керування припливно-витяжною вентиляційною системою митного терміналу і алгоритму її роботи;
- розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням пакету імітаційного моделювання MatLAB;
- обґрунтування вибору алгоритму керування, комплексу технічних засобів автоматизації, визначення показників якості роботи системи керування;
- розробка схем системи автоматизації та системи дистанційного керування та контролю із операторським інтерфейсом.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження ґрунтуються на основних положеннях тепломасообміну, математичного моделювання, теорії автоматичного керування з використанням комп'ютерних технологій.

Для реалізації алгоритмів керування та візуалізації технологічних процесів використано методи програмування логічних контролерів у середовищі CoDeSys. Процес проектування включав конфігурування апаратної частини, розробку логічної структури керування та налаштування протоколів обміну даними для забезпечення віддаленого моніторингу параметрів мікроклімату.

*Опис об'єкту автоматизації*

Об'єктом дослідження є процес керування параметрами мікроклімату в приміщеннях митних терміналів. Митний термінал (англ. customs terminal) – це комплекс адміністративних складських приміщень, призначених для проведення в повному обсязі процедур митного контролю та оформлення вантажів, які переміщуються експрес-перевізниками й знаходяться під митним контролем [6]. Цей спеціалізований об'єкт логістичної інфраструктури використовується для проведення митних процедур під час здійснення зовнішньоекономічної діяльності, зокрема митного оформлення вантажів, які перетинають митний кордон. Митний термінал представляє собою комплекс приміщень різного призначення: зберігання митних товарів, приміщень карантинної зони, чистого приміщення для зберігання медичних і ветеринарних препаратів, а також вентиляційної камери, де знаходиться вентиляційна система з функціями подвійної фільтрації, рекуперації, охолодження, нагріву та зволоження повітря.

До складу митних терміналів можуть входити такі приміщення, як митний склад – це митний режим, відповідно до якого іноземні або українські товари зберігають під митним контролем за певних умов, які визначені Митним кодексом України. На території сучасних митних терміналів і складів повинні підтримуватися контрольовані умови мікроклімату з метою зберігання різних видів товарів відповідно до їх фізико-хімічного складу. Температура повітря у приміщеннях митних терміналів, де зберігаються різні види товарів, повинна складати близько  $+18...+22^{\circ}\text{C}$ , в спеціальних холодних зонах – до  $+4^{\circ}\text{C}$  [7].

Мікроклімат митного терміналу – це не просто температура та вологість, а й сукупність факторів, які визначають комфорт та умови роботи у приміщеннях, де проводиться митний контроль. Завданням системи автоматизації є контроль температури, відносної вологості та концентрації вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  у приміщеннях митного терміналу в заданих межах, а також керування вентиляційною системою та відображення параметрів її роботи.

На даний час використовуються різноманітні рішення для забезпечення параметрів мікроклімату промислових приміщень, до складу яких входять і митні термінали, але найбільшої ефективності набули припливно-витяжні системи вентиляції з рекуперацією тепла ПВСВР (рис. 1). Найбільш поширеними серед названих систем є системи повітрообміну із роторними та пластинчастими рекуператорами, а також із проміжними рекуператорами (run-around coil system) [8].

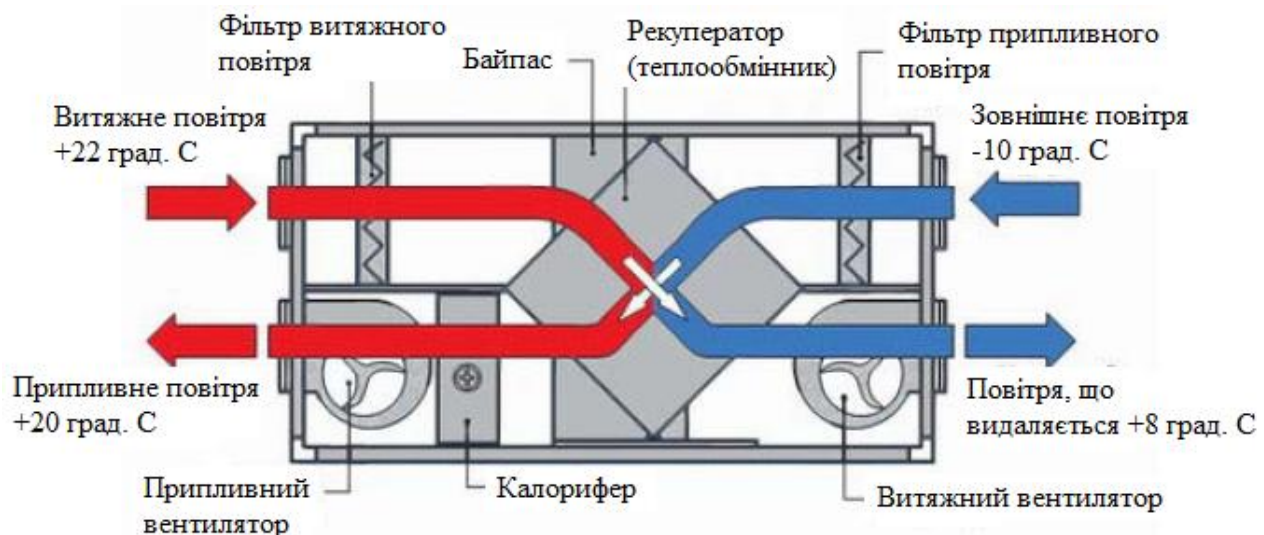


Рисунок 1 – Узагальнена схема припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією тепла

Для реалізації зазначених процесів підготовки повітря розроблено функціональну схему автоматизації припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуператором (рис. 2). Основний контроль температури здійснюється у трьох позиціях:

- температура зовнішнього припливного повітря вимірюється датчиком ТЕ (1-1);
- температура підготовленого вентиляційного повітря – датчиком ТЕ (1-2);
- температура повітря безпосередньо у приміщенні терміналу – датчиком ТЕ (1-3).

Для моніторингу додаткових параметрів встановлені датчики температури теплоносія та датчик концентрації вуглекислого газу QE (1-4). Керування електродвигунами приводу відцентрових вентиляторів М1 (приплив) та М2 (витяжка) здійснюється за допомогою частотних перетворювачів, а регулювання роботи водяного нагрівача та охолоджувача виконується змішувальними вузлами з сервоприводами.

#### Математична модель температурного режиму

Для розробки системи керування складемо статичну модель технологічного об'єкта за каналом керування температурним режимом. Для цього представимо об'єкт у вигляді двох

ланок, які акумулюють енергію: це ланка підігрівачої води і ланка повітря в опалюваних приміщеннях (рис. 3).

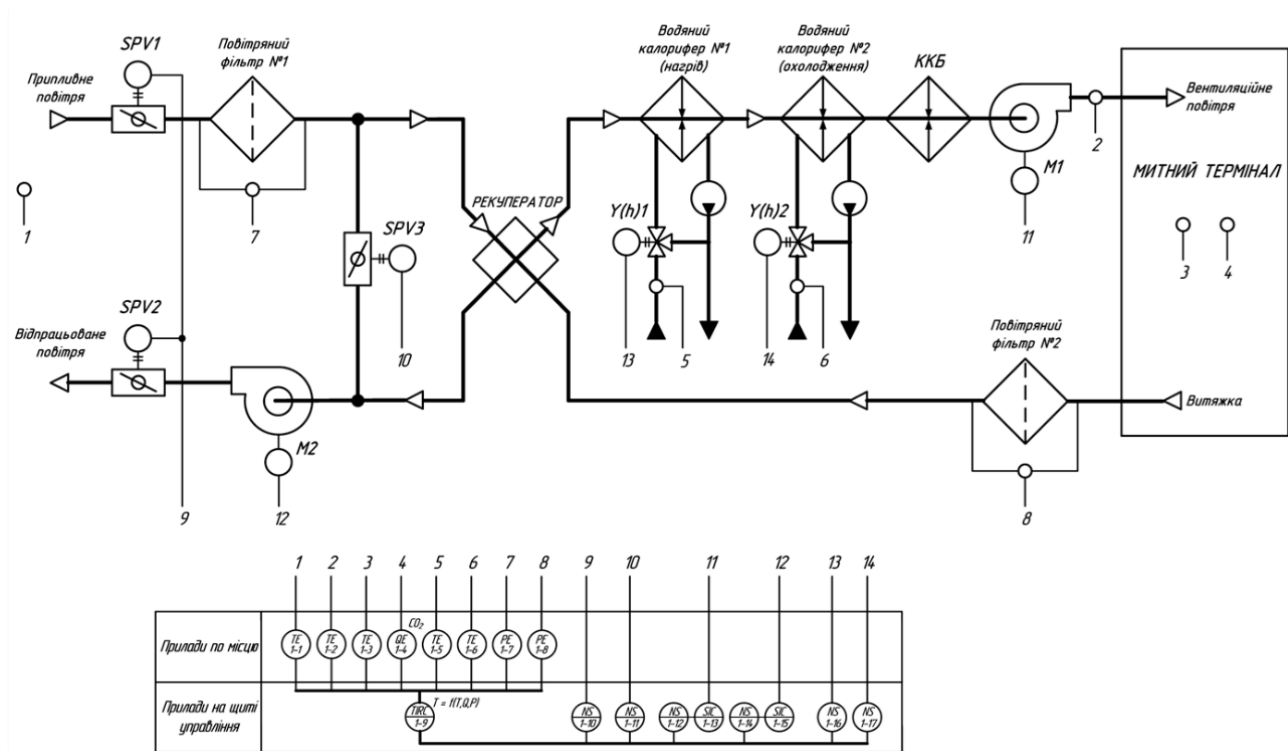


Рисунок 2 – Функціональна схема автоматизації припливно-витяжної вентиляційної установки із рекуператором для приміщень митного терміналу

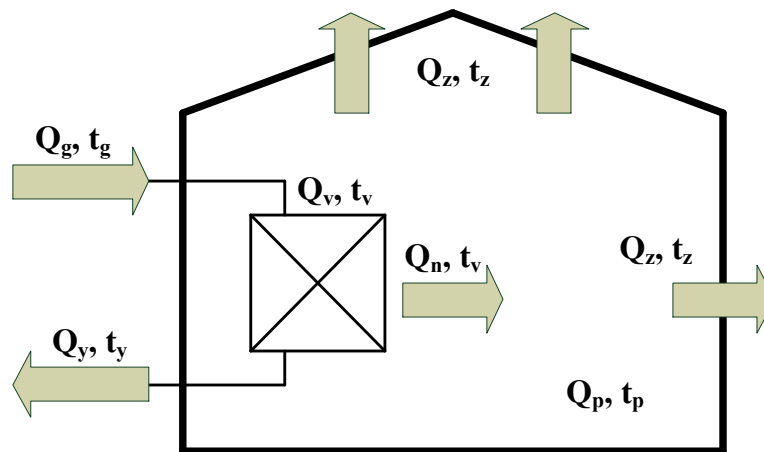


Рисунок 3 – Схема теплових потоків у будівлі митного терміналу

Для подальших розрахунків приймаємо, що температура повітря в будівлі  $t_p$  однакова для всього об'єму, а температура води в радіаторах системи та трубах  $t_v$  має середньоарифметичне значення між вхідною температурою гарячої води  $t_g$  і температурою води на виході з будівлі  $t_y$ . В статичному режимі кількість тепла, що знаходиться у воді  $Q_v$ , і тепла, що знаходиться у повітрі будівлі  $Q_p$ , лишається незмінним, тому можемо записати два рівняння теплових балансів:

для води:  $Q_g - Q_y - Q_n = 0$ ,

для повітря будівлі:  $Q_n - Q_z$ ,

(1)

де  $Q_g$  – кількість тепла, що надійшло з водою;  $Q_y$  – тепло, виведене з водою;  $Q_n$  – тепло, що перейшло до повітря;  $Q_z$  – тепло, втрачене в навколишній простір [9].

Від статичної моделі перейдемо до динамічної. Враховуючи рівняння статики, отримаємо систему диференціальних рівнянь зміни кількості тепла в часі у воді і повітрі будівлі. Після відповідних математичних спрощень приведемо рівняння до вигляду Коші:

$$\frac{dt_v}{dt} = \frac{C_g \cdot G_g \cdot \rho_g \cdot t_g - C_y \cdot G_y \cdot \rho_y \cdot (2 \cdot t_v - t_g) - \alpha_p \cdot F_t \cdot (t_v - t_p)}{C_v \cdot V_v \cdot \rho_v}$$

$$\frac{dt_p}{dt} = \frac{\alpha_p \cdot F_t \cdot (t_v - t_p) - k_z \cdot F_c \cdot (t_p - t_z) \cdot \eta_0}{C_p \cdot V_p \cdot \rho_p}$$

(2)

де  $C_v$  – питома теплоємність води;  $G_n$  – продуктивність насоса;  $\rho_v$  – густина води;  $t_v$  – температура води;  $V_v$  – об'єм води в системі;  $C_p$  – питома теплоємність повітря;  $\rho_p$  – густина повітря;  $t_p$  – температура повітря;  $V_p$  – об'єм будівлі;  $k_z$  – коефіцієнт теплопередачі;  $F$  – площа поверхні;  $\alpha_p$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря будівлі до огорожуючих конструкцій;  $\eta_0$  – коефіцієнт огороження будівлі.

У пакеті імітаційного моделювання MATLAB Simulink синтезована імітаційна математична модель динаміки зміни температури повітря в будівлі та температури теплоносія (рис. 4). В результаті дослідження динаміки процесу на розробленій імітаційній моделі була отримана розгінна характеристика будівлі по каналу регулювання температури повітря (рис. 5).

Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за кривою розгону, представляється у вигляді інерційної ланки із запізненням. Значення постійної часу та часу чистого запізнення, визначені з нормованої розгінної характеристика будівлі, складають  $T_{0y} = 2000$  с,  $\tau_{0y} = 100$  с. Відповідно, передатна функція будівлі для каналу "потужність нагрівача  $\rightarrow$  температура повітря" має вигляд:

$$W_{0y}(s) = \frac{0,27e^{-100 \cdot s}}{2000s + 1}$$

#### Синтез і дослідження цифрового ПІ-регулятора

Задача вибору раціонального періоду квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації цифрової системи керування. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування  $T_k$ , який задовольнив би суперечливі вимоги. Згідно з теоремою Котельникова, для безпомилкового відтворення сигналу мінімальна частота квантування повинна дорівнювати  $2w_c$ , де  $w_c$  – найвища частота вихідного сигналу, що зустрічається в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи. Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $w_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом [9]:

$$T_k = \pi w_c.$$

Визначення передатної функції неперервної частини розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p) = \frac{K_6 K_0}{T_{\text{эм}} T_{\text{оу}} p^2 + (T_{\text{е}} + T_{\text{о}}) p + 1} = \frac{0,27 e^{-100p}}{1280 p^2 + 2001 p + 1} \quad (3)$$

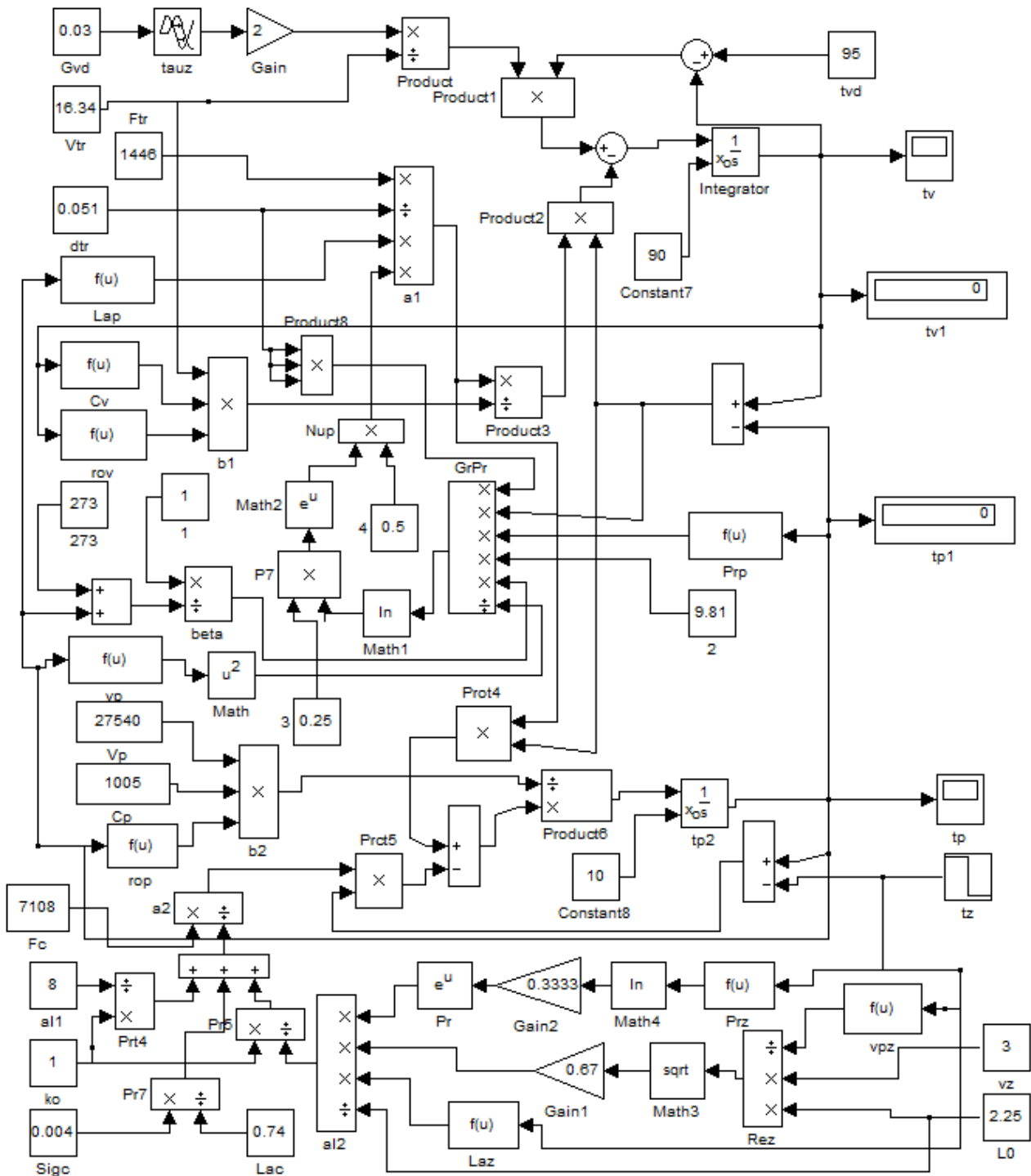


Рисунок 4 – Блок-схема імітаційної моделі енерговитрат у системи опалення будівлі з використанням пакету MATLAB Simulink

Визначаємо передатну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}^{\text{н.ч.}}(p) = \frac{W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p)}{1 + W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p)} = \frac{0,27 e^{-100p}}{(1280 + 2001 p + 1) + 0,27 e^{-100p}} \quad (4)$$

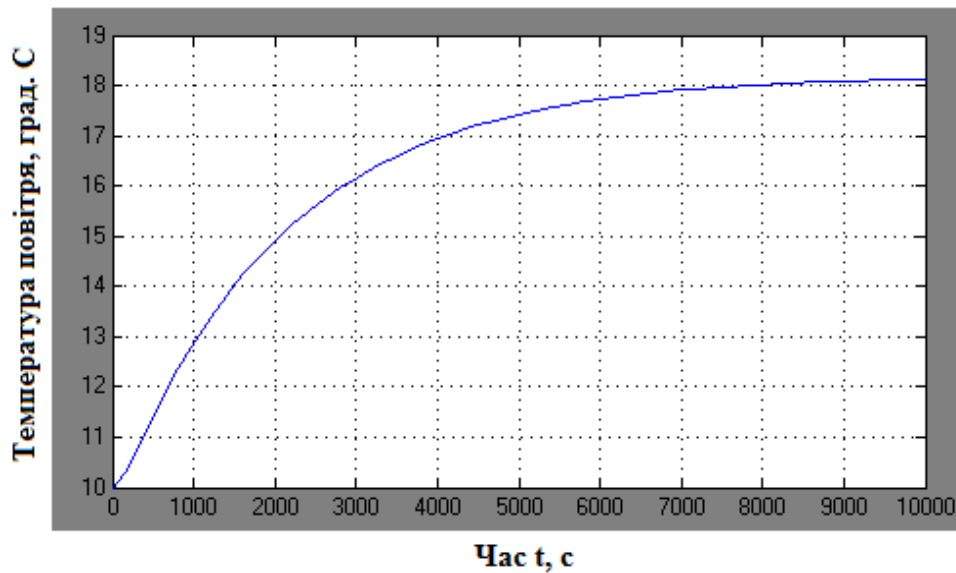


Рисунок 5 – Розгінна характеристика будівлі для каналу регулювання температури повітря

Визначення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам}}(j\omega) = \frac{0,27e^{-100j\omega}}{(1280j\omega^2 + 2001j\omega + 1) + 0,27e^{-100j\omega}} \quad (5)$$

У результаті розв'язання рівняння

$$A(\omega) = \frac{K_B K_0}{\sqrt{(-T_B T_0 \omega^2 + 1 + K_B K_0)^2 + (T_B T_0)^2 \omega^2}} = 0.01.$$

Отримаємо значення частоти за рис. 6:  $\omega_c = 0.013$ .

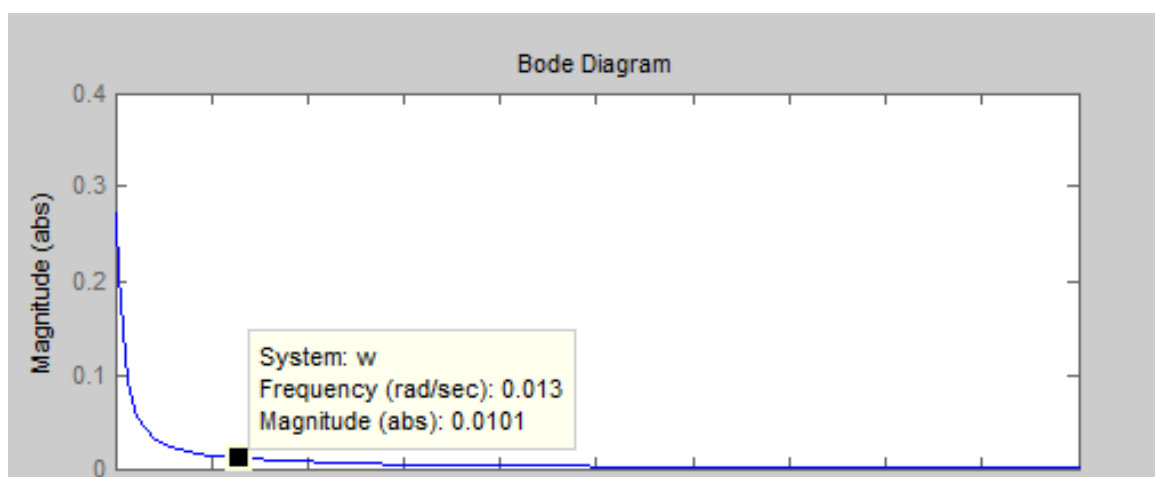


Рисунок 6 – АФЧХ системи керування

Значення часу квантування:

$$T_k = \frac{\pi}{\omega_c} = 241 \text{ с.} \quad (6)$$

Аналогічно неперервним системам, закон ПІ-регулювання може бути реалізований у цифрових системах. Для визначення передатної функції дискретної системи застосовується пакет програм MATLAB із використанням операцій задання передатної функції неперервної системи та Z-перетворення неперервної передатної функції на дискретну

$$wz = c 2d(w, T),$$

де  $w$  – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції;  $T$  – крок квантування [10].

Тоді

$$K_i := \frac{0.008}{\left(\frac{0.0208 \cdot 1 + 0.009133 - 0.000000000000000000507}{1^3 - 0.8903 \cdot 1^2 + 0.0000000000000000009885 \cdot 1 + 0}\right)} = 0.$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z-перетворення неперервної частини системи.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(z) = \frac{K_i \cdot Tz + 1}{2(z - 1)} = \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}.$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

$$\frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T + 2 \cdot K_p} = 0.0001974,$$

відповідно

$$K_p = 8.031.$$

Для дослідження показників якості роботи системи використовуємо модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink (рис. 7).

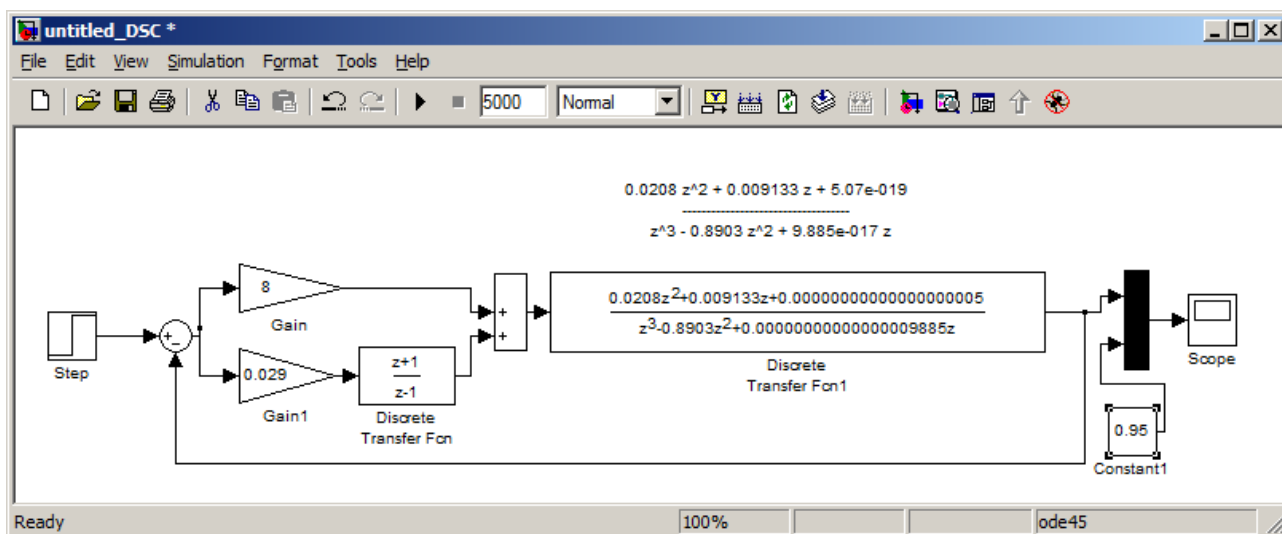


Рисунок 7 – Структурна модель цифрової системи

*Дослідження цифрової системи на стійкість та якість*

Використовуючи розімкнуту передаточну функцію цифрової системи  $W_{роз}(z)$ , знайдемо  $W_{зам}(z)$ , розв'яжемо рівняння та знайдемо характеристичні корені [11]:

$$W_{зам}(z) = \frac{\frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.8903z^2 - 9.885z \cdot 10^{-17}}}{\frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.8903z^2 - 9.885z \cdot 10^{-17}} + 1} =$$

$$= \frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.9106z^2 - 9.8835z + 5.07 \cdot 10^{-19}}$$

$$W_{пер}(z)W_{зам} = \frac{22.989 \cdot z - 2}{2z - 2} * \frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.9106z^2 - 9.8835z + 5.07 \cdot 10^{-19}}$$

$$W(z) = \frac{-0.082117242 \cdot z - 0.034519123 \cdot z^2 + 0.62254212 \cdot z^3 - 4.568577e - 18}{19.767 \cdot z - 17.965 \cdot z^2 - 3.802 \cdot z^3 + 2 \cdot z^4 - 1.014e - 18}$$

**Результати дослідження.** Розроблена математична модель теплової динаміки будівлі митного терміналу була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink і використана для синтезу та аналізу цифрової системи ПІ-регулювання. Перехідні характеристики системи із замкнутим контуром, оснащеної розробленим цифровим ПІ-регулятором, наведено на рис. 8. Сигнал на виході представлено в нормованому вигляді, що дозволяє безпосередньо оцінити якість регулювання незалежно від фізичних одиниць вимірювання. Результати моделювання показують, що система керування забезпечує стабільну та добре загасаючу поведінку.

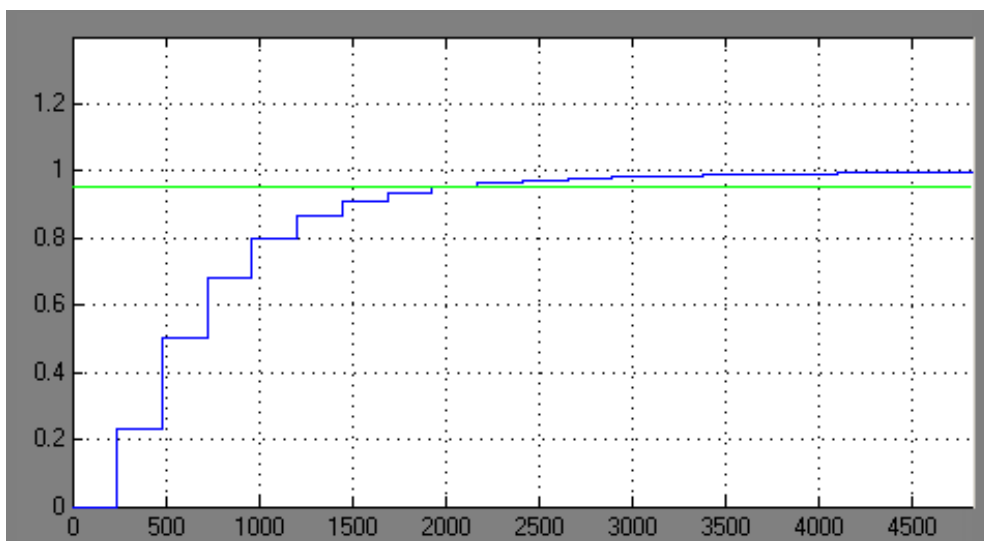


Рисунок 8 – Перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором

Система досягає стаціонарного значення без перевищення та коливань. Час встановлення ( $t_p$ ) системи становить приблизно 1970 с, при цьому перевищення дорівнює  $\sigma = 0$ , а індекс коливань  $n = 0$ . Крім того, похибка в стаціонарному режимі дорівнює  $\delta = 0\%$ , що підтверджує повне компенсування статичної похибки інтегральною складовою ПІ-регулятора та високу точність регулювання температури.

Аналіз стійкості на основі критерію Джурі підтвердив, що всі корені характеристичного рівняння лежать всередині одиничного кола на комплексній площині, що доводить

асимптотичну стійкість цифрової системи керування. У результаті було отримано таке характеристичне рівняння:

$$19.767 \cdot z + -17.965 \cdot z^2 + -3.802 \cdot z^3 + 2 \cdot z^4 - 1.014e - 18 = 0.$$

Домінуючі комплексні корені були отримані як

$$z_{1,2} = 0,7464 \pm j0,0237,$$

тоді як третій корінь дорівнює

$$z_3 = 0.$$

Умови стійкості за критерієм Джурі:

$|zk| < 1$  – для дійсних коренів;

$Re^2(zk) + Im^2(zk) < 1$  – для комплексних коренів.

Корені характеристичного рівняння на комплексній площині представлені на рис. 9.

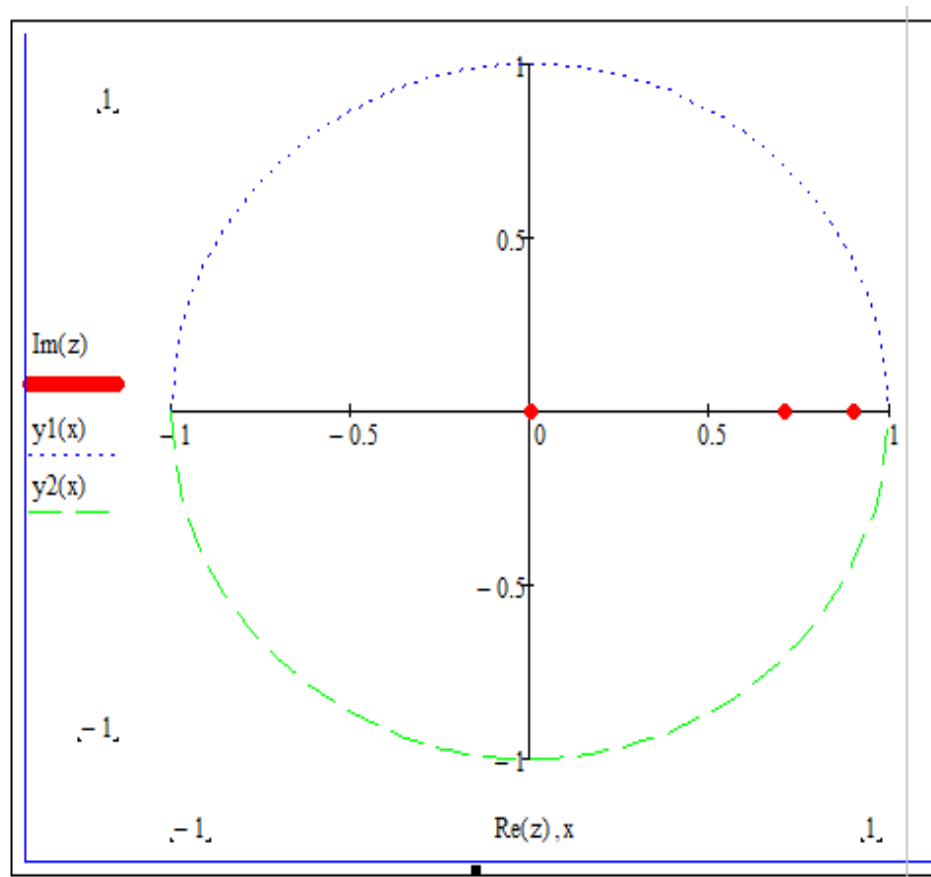


Рисунок 9 – Корені характеристичного рівняння на комплексній площині

Крім того, результати моделювання показують, що запропонована система управління дозволяє підтримувати параметри повітря в приміщенні в межах необхідних робочих меж, зокрема забезпечує ефективне регулювання температури та сприяє зниженню концентрації CO<sub>2</sub> до рівня нижче 700 ppm, що суттєво сприяє поліпшенню якості повітря в приміщенні та зменшенню ризику передачі інфекцій повітряно-крапельним шляхом у приміщеннях митних терміналів.

**Висновки і перспективи.** У результаті проведеного дослідження розроблено систему автоматичного керування параметрами мікроклімату складських приміщень митного

терміналу з використанням комплексу технічних засобів на базі контролера ОВЕН ПЛК110. На основі системного аналізу розроблено функціональну схему автоматизації припливно-втяжної вентиляційної установки з рекуператором, яка забезпечує контроль температури, вологості та рівня вуглекислого газу.

Для визначення динамічних властивостей приміщення терміналу, на основі рівнянь теплового балансу, розроблено математичну та імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Отримано передатну функцію об'єкта за каналом керування температурою повітря.

Синтезована цифрова система керування температурою з ПІ-регулятором забезпечує стабільну роботу та високі показники якості перехідного процесу: час регулювання складає  $t_p = 1970$  с, статична похибка  $\delta = 0$ , перерегулювання відсутнє, коливальність  $n = 0$ . Аналіз за критерієм Джурі підтвердив абсолютну стійкість розробленої цифрової системи. Економічні розрахунки показали, що термін окупності впровадження такої системи складе 1,3 року, що підтверджує доцільність її використання у виробництві.

Оскільки розроблена математична модель базується на спрощених рівняннях теплового балансу, подальші дослідження будуть спрямовані на розширення моделі шляхом врахування нелінійних збурень, таких як змінні витрати повітря, вплив сонячної радіації та динамічні зміни теплових навантажень від персоналу і техніки. Крім того, перспективним напрямом є проведення експериментальної валідації розробленої системи керування на реальному об'єкті митного терміналу для підтвердження результатів імітаційного моделювання в умовах реальної промислової експлуатації.

### References

1. Osipchuk, I. (2021). Osoblyvosti lohistychnykh operatsii na mytnykh terminalakh [Features of logistics operations at customs terminals]. *Economics, Management and Administration*. [https://doi.org/10.26642/ema-2024-4\(110\)-12-17](https://doi.org/10.26642/ema-2024-4(110)-12-17).
2. Zubenko, D. & Bereziuk, O. (2021). Doslidzhennia metodiv matematychnoho modeliuvannia temperaturnykh rezhymiv prymishchen [Optimization of the greenhouse microclimate parameters control process using mathematical modeling]. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/28/>.
3. Zbrutskyi, O., Osokin V. (2024). Optyimizatsiia invariantnoi do zburen systemy avtomatychnoho keruvannia [Optimization of a disturbance-invariant automatic control system]. *Mechanics of gyroscopic systems*, 48, 28–35. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317876>.
4. Hraniak V. Bratishko V. (2024). Metodyka proektuvannia temperaturnoho reiestratora tvarynnytskykh prymishchen na bazi prohramovanoho lohichnoho kompleksu ADC10 [Methodology for designing a temperature recorder for livestock facilities based on the ADC10 programmable logic controller]. *Vibrations in engineering and technology*, 3(114), 127-135. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-15>.
5. Makarenko, L., & Priymak, O. (2024). Kratnist povitroobminu yak zasib zabezpechennia vymoh do chystoty povitria na osnovi vysokoeffektyvnykh filtriv [Air exchange rate as a means of ensure requirements to air purity on the basis of high-efficiency filters]. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 46, 18–27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.18-27>.
6. Verkhovna Rada Ukrainy. (2012). Mytnyi kodeks Ukrainy [Customs Code of Ukraine]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17>.
7. Minrehion Ukrainy. (2013). DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiiuvannia [Heating, ventilation, and air conditioning]. Kyiv.
8. Hulai, B., Kuz, O., & Bundzylo, V. (2025). Analiz efektyvnosti detsentralizovanykh system ventyliatsii z rekuperatsiieiu teploty [Analysis of the effectiveness of decentralized ventilation systems with heat recovery]. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 51, 34–45. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.51.34-45>.

9. Parkhomei, I., Pasko, V., Polshakova, O., & Stenin, O. (2020). *Teoriia tsyfrovoykh system upravlinnia* [Theory of Digital Control Systems]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
10. Tolochko, O. (2024). *Modeliuvannia system avtomatychnoho keruvannia* [Modeling of Automatic Control Systems]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.

### **Opryshko Oleksiy**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-3566>  
E-mail: [ozon.kiev@nubip.edu.ua](mailto:ozon.kiev@nubip.edu.ua)

### **Plemiannyk Valeria**

*Student on the 'Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics' Master's programme, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
E-mail: [akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua](mailto:akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua)

## **DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM FOR THE STORAGE AREA OF A CUSTOMS TERMINAL**

**Abstract.** *The article addresses a relevant scientific and technical problem of improving the efficiency of customs terminal operations in Ukraine under post-pandemic challenges, in particular ensuring proper microclimate parameters in warehouse facilities. The necessity of implementing automatic control systems to maintain temperature, humidity, and air quality in order to preserve goods and ensure safe working conditions for personnel is substantiated. An analysis of modern approaches to the automation of ventilation and air conditioning systems is carried out, and their limitations in the specific conditions of customs facilities are identified. A functional automation scheme for a supply and exhaust ventilation system with heat recovery has been developed, and a mathematical model of the temperature regime of a customs terminal building based on heat balance equations has been created. Based on simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment, a digital control system with a PI controller has been synthesized and its parameters have been determined. The study shows that the proposed system provides stable and accurate control without overshoot and steady-state error, as well as effective maintenance of air quality. The asymptotic stability of the system has been confirmed using the Jury criterion, and its practical feasibility has been demonstrated. A comprehensive technical solution based on a modern programmable logic controller (PLC110) is proposed, ensuring high signal processing resolution and reliability under industrial conditions. The practical significance of the work is emphasized by the development of a human-machine interface (HMI) for remote monitoring, which ensures transparency of logistics processes and enables prompt intervention by personnel. The simulation results and techno-economic calculations demonstrate that the implementation of the proposed system reduces energy consumption for microclimate maintenance by 15–20% while simultaneously improving the accuracy of parameter stabilization. The obtained results can be used for the modernization of customs infrastructure and the implementation of digital systems for monitoring and controlling the microclimate in warehouse facilities.*

**Keywords:** *Automation, Microclimate, Customs Terminal, Programmable Logic Controller, Control Algorithm, Codesys, Energy Efficiency, Monitoring.*



### Кіктєв Микола Олександрович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7682-280X>

E-mail: [nkiktev@nubip.edu.ua](mailto:nkiktev@nubip.edu.ua)

### Градобоєв Данило Андрійович

аспірант кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9636-1095>

E-mail: [d.gradoboev@nubip.edu.ua](mailto:d.gradoboev@nubip.edu.ua)

## АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТЕПЛОКРОВНИХ ШКІДНИКІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ В АГРОНОМІЇ

**Анотація.** У статті розглянуто побудову інтелектуальної підсистеми виявлення теплокровних шкідників як складової автоматизованої системи моніторингу виробничих процесів в агрономії. Актуальність роботи зумовлена потребою у своєчасному виявленні факторів біологічної загрози на посівах, що призводять до значних економічних збитків та зниження якості кінцевої продукції, зниженні залежності від ручного обстеження полів та підвищенні оперативності прийняття рішень в умовах точного землеробства. На основі аналізу сучасних підходів до комп'ютерного зору, тепловізійного спостереження, безпілотного моніторингу та IoT-інфраструктури сформовано вимоги до архітектури підсистеми, яка повинна забезпечувати збір різномірних даних, попередню обробку, локалізацію потенційно небезпечних об'єктів, оцінювання рівня загрози та передавання результатів до контуру підтримки управлінських рішень. Метою дослідження є обґрунтування структури такої підсистеми, визначення основних функціональних модулів та вибір придатних класів моделей детектування для польових умов. У роботі використано методи системного аналізу, функціональної декомпозиції, порівняльного аналізу архітектур детекторів об'єктів і узагальнення результатів сучасних публікацій за тематикою точного землеробства. У результаті запропоновано багаторівневу архітектуру, що поєднує рівень сенсорного збору даних, рівень аналітичної обробки, рівень просторової верифікації та рівень підтримки рішень. Обґрунтовано доцільність комбінування RGB- і тепловізійних даних, а також використання одноетапних детекторів класу YOLO для оперативного польового виявлення об'єктів. Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його подальшої інтеграції в автоматизовані системи агропривиробництва та розвитку спеціалізованих сервісів раннього попередження.

**Ключові слова:** агрономія, автоматизована система моніторингу, комп'ютерний зір, теплокровні шкідники, точне землеробство, тепловізійне знімання, виявлення об'єктів, YOLO, IoT.

**Актуальність.** Цифрова трансформація аграрного виробництва в останні роки відбувається у напрямі інтеграції сенсорних мереж, геоінформаційних сервісів, безпілотних літальних апаратів і методів машинного навчання у єдиний контур підтримки рішень. У межах концепції точного землеробства спостереження за станом поля вже не обмежується контролем агрохімічних параметрів або вегетаційних індексів, а дедалі частіше включає оперативне виявлення біотичних факторів ризику, зокрема шкідників і проявів їх активності [1, 2].

Для умов польового виробництва окрему складність становлять теплокровні шкідники, активність яких має виражений просторово-часовий характер і часто проявляється локально. До теплокровних шкідників відносять дві групи: гризуни і зайцеподібні. Гризуни це найчисельніша група, вона включає сірих та чорних щурів, хатніх миш, полівок, а також ховрахів. Друга група включає зайців та кролів, які пошкоджують кору молодих дерев у садах та знищують посіви.

Назва «теплокровні шкідники» підкреслює їхню належність до вищих хребетних, що відрізняє їх від холоднокровних шкідників (комах, кліщів, слимаків). Теплокровність дозволяє їм зберігати активність протягом усього року (вони не впадають у заціпеніння взимку, на відміну від багатьох комах) та мати високий рівень інтелекту й адаптивності. Це ускладнює боротьбу з ними, тому що вони можуть розпізнавати пастки або уникати отруєних приман.

Основна шкода від цих звірів складається з трьох компонентів:

- економічні збитки полягають у псуванні зерна, овочів та фруктів як на полях, так і в зерносховищах. За підрахунками, гризуни щорічно знищують або псують до 20% світового запасу продовольства.
- руйнування інфраструктури внаслідок того, що гризуни мають потребу постійно щось гризти (їхні різці ростуть усе життя). Вони часто пошкоджують електричні кабелі, пластикові труби та термоізоляцію будівель.
- епідеміологічна небезпека - шкідники є переносниками небезпечних хвороб, таких як лептоспіроз, туляремія, сальмонельоз та різні види лихоманок.

Для моніторингу теплокровних шкідників (зокрема гризунів та ховрахів) використовують як класичні польові методи, так і сучасні технологічні рішення: візуальний та прямий моніторинг (облік жилих нір; маршрутні обстеження); дистанційне зондування (мультиспектральні камери і тепловізори); технології IoT (смарт-пастки, акустичний моніторинг); індикаторні методи (контрольно-слідові майданчики, неотруйні приманки); аналіз даних та прогнозування (на основі теплових карт). Оскільки вони ведуть прихований спосіб життя, моніторинг часто базується на непрямих ознаках їхньої присутності:

Традиційні способи обліку таких об'єктів засновані на маршрутних обстеженнях, візуальному огляді або аналізі непрямих ознак. Такі підходи потребують значних трудових витрат, залежать від кваліфікації виконавця та не забезпечують достатньої оперативності під час прийняття рішень у межах інтегрованого захисту рослин.

Водночас розвиток комп'ютерного зору, тепловізійного знімання та безпілотного моніторингу відкриває можливість переходу від епізодичного ручного контролю до автоматизованого спостереження за рухомими біологічними об'єктами. Для цього необхідна не окрема модель розпізнавання, а цілісна архітектура інтелектуальної підсистеми, яка здатна працювати як елемент автоматизованої системи моніторингу виробничих процесів в агрономії та забезпечувати передачу результатів у контур управління.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній літературі досить широко висвітлено питання цифровізації аграрних систем, зокрема використання датчиків, мережевої інфраструктури та машинного навчання для контролю виробничих процесів. У роботі Monteiro та ін. [1] наведено узагальнений огляд напрямів точного землеробства для рослинництва і тваринництва, де підкреслено, що підвищення ефективності можливе лише за умови поєднання даних спостереження з аналітичними моделями. У праці Shahab та ін. [2] показано, що IoT-орієнтовані системи управління в агросфері формують технічну основу для сталого моніторингу та підтримки рішень у режимі, наближеному до реального часу.

Окремий напрям досліджень стосується комп'ютерного зору в аграрних задачах. Огляд Khan та ін. [3] систематизує застосування детектування об'єктів у сільському господарстві та демонструє, що найбільш затребуваними є рішення для виявлення бур'янів, плодів, хвороб і шкідників. У роботі Rakhmatulin та ін. [4] проаналізовано використання глибоких нейронних мереж для виявлення рослинних об'єктів у реальному часі, що підтверджує придатність одноетапних детекторів для польових умов із жорсткими обмеженнями щодо швидкодії.

Для задач пошуку теплокровних об'єктів принципово важливими є праці, присвячені тепловізійному детектуванню тварин і роботі з інфрачервоними даними.

У статті Christiansen та ін. [5] показано можливість автоматичного виявлення й розпізнавання тварин за тепловими ознаками. Огляд Zheng та ін. [6] узагальнює сучасний стан інфрачервоної візуалізації в тваринництві й підтверджує, що безконтактні теплові дані мають високу цінність для пошуку та класифікації біологічних об'єктів. Rietz та ін. [7] демонструють практичні переваги безпілотного тепловізійного моніторингу для виявлення об'єктів у природному середовищі. Разом з тим більшість наявних досліджень або зосереджена на вузьких задачах, наприклад виявленні комах у пастках (Zhang та ін. [8]), або описує окремі моделі без достатньої уваги до інтеграції з виробничим контуром аграрного моніторингу (Ahmed та ін. [9]). Саме тому актуальним є формування архітектури інтелектуальної підсистеми, орієнтованої не лише на факт детектування, а й на включення результату в процес технологічного управління.

В статті [10] авторами представлений один з етапів створення підсистеми виявлення теплокровних шкідників, яка є предметом нашого дослідження, а саме - підготовка та аналіз даних моніторингу рельєфу місцевості для ідентифікації курганів, створених гризунами. В тому числі виконано аналіз мікрорельєфу і побудову його DBSCAN моделі з використанням синтетичних LiDAR-даних, кластеризацію аномальних підвищень методом та збереження результатів для подальшого аналізу з використанням мови програмування R.

**Метою дослідження** є обґрунтування архітектури інтелектуальної підсистеми виявлення теплокровних шкідників в автоматизованій системі моніторингу виробничих процесів в агрономії, визначення її функціональних модулів, інформаційних потоків та придатних класів моделей комп'ютерного зору для роботи в польових умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- 1) визначити вимоги до підсистеми з урахуванням умов аграрного середовища;
- 2) сформулювати логічну структуру збору, передавання та обробки даних;
- 3) порівняти придатність окремих класів детекторів об'єктів;
- 4) визначити місце підсистеми у загальному контурі моніторингу й підтримки рішень.

**Матеріали і методи дослідження.** У роботі використано методи системного аналізу та функціональної декомпозиції для виділення рівнів і модулів інтелектуальної підсистеми. Для вибору базових підходів до детектування застосовано порівняльний аналіз класичних і сучасних архітектур комп'ютерного зору, що найчастіше використовуються в задачах пошуку об'єктів на сцені: одноетапних детекторів сімейства YOLO [11], трансформерних детекторів типу DETR [12] та спеціалізованих аграрних модифікацій для виявлення шкідників [8].

Інформаційну основу дослідження становили наукові публікації, у яких розглядаються питання точного землеробства, безпілотного моніторингу, тепловізійного детектування тварин, IoT-орієнтованих аграрних платформ і систем автоматичного виявлення шкідників [1-9]. При формуванні запропонованої архітектури враховувалися типові обмеження польового застосування: змінна освітленість, наявність рослинного покриву, часткова оклюзія об'єктів, потреба в автономності та обмежені обчислювальні ресурси крайових пристроїв.

Під теплокровними шкідниками в межах даної статті розуміються рухомі біологічні об'єкти, присутність яких на полі або на прилеглий території створює ризики для посівів, урожаю чи технологічних операцій. З позиції інформаційної технології це означає, що система повинна не лише локалізувати об'єкт у кадрі, а й забезпечити просторову прив'язку, оцінити достовірність виявлення та сформувати сигнал для подальшого управлінського реагування.

**Результати дослідження та їх обговорення.** У результаті дослідження запропоновано багаторівневу архітектуру інтелектуальної підсистеми, орієнтованої на роботу в складі автоматизованої системи моніторингу виробничих процесів в агрономії. Принципова відмінність запропонованого підходу полягає у тому, що модуль виявлення розглядається не як ізольований інструмент комп'ютерного зору, а як компонент більш широкої кіберфізичної системи, який генерує події для технологічного управління. Структуру запропонованої підсистеми наведено на рис. 1.

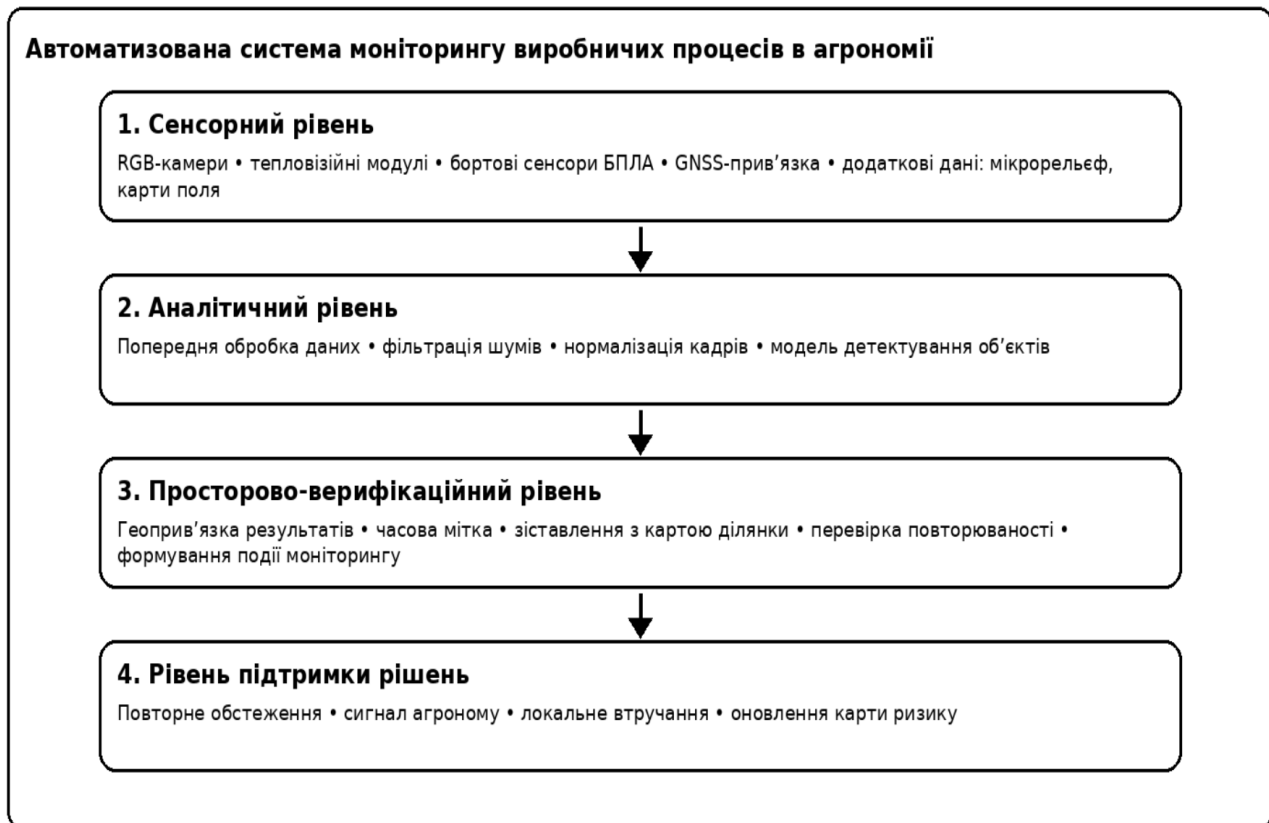


Рисунок 1 – Багаторівнева архітектура інтелектуальної підсистеми виявлення теплокровних шкідників у складі автоматизованої системи моніторингу виробничих процесів в агрономії

Архітектура передбачає чотири взаємопов'язані рівні: сенсорний, аналітичний, просторово-верифікаційний та рівень підтримки рішень (табл. 1).

Таблиця 1 – Функціональні рівні інтелектуальної підсистеми виявлення теплокровних шкідників

Рівень	Основні функції	Результат роботи
Сенсорний	Отримання RGB- та тепловізійних зображень, часових і координатних міток, телеметрії, метеоданих.	Первинний потік синхронізованих даних.
Аналітичний	Попередня обробка кадрів, нормалізація, виділення кандидатних зон, запуск моделі детектування.	Локалізовані об'єкти з оцінкою достовірності.
Просторово-верифікаційний	Геоприв'язка, перевірка повторюваності спрацювань, зіставлення з картою поля та попередніми спостереженнями.	Подія моніторингу з координатами, часом та рівнем ризику.
Підтримка рішень	Формування сповіщень, пріоритезація реагування, передавання даних в інформаційну систему господарства.	Рекомендація для агронома або автоматизованого контуру дій щодо контролю чисельності шкідливих звірів та боротьби з ними

Сенсорний рівень формує первинний потік даних за рахунок RGB-камер, тепловізійних модулів, бортових сенсорів БПЛА, GNSS-прив'язки та за потреби додаткових джерел на кшталт даних мікрорельєфу чи карт поля. Аналітичний рівень виконує попередню обробку, фільтрацію шумів, нормалізацію кадрів і запуск моделі детектування. Просторово-верифікаційний рівень співставляє результати детектування з координатами, часовою міткою, картою ділянки та історією спостережень, після чого формує подію моніторингу. Рівень підтримки рішень трансформує подію у рекомендацію: повторне обстеження, сигнал агроному, локальне втручання або оновлення карти ризику. На практичному рівні цей контур може бути реалізований у вигляді веб-інтерфейсу моніторингу, який акумулює результати спостережень, пов'язані задачі та зведені показники стану системи.

Запропонована структура дає змогу розв'язати проблему хибного ототожнення випадкових теплових аномалій із цільовими об'єктами. Якщо аналізувати лише один кадр, система може реагувати на нагрітий камінь, техніку, залишки рослин або інші перешкоди. Саме тому після первинного детектування доцільно виконувати просторово-часову верифікацію: перевіряти, чи повторюється об'єкт у сусідніх кадрах, чи зберігає характер траєкторії руху, чи відповідає допустимому діапазону розмірів та чи розташований у зоні, де така поява є логічно можливою.

З погляду вибору моделей комп'ютерного зору для польового застосування найбільш практичними залишаються одноетапні детектори. Починаючи з YOLO як концепції єдиного проходу [11], ця група моделей демонструє поєднання швидкодії й достатньої точності, що критично важливо для оперативного аналізу відеопотоку на БПЛА або крайових обчислювальних вузлах. Трансформерні детектори, зокрема DETR [12], є перспективними завдяки глобальному контексту й стійкості до складних сцен, однак у базовому варіанті зазвичай потребують більших обчислювальних ресурсів і довшого навчання. Для аграрних задач невеликих і щільно розташованих об'єктів корисними є спеціалізовані модифікації, наприклад AgriPest-YOLO [8]. Порівняльна оцінка класів моделей для підсистеми виявлення представлена в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняльна оцінка класів моделей для підсистеми виявлення

Клас моделей	Переваги	Обмеження	Доцільність для задачі
YOLO-подібні одноетапні детектори	Висока швидкодія, придатність до обробки потоку в реальному часі, наявність великої кількості практичних реалізацій.	Потребують якісної адаптації до малих і частково оклюзованих об'єктів.	Базовий варіант для крайових пристроїв і БПЛА.
Трансформерні детектори (DETR та похідні)	Краще моделювання глобального контексту сцени, зменшення залежності від hand-crafted процедур постобробки.	Вищі вимоги до ресурсів і часу навчання.	Доцільні для серверної обробки та донавчання моделей.
Спеціалізовані аграрні модифікації	Краще враховують малі розміри цілей, щільне розташування та фонові перешкоди.	Часто прив'язані до конкретного набору даних або сценарію.	Перспективні після формування власного датасету предметної області.

Для підвищення практичної визначеності запропонованої архітектури розроблено прототип веб-інтерфейсу AgriPest Monitor, який реалізує функції узагальненого подання даних про поля, спостереження, дії, задачі та експерименти (рис. 2). Такий інтерфейс може

розглядатися як приклад початкової реалізації рівня моніторингу та підтримки рішень, оскільки забезпечує структуроване відображення подій моніторингу, агрегованих показників стану системи та пов'язаних із ними керуючих дій. Це створює основу для подальшого переходу від ізольованого результату детектування до інтегрованої підтримки прийняття рішень в автоматизованій системі агровиробництва.

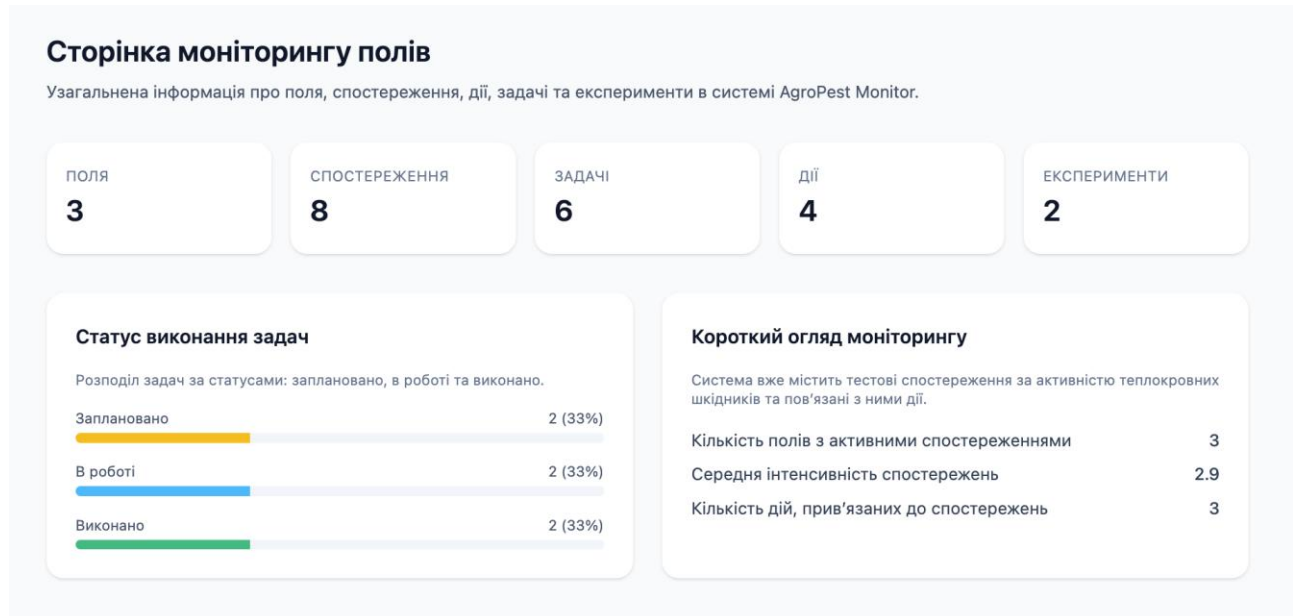


Рисунок 2 – Прототип веб-інтерфейсу рівня моніторингу та підтримки рішень AgroPest Monitor

З урахуванням наведеного порівняння для першої ітерації побудови підсистеми доцільно використовувати YOLO-подібний детектор як базовий модуль оперативного виявлення, а тепловізійний канал – як засіб підвищення контрасту цільових об'єктів у сутінкових та нічних умовах. Комбінування RGB- та теплових даних є важливим, оскільки тільки видимий спектр сильно залежить від освітлення, а тільки тепла інформація не завжди дає достатню текстурну деталізацію для розпізнавання типу об'єкта [5-7].

Для практичного впровадження підсистеми важливим є питання датасету. Більшість відкритих наборів даних орієнтована на комах-шкідників, листкові хвороби або стандартні об'єкти сільськогосподарської техніки [3; 8; 9]. Для задачі виявлення теплокровних шкідників у польових умовах доцільно формувати спеціалізований корпус даних із багатоспектральними парами кадрів, анотаціями класу об'єкта, часової мітки, координат та контексту сцени. Такий набір даних має включати не лише позитивні приклади, а й складні негативні випадки: теплові відблиски, тіні, фрагменти техніки, домашніх тварин і сторонні рухомі об'єкти.

У дискусійному плані важливо наголосити, що ефективність підсистеми визначатиметься не тільки якістю моделі. У реальному виробничому середовищі істотну роль відіграють висота польоту БПЛА, кут огляду, роздільна здатність тепловізора, погодні умови, сезонна структура рослинного покриву, частота обльотів і механізми верифікації. Саме тому подальший розвиток системи має відбуватися як поєднання модельного рівня, процедур польового збору даних та інтеграції з інформаційною інфраструктурою господарства.

Для підвищення практичної визначеності запропонованої підсистеми доцільно вже на етапі проектування закласти критерії її оцінювання. До базових показників слід віднести точність і повноту виявлення (precision, recall), інтегральну F1-міру, mAP для локалізації об'єктів, середню затримку обробки кадру, частоту хибних спрацювань, а також стабільність роботи в умовах зміни освітленості, часткової оклюзії та неоднорідного фону. На відміну від лабораторних сценаріїв, у польових умовах критичним є не лише сам факт правильного

детектування, а й здатність системи підтримувати прийнятну точність за обмежених ресурсів крайового обчислювального вузла та змінних параметрів середовища.

Як сценарій первинної апробації може розглядатися серія контрольних об'єктів тестових ділянок із фіксацією денних, сутінкових і нічних умов спостереження, різної висоти польоту БПЛА та різної щільності рослинного покриву. У такому разі результати детектування мають оцінюватися не ізольовано, а в поєднанні з процедурою просторово-часової верифікації, яка відсікає одиничні випадкові аномалії та підтверджує подію моніторингу за повторюваністю ознаки. Саме така постановка апробації наближає модельний експеримент до реального виробничого застосування та створює основу для подальшого формування спеціалізованого датасету предметної області.

Отже, запропонована архітектура забезпечує логічну основу для створення підсистеми: вона поєднує моніторинг виробничих процесів, інтелектуальне розпізнавання рухомих об'єктів і контур керування на основі подій.

Отримані результати також свідчать про можливість створення прикладного програмного інтерфейсу для візуалізації подій моніторингу та супроводу керуючих дій, що підтверджено розробленим прототипом AgroPest Monitor. Це дає змогу розглядати виявлення теплокровних шкідників не як локальну задачу комп'ютерного зору, а як елемент автоматизованої системи управління в агрономії.

Результати моніторингу шкідливих звірів можуть бути використані для контролю їх чисельності та подальшої боротьби з ними (дератизації) різними способами, в тому числі:

- хімічними (використання отруйних приманок),
- механічними (пастки, живоловки, клейові майданчики),
- фізичними (ультразвукові відлякувачі, які створюють дискомфортне середовище для гризунів),
- біологічними (використання природних ворогів (котів, тер'єрів) або специфічних бактеріальних препаратів).

**Висновки та перспективи.** Отже, в статті обґрунтовано доцільність побудови інтелектуальної підсистеми виявлення теплокровних шкідників як складової автоматизованої системи моніторингу виробничих процесів в агрономії. Така підсистема повинна включати не лише модуль детектування, а й засоби просторової верифікації та підтримки рішень.

Запропоновано багаторівневу архітектуру, що складається із сенсорного, аналітичного, просторово-верифікаційного рівнів та рівня підтримки рішень. Визначено функції кожного рівня та інформаційні потоки між ними. Показано, що для першої реалізації підсистеми найбільш доцільним є використання одноетапних детекторів класу YOLO у поєднанні з RGB-і тепловізійними даними, тоді як трансформерні моделі можуть розглядатися як перспективний напрям для серверної обробки та подальшого підвищення точності.

Подальші дослідження доцільно зосередити на формуванні предметно-орієнтованого датасету, експериментальному порівнянні моделей на багатоспектральних даних, розробленні критеріїв оцінювання ризику та інтеграції підсистеми з геоінформаційними сервісами і модулями автоматизованого реагування.

#### Список використаних джерел

1. Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. *Animals*, 11(8), Article 2345. <https://doi.org/10.3390/ani11082345>.
2. Shahab, H., Iqbal, M., Sohaib, A., Ullah Khan, F., & Waqas, M. (2024). IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220, Article 108851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>.
3. Khan, Z., Shen, Y., & Liu, H. (2025). Object detection in agriculture: A comprehensive review of methods, applications, challenges, and future directions. *Agriculture*, 15(13), Article 1351. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131351>.

4. Rakhmatulin, I., Kamilaris, A., & Andreassen, C. (2021). Deep neural networks to detect weeds from crops in agricultural environments in real-time: A review. *Remote Sensing*, 13(21), Article 4486. <https://doi.org/10.3390/rs13214486>.
5. Christiansen, P., Steen, K. A., Jørgensen, R. N., & Karstoft, H. (2014). Automated detection and recognition of wildlife using thermal cameras. *Sensors*, 14(8), 13778–13793. <https://doi.org/10.3390/s140813778>.
6. Zheng, S., Zhou, C., Jiang, X., Huang, J., & Xu, D. (2022). Progress on infrared imaging technology in animal production: A review. *Sensors*, 22(3), Article 705. <https://doi.org/10.3390/s22030705>.
7. Rietz, J., Calkoen, F., von Hoermann, C., et al. (2023). Drone-based thermal imaging in the detection of wildlife carcasses and disease management. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2023, Article 5517000. <https://doi.org/10.1155/2023/5517000>.
8. Zhang, W., Huang, H., Sun, Y., & Wu, X. (2022). AgriPest-YOLO: A rapid light-trap agricultural pest detection method based on deep learning. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1079384. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079384>.
9. Ahmed, S., Marwat, S. N. K., Ben Brahim, G., et al. (2024). IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Scientific Reports*, 14, Article 31917. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83012-3>.
10. Kiktev, M. O., Hradoboiev, D. A., Opryshko, O. O., Karmatskykh, A. A., & Melnyk, D. O. (2025). Identyfikatsiia lokatsii hryzuniv na poliakh dlia orhanizatsii zakhysnykh zakhodiv v ahronomii [Identification of rodents locations in fields for organization of protective measures in agronomy]. *Enerhetyka i avtomatyka [Energy and Automation]*, 2(78), 158–172. [https://doi.org/10.31548/energiya2\(78\).2025.158](https://doi.org/10.31548/energiya2(78).2025.158).
11. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>.
12. Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., & Zagoruyko, S. (2020). End-to-end object detection with transformers. In *Computer Vision — ECCV 2020* (pp. 213–229). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_13).

### **Kiktev Mykola**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko,*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7682-280X>

E-mail: [nkiktev@nubip.edu.ua](mailto:nkiktev@nubip.edu.ua)

### **Hradoboiev Danylo**

*Postgraduate student, Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9636-1095>

E-mail: [d.gradoboev@nubip.edu.ua](mailto:d.gradoboev@nubip.edu.ua)

## **ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT SUBSYSTEM FOR DETECTING WARM-BLOODED PESTS IN MONITORING PRODUCTION PROCESSES IN AGRONOMY**

**Abstract.** *The paper considers the construction of an intelligent subsystem for detecting warm-blooded pests as a component of an automated system for monitoring production processes in agronomy. The relevance of the study is determined by the need for timely detection of biological threats in crop fields, which lead to significant economic losses and a reduction in the quality of the final product, a reduction in dependence on manual field inspection, and an improvement in the promptness of decision-making in precision agriculture. Based on the analysis of current approaches to computer vision, thermal imaging, drone monitoring, and IoT infrastructure, the requirements for a subsystem architecture are formulated. The subsystem should provide multimodal data acquisition, preprocessing, localization of potentially dangerous objects, threat assessment, and transmission of results to the decision-support loop. The purpose*

*of the study is to substantiate the structure of such a subsystem, identify its main functional modules, and determine suitable classes of object detection models for field conditions. The study uses methods of system analysis, functional decomposition, comparative analysis of object detector architectures, and generalization of recent publications in precision agriculture. As a result, a multi-level architecture is proposed that combines the sensing layer, the analytical processing layer, the spatial verification layer, and the decision-support layer. The expediency of combining RGB and thermal data, as well as the use of YOLO-type one-stage detectors for real-time field detection, is substantiated. The practical value of the proposed approach lies in the possibility of its further integration into automated agricultural systems and the development of specialized early-warning services.*

**Keywords:** *Agronomy, Automated Monitoring System, Computer Vision, Warm-Blooded Pests, Precision Agriculture, Thermal Imaging, Object Detection, YOLO, IoT.*