

ISBN – XXX-XXX-XXX

DOI – 10.46299/XXX-XXX-XXX

*Information technologies,
engineering, transport and
construction: the latest technologies
in the development of sciences*

Collective monograph

Boston 2025

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN – XXX-XXX-XXX

DOI – 10.46299/XXX-XXX-XXX

Authors – Babiak V., Khmelnytska K., Sheptytska M., Rohotskyi B., Falendysh A., Babyak V., Mysak I., Mysak P., Vozniuk L., Honchar N., Chomko I., Bihun V., Merezko Y., Serban D., Кошовий М.Д., Ащепкова Н.С., Клименко С.В., Sukhatskiy Y., Shepida M., Sozanskyi M., Vasiichuk V., Znak Z., Bukliv R., Budishevskaya O., Komarenska Z., Oliynyk L., Ясько Я.М., Азарова А.О., Шевченко С., Жданова Ю., Гаркушенко А., Romanuk S., Titova N., Pavlov S., Romanuk O., Kotlyk S., Жук О.В., Одарущенко О.Б., Бутенко В.О., Возниця А.С., Шишацкий А.В., Налапко О.Л., Ляшенко Г.Т., Шапошнікова О.П., Маций О.Б., Щербина К., Шумілова К., Мальцев А., Галамутько О., Шумілов Д.

REVIEWER

Ivan Katerynychuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Education of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems of Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine.

Kostiantyn Dolia – Doctor of Engineering, Department of automobile and transport infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Published by Primedia eLaunch

<https://primediaelaunch.com/>

Text Copyright © 2025 by the International Science Group(isg-konf.com) and authors.

Illustrations © 2025 by the International Science Group and authors.

Cover design: International Science Group(isg-konf.com). ©

Cover art: International Science Group(isg-konf.com). ©

All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe and Ukraine. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science.

The recommended citation for this publication is:

Information technologies, engineering, transport and construction: the latest technologies in the development of sciences: collective monograph / Babiak V., Khmelnytska K., Sheptytska M., Rohotskyi B., Falendysh A. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2025. 365 p. Available at : DOI – 10.46299/XXX-XXX-XXX

TABLE OF CONTENTS

1.	ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING	
1.1	Babiak V.¹, Khmelnytska K.¹, Sheptytska M.¹, Rohotskyi B.¹, Falendysh A.¹ CHANGES IN THE PLANNING AND FORM-MAKING STRUCTURE OF A UNIVERSITY ACADEMIC BUILDING ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University	9
1.2	Babyak V.¹ FEATURES OF THE LOCATION OF HOUSING UNITS FOR MIGRANTS IN THE STRUCTURE OF SETTLEMENT ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv , Ukraine	25
1.3	Mysak I.¹, Mysak P.¹ THE PROMISE AND PITFALLS OF AI IN PREDICTING SUSTAINABLE URBAN GROWTH ¹ Department of Hydraulic and Water Engineering, Lviv Polytechnic National University	37
1.4	Vozniuk L.¹, Babyak V.¹, Honchar N.¹, Chomko I.¹, Bihun V.¹ ARCHITECTURAL FORMATION OF A NEW VOLUME WITHIN AN EXISTING CAMPUS: RECONSTRUCTION OF UNIVERSITY BUILDINGS ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv , Ukraine	52
1.5	Vozniuk L.¹, Babyak V.¹, Merezko Y.¹, Serban D.¹ FORMATION OF THE MODERN EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF THE TECHNICAL UNIVERSITY DURING THE DEVELOPMENT OF THE RECONSTRUCTION PROJECT ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv , Ukraine	66
2.	AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND ROBOTICS	
2.1	Кошовий М.Д.¹, Ащепкова Н.С.², Клименко С.В.³ РОЗРОБКА МЕТОДУ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ЖЕСТІВ ¹ Кафедра інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна ² Кафедра механотроніки, Дніпровський національний університет ім. О.Гончара, Дніпро, Україна ³ Кафедра кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет ім. О.Гончара, Дніпро, Україна	80

3.	CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING	
3.1	Sukhatskiy Y.¹, Shepida M.², Sozanskyi M.³, Vasiichuk V.², Znak Z.¹ PURIFICATION OF AQUEOUS MEDIA FROM RHODAMINE B DYE USING A FENTON-LIKE PROCESS ¹ Department of Chemistry and Technology of Inorganic Substances, Lviv Polytechnic National University ² Department of Civil Safety, Lviv Polytechnic National University ³ Department of Physical, Analytical and General Chemistry, Lviv Polytechnic National University	99
4.	CHEMISTRY	
4.1	Bukliv R.¹, Budishevsk O.¹, Komarenska Z.¹, Oliynyk L.¹ THE FEASIBILITY OF HOLDING CHEMISTRY TOURNAMENTS FOR HIGH SCHOOL STUDENTS ¹ Lviv Polytechnic National University	112
5.	COMPUTER ENGINEERING	
5.1	Ясько Я.М.¹, Азарова А.О.¹ МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ВІДМОВСТІЙКОСТІ ТА ДОСТУПНОСТІ СЕРВЕРІВ ЛІЦЕНЗУВАННЯ ¹ Факультет Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет	125
5.1.1	СУЧАСНІ СИСТЕМИ ЛІЦЕНЗУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ	125
5.1.2	ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ ВІДМОВСТІЙКИХ СЕРВІСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТНИХ КЛЮЧІВ	130
5.1.3	ВИМОГИ ДО ВІДМОВСТІЙКОСТІ СИСТЕМ	135
5.1.4	МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВСТІЙКОСТІ ТА ДОСТУПНОСТІ СЕРВЕРІВ ЛІЦЕНЗУВАННЯ З АПАРАТНИМИ КЛЮЧАМИ В КОНТЕЙНЕРИЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	140
5.1.5	АПАРАТНА ЧАСТИНА КЛЮЧА В КОНТЕЙНЕРИЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	143
5.1.6	ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСТУПУ ДО АПАРАТНОГО КЛЮЧА	152
5.1.7	МЕТОД ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО АПАРАТНОГО КЛЮЧА В КЛАСТЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	157

6.	CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING	
6.1	Vozniuk L.¹, Babyak V.¹ MODERNIZATION OF AN EXISTING INDUSTRIAL BUILDING ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University	165
7.	CYBERSECURITY AND INFORMATION PROTECTION	
7.1	Шевченко С.¹, Жданова Ю.¹, Гаркушенко А.¹ КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРРИЗИКІВ ¹ Department of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buryachok, Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University	179
7.1.1	ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ ДОСЛІДЖЕННЯ	180
7.1.1.1	КІБЕРРИЗИК	180
7.1.1.2	СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД В КІБЕРБЕЗПЕЦІ	182
7.1.1.3	КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В КІБЕРБЕЗПЕЦІ	186
7.1.1.4	ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПОНЯТЬ «КІБЕРРИЗИК», «СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД», «КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ»	188
7.1.2	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ СЦЕНАРІЇВ КІБЕРІНЦИДЕНТІВ НА ОСНОВІ КОГНІТИВНИХ МОДЕЛЕЙ	190
8.	INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES	
8.1	Romanyuk S.¹, Titova N.¹, Pavlov S.², Romanyuk O.², Kotlyk S.³ USING NEURO-HEADSETS TO DIAGNOSE GENETIC DISEASES ¹ National University "Odesa Polytechnic" ² Vinnytsia National Technical University ³ Odessa National Technological University	198
8.2	Жук О.В.¹, Одарущенко О.Б.², Бутенко В.О.³, Возниця А.С.⁴, Шишацький А.В.⁵ СУКУПНІСТЬ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ¹ Національний університет оборони України, м. Київ, Україна ² Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна ³ Star Global Technology Consultancy, м. Лісабон, Португалія ⁴ Державне некомерційне підприємство Державний університет "Київський авіаційний інститут", м. Київ, Україна ⁵ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна	212
8.2.1	КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	214

8.2.2	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ГІБРИДНОЇ ІСППР З КООРДИНАЦІЄЮ	218
8.3.3	МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УЗГОДЖЕНОСТІ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	223
8.2.3.1	КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УЗГОДЖЕНОСТІ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	223
8.2.3.2	МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ БАГАТОАГЕНТНОЇ ІСППР ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ УЗГОДЖЕНОСТІ ЦІЛЕЙ АГЕНТІВ	229
8.3	Налапко О.Л. ¹ , Ляшенко Г.Т. ² , Шапошнікова О.П. ³ , Маций О.Б. ³ , Шишацький А.В. ³ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ¹ Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ, Україна ² Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна ³ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна	240
8.3.1	КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	243
8.3.2	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИРІШЕННЯ СКЛАДНОГО РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ	252
9.	MECHANICAL ENGINEERING	
9.1	Щербина К. ¹ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РАДІАЛЬНОГО РОЗМІРУ ХОНА ¹ кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет	261
10.	SEA AND INLAND WATERWAY TRANSPORT	
10.1	Шумілова К. ¹ , Мальцев А. ² , Галамутько О. ² , Шумілов Д. ³ УДОСКОНАЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАВІГАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ РУХУ МОРСЬКОГО СУДНА ¹ кафедра технічної експлуатації флоту, Навчально-науковий інститут інженерії, Національний університет «Одеська морська академія» ² кафедра управління судном, Навчально-науковий інститут навігації, Національний університет «Одеська морська академія» ³ кафедра судноводіння, Навчально-науковий інститут навігації, Національний університет «Одеська морська академія»	303
10.1.1	ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА НАВІГАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ	313

10.1.1.1	ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ОПЕРАЦІЙНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ	313
10.1.2	ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ	316
10.1.2.1	КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ДЛЯ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ СУДНА	316
10.1.2.2	КОНТРОЛЬ НАД ІНФОРМАЦІЙНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ПОТОЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ СУДНА ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ ТА ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА	318
10.1.3	АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА УЗГОДЖЕНОСТІ ДЛЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ	320
10.1.4	АЛГОРИТМ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ	326
10.1.4.1	ЕТАПИ ПІДГОТОВКИ ДО ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ	326
	REFERENCES	331

SECTION 1. ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.1.1

1.1 Changes in the planning and form-making structure of a university academic building

Introduction

The reconstruction of university buildings in Ukraine is one of the key directions of modernizing educational space, especially in the context of post-war recovery. A significant number of buildings constructed in the second half of the 20th century no longer meet modern requirements of safety, comfort, energy efficiency and organization of the educational process. These issues became particularly relevant after the extensive damage to the infrastructure of higher education institutions caused by the full-scale war, which made reconstruction not only an instrument of development, but also a necessary condition for the functioning of universities.

One example of such a case is an academic building that, before reconstruction, showed signs of physical and moral deterioration and had also suffered significant damage during hostilities. The original planning structure of the building was formed according to a typical scheme of the 1970–80s: a linear three-storey volume with a central corridor and classrooms around the perimeter. Such planning did not provide possibilities for interactive work, open spaces, flexible learning zones and modern interdisciplinary interaction.

In addition to building obsolescence, the building had a number of functional disadvantages that limited its efficient use.

A military strike led to a partial collapse of structures in the southern part of the building and the complete destruction of several rooms, which caused the loss of structural integrity in certain fragments of the building. The damage was critical and made it impossible to restore the building in its original geometry. Thus, reconstruction became not only a means of rebuilding, but also of modernization, which made it possible to rethink functional content, ensure compliance with current construction standards and create a new, high-quality educational environment.

The purpose of the study is to analyze the existing condition of the building before reconstruction and to identify key factors that formed the need to change the shape of the building.

Thus, consideration of the existing condition of the building before the start of design is an important prerequisite for further architectural decisions discussed in the following chapters of the study.

Analysis of the existing condition of the academic building before reconstruction

Before reconstruction, the building was characterized by an architectural and planning structure typical of its time and by a number of technical disadvantages that significantly limited its functionality. A detailed analysis of the actual condition of the building, carried out on the basis of measurement drawings and a site plan, makes it possible to identify a complex of problems that made further operation of the building in its original form impossible.

Planning features and disadvantages of the original scheme

The planning of the building was based on a two-storey corridor scheme with predominantly rectilinear geometry. (Fig. 1). Despite its simplicity, this model had a number of significant flaws:

- Irrational placement of rooms
- classrooms, laboratories, technical rooms and storage rooms were located without a clear logical structure;
- lack of zoning complicated internal logistics;
- some educational rooms adjoined auxiliary ones, which created acoustic and operational conflicts.
- Lack of necessary functional elements
- the building did not provide preparatory rooms — mandatory for laboratory activities;
- lack of recreational zones made the space monotonous and unsuitable for a modern educational process.
- Corridor scheme without possibilities for transformation

- narrow corridors had only a transit function;
- lack of spaces for group work, student hubs or open zones led to congestion of main passages.

Insufficient natural lighting

The building had a systemic problem with natural daylighting:

- significant depth of the building and its elongated shape limited the penetration of light;
- the central corridor had no access to daylight;
- internal rooms (for example, rooms without exterior walls) were not lit naturally at all;
- the sizes and configuration of window openings were insufficient to ensure the normative level of illumination.

This made the environment in the building energy-consuming and psychologically uncomfortable, which contradicts modern principles of organizing educational spaces.

Condition of engineering infrastructure and sanitary facilities

- Sanitary facilities were too small and did not meet regulatory requirements in terms of area;
- they had an insufficient number of cubicles;
- they did not ensure the required capacity.
- Lack of sanitary facilities for people with reduced mobility
- the dimensions of existing rooms did not allow organizing it by simple replanning.
- lack of elevators or other vertical communications suitable for PRM;
- insufficient ventilation in sanitary facilities and technical rooms.

Destroyed rooms as a key factor in the impossibility of repair

The building received a close strike that caused the complete destruction of several rooms.

The consequences included:

- loss of external and internal walls;

- collapse of floor slabs;
- destruction of engineering networks in the damaged area;
- deformation of adjacent structures.

The existing condition of the building was characterized by a complex set of problems:

- outdated and irrational planning;
- critical deficit of natural lighting;
- small sanitary facilities and complete absence of sanitary facilities for PRM;
- lack of elevators and accessibility means;
- shortage of specialized auxiliary rooms;
- significant war damage to part of the building.

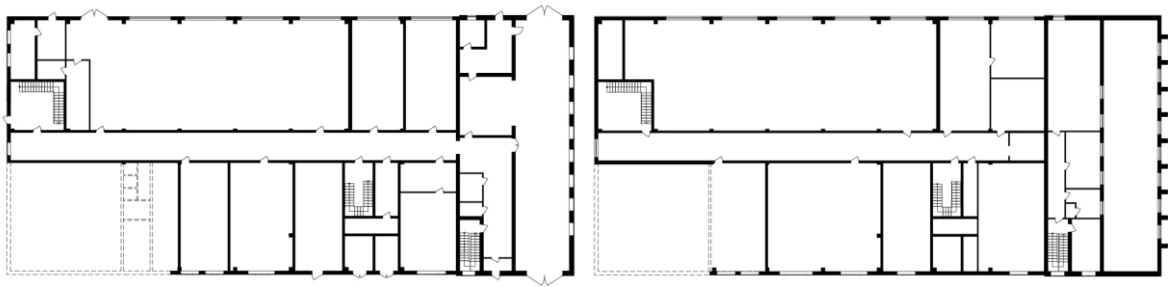


Fig. 1. Plans of the building before reconstruction [Author's development]

The combination of these factors created an objective impossibility of restoring the building in its original form and determined the need for reconstruction with a change of shape, which is discussed in the next chapters of the study.

Regulatory requirements for academic buildings and key criteria that influenced the necessity of reconstruction

During the assessment of the condition of the academic building, an important stage was the comparison of its actual characteristics with the requirements of current regulatory documents in Ukraine. Non-compliance with the main provisions of national construction standards regulating the design and operation of educational institutions became an objective reason for reconstruction with a significant revision of the functional and spatial structure of the building.

An analysis of current construction standards compared with the real condition of the building shows that the building:

- had systemic violations of daylighting standards;
- did not ensure inclusiveness;
- did not meet the requirements regarding sanitary facilities;
- had outdated logistics and non-functional planning;
- received critical structural damage during the war, which made repair impossible;
- did not meet fire safety standards in the damaged area.

Thus, in accordance with regulatory requirements, the building could not be restored in its original configuration.

Therefore, reconstruction with a change of shape was the only technically, functionally and normatively justified solution, which became the basis of further project development.

Analogues of academic building reconstruction

In contemporary practice of reconstruction of educational institutions, an important role is played by projects that combine technical renewal, transformation of spatial structure and formation of a new architectural image. To develop the concept of the reconstruction of the building, several international projects were analyzed, in which similar approaches were applied: working with the existing reinforced concrete frame, introducing new steel structures, creating internal atriums and changing the geometry of the façade.

The Diamond at the University of Sheffield (United Kingdom)

One of the most relevant examples of contemporary university reconstruction is The Diamond building at the University of Sheffield (United Kingdom). (Fig. 2). This 6-storey building for the Faculty of Engineering opened in 2015 and replaced an outdated facility, enclosing a new space with laboratories, lecture halls and open learning areas. Its façade is executed as a unique aluminum modular “shell” with a rhombic pattern over a concrete frame and glazing.



Fig. 2. Main façade of The Diamond [<https://www.ngbailey.com/case-study/45/the-diamond,-university-of-sheffield>]

The central atrium of the academic building (Fig. 3) serves as a distribution space: it unites lecture theatres, workshops, open-space areas, a café and places for independent study. Such a planning scheme ensures a high level of natural lighting, spatial flexibility and comfortable social interaction.



Fig. 3. Central atrium [<https://www.ngbailey.com/case-study/45/the-diamond,-university-of-sheffield>]

Daniels Building on the campus of the University of Toronto (Canada)

Daniels Building on the campus of the University of Toronto (Canada). (Fig. 4). The 2017 project combined the restoration of a historic 19th-century neo-Gothic building with a modern extension. The new part is created from steel, concrete and glass — it contrasts with the historic part, creating a modern educational and creative space. Inside the building, a spacious “interior main street” has been formed, which unites studios, workshops, exhibition halls, a library and gathering areas, accumulating educational, research and social functions.



Fig. 4. General view of the historic building with modern extension

[<https://www.archdaily.com/916301/daniels-building-at-university-of-toronto-nadaaa>]

A hall with a 34-meter span and double height makes it possible to avoid columns, which gives great freedom in planning spaces for lectures, workshops or project activities. (Fig. 5).

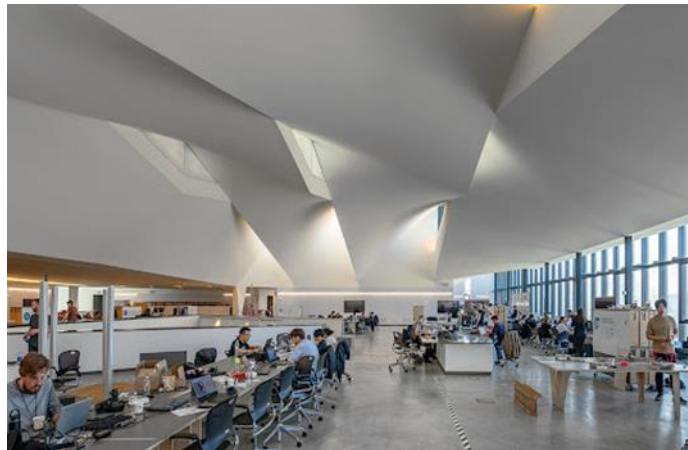


Fig. 5. Hall with a 34-meter span [<https://www.archdaily.com/916301/daniels-building-at-university-of-toronto-nadaaa>]

Both examples demonstrate important principles: preservation or adaptation of the existing structural frame, integration of new volumes, creation of a large central space inside the building, flexibility in planning. Such approaches make it possible to modernize outdated or damaged buildings, preserving the frame, but at the same time introducing modern standards of educational environment.

Concept of reconstruction with a change of building shape

It was decided not simply to restore the existing structure of the building, but to rethink it in a contemporary architectural context. The basis of the design solution is the aspiration to create a volumetric structure that provides a transition between the existing reinforced concrete frame and the new part of the building. The new volume is made of metal structures, which makes it possible to create complex geometric forms and ensures openness and flexibility of the internal space. Broken planes and a fragmented silhouette reflect the dynamics and directions of spatial transformation, emphasizing a distinctive architectural accent.

In the place of the destroyed part of the building, contrasting materials were installed — metal panels and glass, which differ from the main part of the building, making it possible to combine functionality and symbolic meaning. Such a solution forms a space that is a kind of marker of change and renewal, and also emphasizes the significance of the building within the structure of the campus. (Fig. 6).



Fig. 6. Facades of building [Author's development]

Thus, reconstruction of the building with a change of shape ensures a complex combination of contemporary architectural approaches, optimization of flows, natural

lighting and functional transformation of interior spaces, giving the building a unique contemporary image while integrating it into the overall structure of the university campus.

New functional and spatial scheme of the building

It was decided to change the internal planning structure of the building in order to ensure compliance with modern educational and communication needs. The key task was to form learning spaces that combine flexibility, openness and functionality, as well as to create areas for collaborative work, rest and cultural interaction.

In the area where the organization of large open spaces was previously impossible, a multifunctional hall and exhibition space were designed. The hall is designed for lectures, presentations, conferences and student events. The exhibition part functions as a gallery where student works can be displayed, scientific and cultural events can be held, as well as temporary exhibitions organized. Thus, the new space combines the educational and public functions of the building, creating a contemporary environment for learning and communication. (Fig. 7).

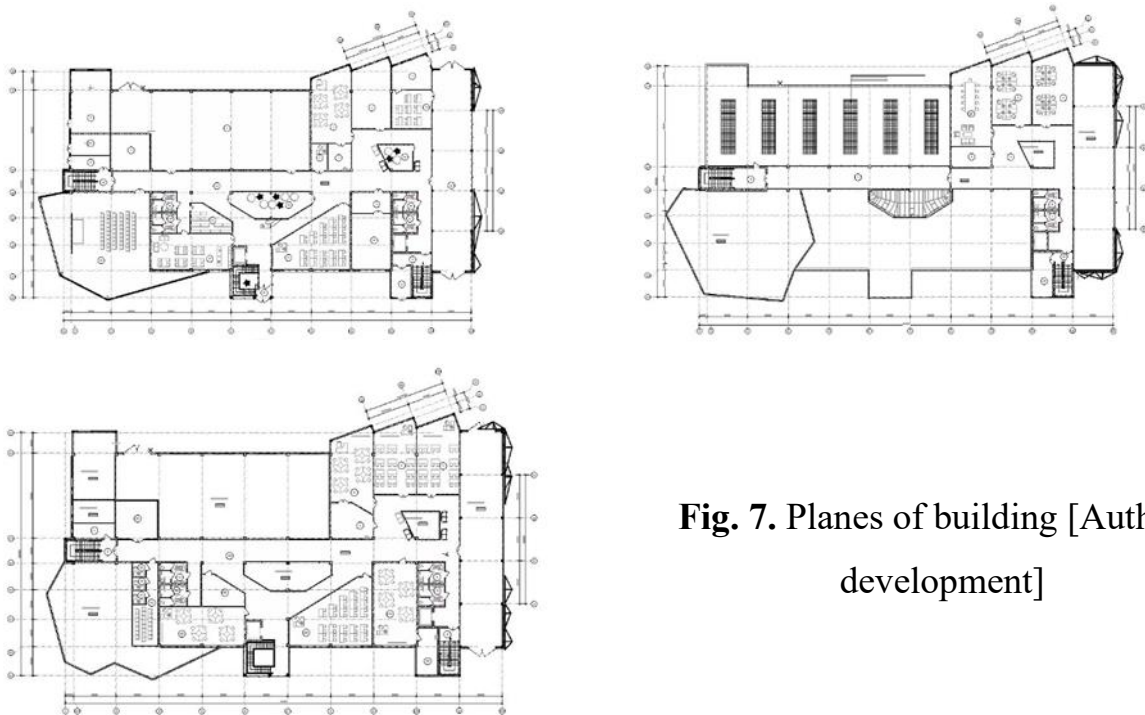


Fig. 7. Planes of building [Author's development]

Old long dark corridors were replaced with shorter and more logical routes, which facilitate the movement of students and staff. Improved daylighting of internal rooms was also ensured thanks to transparent façade planes and two atriums, which fill

the space with natural light. New spaces make it possible to create open learning zones for collaborative work and rest, improving the quality of staying in the building.

The updated planning scheme ensures efficient use of every square meter, while forming an environment that stimulates educational, social and cultural activity. Learning zones cease to be isolated, and corridors become integrated elements of space, ensuring interaction between students and staff. This approach makes it possible to transform the building from a classical educational facility into a modern university centre, where education, culture and social interaction are combined.

Master Plan and Landscape Design

The master plan of the reconstruction acts as a basic structural model that transforms a previously inefficiently organized site into an orderly, functionally coordinated, and modern educational space. It forms a new zoning system in which the territory is divided into a group of clearly defined functional sectors that increase the rationality of land use and ensure safe movement of users.

The recreational green zone, which occupies the largest part of the site, is formed as a complex landscape space with terrace benches with greenery at different levels, pathways, and expressive terrain geometry. It functions as an informal communication environment, a place for rest and social interaction.

The transport zone (entrances, parking, and technical access) is assigned to the periphery of the site. This localization minimizes the intersection of pedestrian routes with transport routes, reduces the risk of conflict situations, and ensures safe movement of students within the building area. Pedestrian connections with the possibility of fire truck access in case of emergencies are provided.

The geometry of the landscape repeats the stylized broken lines of the architectural facades, creating visual integrity between the outdoor environment and the reconstructed building. Particular attention is paid to lighting and navigation, ensuring convenient and safe use of the area in the evening. The combination of natural materials with modern surface finishes creates a diverse tactile and visual structure.

Inclusiveness is a fundamental principle of the master plan. All main routes have minimal height differences or are equipped with ramps in accordance with state

standards. Tactile elements and visual markers are placed in key movement areas, and site furnishings are arranged so as not to create obstacles. A high level of landscaping emphasizes the priority of forming an environmentally sustainable and comfortable public space in accordance with modern educational environment standards. (Fig. 8).



Fig. 8. Master plan [Author's development]

Structural Solutions for Changing the Building Shape

The use of complex geometry determined the need to form a spatial metal frame, executed as a polyhedral structure similar to a geodesic dome. Such a frame functions as a spatial truss that provides high rigidity with minimal weight and allows large spans to be covered without internal supports. The spatial system is the main load-bearing element, later filled with glass units and corten steel panels.

The frame structure is built from rectangular steel tubes. The main elements have differentiated cross-sections according to loads:

- vertical posts are made of 120×80×4 mm tube;

- chords and main structural elements are made of 200×150×6 mm tube, capable of carrying primary vertical and horizontal forces.

The system of joints provides a combination of welded and bolted elements, allowing reliable load transfer in areas of complex geometry and ensuring the possibility of installation onto existing columns. Steel plates in the joints reinforce the structure and stabilize force flows.

A key stage was the connection of the new steel frame with the existing reinforced concrete frame of the building. The metal structure rests on reinforced concrete columns, which take part of the vertical and horizontal loads, including the weight of enclosing structures and snow and wind pressure. Such interaction ensures structural integrity of the new building shape and achieves a harmonious combination of old and new parts of the building.

Interior Solutions and Educational Environment

The internal environment of the building, before reconstruction, was dark and poorly adapted to inclusive needs, however, in the developed project it underwent fundamental changes aimed at improving comfort, functionality, and efficiency of the educational process. The implementation of two large atriums made it possible to radically transform the nature of the internal space. Vertical light wells became the main source of natural light in the central zones of the building. Thanks to this, corridors ceased to be only transit areas and gained the functions of recreational and working zones. Natural light stabilized students' daily perception rhythms, created an emotionally comfortable environment, and reduced the need for active artificial lighting during daytime.

A significant element of the new space was live greenery in the atriums. The inclusion of plants in the interior of university buildings is a common practice in European educational complexes, since it has been proven that green zones act as natural air filters, reduce CO₂ concentration, and regulate humidity. In the case of the reconstructed building, the green corner plays an additional psycho-emotional role: plants are integrated into rest zones where students spend time between classes, as well as into group work areas, where greenery promotes concentration and reduces stress.

The main hall space became a logical point of intersection between student and staff flows. Its composition — open stairs, a lightweight metal elevator core, and semi-transparent railings — enhances the sense of vertical unity of the building. Thus, the hall performs not only a communication function, but also becomes a place for meetings and informal interaction. The integrated coffee-break area has become a social hub that influences the organization of student life. Furniture with soft forms has been installed here, adapting to different usage scenarios: short rest, laptop work, group discussions. Warm local lighting creates an intimate atmosphere, compensating for the visual openness of the space.

A particularly important element of the reconstruction is the assembly hall in the new annex to the building. It is a space where symbolic memory of wartime events is combined with modern requirements for conference halls. Its interior is formed on the principle of transformation, allowing changes in configuration depending on needs: scientific conference, concert performance, plenary lecture, or exhibition. Mobile chairs with 360° rotation and folding capability, acoustic panels with micro-perforation, and window systems with multi-layer glass units create a space with high acoustic qualities.

The laboratory suite also underwent significant changes. Trapezoidal tables were designed for group work: the shape allows circular, wave-like, and linear configurations that correspond to modern team-based learning methods. Materials for laboratory furniture were selected considering chemical resistance and ease of cleaning. Lecture classrooms are equipped with mobile modular desks and interactive display panels that promote the integration of digital technologies into the learning process.

Teachers' offices were also rethought. Ergonomic desks with height adjustment, local dimmed lighting, acoustic wall panels, and a small meeting area ensure a productive working atmosphere. Offices are organized into blocks, where storage places and lounge zones are provided.

On the building roof, a passage between the blocks was created, significantly shortening internal routes. This element increases logistical efficiency and makes movement between academic departments more convenient, especially in winter.

10. Innovative Glazing Units, Artificial Lighting, and Energy Efficiency

One of the key technological solutions of the reconstruction was the use of innovative glazing units with variable light transmittance. The window systems of the building are equipped with multilayer glazing units with a special selective coating capable of regulating the transmission of visible and infrared spectrum depending on the angle of light incidence. In case of intense solar radiation, the coating reduces the passage of infrared heat, which helps prevent overheating of the rooms in the summer period. At the same time, in winter these glazing units are able to reflect thermal radiation from internal sources back into the premises, increasing the building's energy efficiency by 25–30%.

A separate innovative solution was the use of dynamic glazing units installed in the assembly hall. They contain photochromic layers that react to the intensity of ultraviolet light: in strong sunny weather, the glass automatically darkens, reducing glare and heat load, while on a cloudy day — on the contrary, it remains transparent. This helps reduce the use of air conditioners in summer and decrease artificial lighting costs in winter months.

Artificial lighting of the building is based on the principles of multi-level adaptability. The main level consists of linear LED luminaires integrated into the ceilings of corridors and laboratories. Their color temperature automatically adjusts depending on the time of day: neutral daylight (4000–4500 K) ensures maximum concentration, while warm evening light (2800–3200 K) helps reduce fatigue. Local lighting is built into laboratory furniture, creating focal zones of maximum visibility for working with equipment. Touch panels allow adjusting lighting intensity, and presence sensors automatically reduce power in empty rooms.

A specific feature of the lighting system is that a significant part of its power supply comes from solar panels installed on the roof. The panels made of monocrystalline silicon have a high energy conversion efficiency — from 19% to 22%,

which ensures stable electricity production throughout the year. The inverter system allows accumulating excess electricity and directing it to power lighting in the evening. Thus, a closed energy consumption cycle has been implemented, significantly reducing the load on the central power grid.

Thanks to the combination of innovative light technologies, deep consideration of natural insolation, and integration of solar panels, the building forms a balanced energy regime. This not only reduces university expenses but also demonstrates environmental responsibility and a focus on sustainable development.

Conclusion

The reconstruction of the academic building has become an example of how a deep rethinking of an outdated structure can create a fundamentally new quality of educational environment. Analysis of the initial conditions showed that the building, erected in previous decades and additionally damaged by combat actions, had lost its ability to perform its intended functions. Planning issues, imperfections of engineering systems, lack of inclusivity, and significant structural damage indicated that simple restoration could no longer ensure compliance with modern standards. Therefore, the reconstruction became not so much a repair as the creation of a new architectural and functional environment using the remains of the existing structure as a basis for further transformation.

The proposed design solution demonstrates that the combination of the old frame with new spatial forms can open opportunities that were impossible within the original configuration. The use of a metal spatial structure made it possible to form a complex geometry and give the building a new character, while stabilizing its structural scheme. This transforms the damaged part of the building into an architecturally defining element that not only covers the loss but creates a new identity. This approach demonstrates the transition from an old model of educational space to a modern one.

An important result is the formation of a new internal environment that responds to the current requirements of the educational process. Thanks to the creation of atriums, transparent enclosure structures, and open spaces, the interior gained light,

airiness, and flexibility. Premises that were previously dark and closed have been transformed into adaptive universal zones suitable for both work and rest. The interior was enriched with natural greenery, ergonomic furniture, and modern elements of information infrastructure, which made it possible to create a psychologically comfortable and productive environment.

A significant role in the renewal of the building was played by the implementation of high-tech engineering solutions. Systems of controllable natural and artificial lighting, dynamic glazing units, and the use of renewable energy made it possible to raise the level of energy efficiency and comfort to standards necessary for intensive use of educational infrastructure. The organized area around the building complemented this transformation: the landscape became an extension of the architecture, reinforcing its dynamics and at the same time ensuring barrier-free access and functionality of the external space.

In summary, the reconstruction of the academic building was a process in which technical, architectural, ecological, and educational factors were combined into a holistic concept. The result is a building that not only restores its function but also embodies a new model of university environment — open, bright, inclusive, and flexible. The building is no longer just an infrastructure object; it has become a space that supports modern formats of learning, promotes social interaction, and demonstrates the ability of architecture to meet the challenges of time. In this project, reconstruction became a tool not for reproducing the past, but for creating the future, where space forms a new quality of educational experience.

1.2 Features of the location of housing units for migrants in the structure of settlement

The optimistic, but poorly regulated policy of multiculturalism, which emerged in Europe in the second half of the twentieth century, raises too many questions regarding the consequences of such a policy. Waves of riots, terrorist acts and illegal migration show the shortcomings of this approach and the need for clear regulation of migrant flows and the choice of location for their residence and integration into society. The feasibility of introducing quotas or limits on the entry of migrants into the state is quite debatable. The involvement of architectural means in this issue should be assessed in a balanced understanding of all the negatives and positives.

The task arises - what number of migrants in society is maximally permissible or desirable? We are talking about what percentage of migrants from the total number of citizens can coexist in a housing unit without creating discomfort for others and with the help of what architectural solutions such coexistence can be realized. An additional cautionary factor is to prevent the situation from being allowed to run its course and repeating the experience of creating national ghettos in European countries and the USA.

Before comprehending and proposing any architectural solutions, it is necessary to formulate a semantic chain: the quantitative component of migrants in society - the attitude of the country's citizens towards migrants and migration in general - the territorial nature of the settlement of migrants and the impact of migration on the surrounding environment of cities and villages.

The territorial nature of migrant settlement and the impact of migration on the environment of cities and villages.

When studying the segment of the migrant labor market in different countries, we distinguish individual specifics in each case, as a result - statistical figures for each individual country differ. The conducted research confirmed the demand in the

construction industry, manufacturing, agriculture, trade and consumer services [10, 11, 12, 13]

78% of migrants in Europe are of working age from 15 to 64 years. The gender structure of migrants is the same - 50% of migrants are male and 50% are female.

These statistics show how great the potential is for attracting migrants to the country's economy (as labor reserves in a wide range of sectors of the economy) and also that a significant proportion of migrants will live in close proximity to production or agricultural facilities. From this it can be assumed that there are two groups of migrants, which are characterized by different poles of attraction in choosing the location of residence and employment. Migrants can be conditionally divided into the following groups - a group of migrants associated with the urban environment (specialists and workers involved in production, construction, trade and the service sector) and a group of migrants associated with the agricultural environment (migrants involved in the agricultural sector). We are talking about the characteristic relationships between migrants and the territorial characteristics of working conditions (branches of the economy). Knowing the realities of the housing stock in the agrarian regions of Ukraine, namely in villages, the issue of resettlement of migrants does not pose great difficulties. This assumption is based on the fact that the population of villages is constantly decreasing, approximately by 0.7% per year, such phenomena as "dead" or half-empty villages are created [14] - thereby creating favorable conditions for a "wave of flooding" of villages by migrants. In this aspect, the recommended percentage of migrants in the settlement structure should be maintained, in order to avoid closed colonies of migrants or mass segregation relative to the indigenous population.

We should not forget about the uncertain final strategy for withdrawing villages and small settlements focused on the agrarian sector of the economy from the protracted social, demographic, and economic crisis. Under such conditions, it is extremely difficult to solve this problem using purely architectural methods and solutions in a complex.

■ The architectural aspect of integrating a migrant (namely, his or her dwelling) into the structure of villages requires a separate large-scale study and modeling of

possible development options, which will be based on agrarian, demographic, social, and economic research and possible development strategies for these territories.

The problem of resettlement of migrants in industrial areas (usually cities) requires study and recommendations for implementation. The developed solutions should be based on the aspect of harmonious integration of new housing, or adaptation of existing housing, into the already formed urban environment, which is characterized by:

- urban population growth as a result of internal migration
- high density of construction
- lack of housing stock to meet the needs of the population
- high market value of movable property
- prejudiced attitude towards possible neighborhood with migrants

■ The architectural aspect of the integration of a migrant (namely his/her dwelling) into the formed urban environment plays a key role in solving this problem. This aspect is manifested in the need to solve this issue at the city, district and house levels - in order to avoid enclaves, ghettos and creating discomfort for surrounding residents.

The above-mentioned accents of the problem of migrant settlement in an urban environment show the feasibility of a detailed consideration of urban and architectural-spatial conditions of integration. The following scales of analysis and modeling should be focused on in detail:

- the territory of the city and its districts
- residential buildings
- residential unit / apartment

Consideration of the problem of housing for migrants at the level of the city and its districts. The principle of dispersed settlement is based on the dispersion of migrants throughout the territory of the entire city, preventing the formation of areas of their accumulation, which gives rise to the phenomenon of ghettoization and degradation of the urban space or certain parts of it. If mistakes are made at this stage - with a

deepening into smaller scales, the problems will only increase and their solution will require significant resources.

The recommended indicator of the number of migrants in the space of Ukrainian cities of 7% (based on the average indicator of migrants in the structure of European society) should be implemented through the dispersed settlement of migrants. This type of settlement should be implemented both in the peripheral areas of the city and in areas located close to the city center (or to the centers - in polycentric city systems). It is allowed to create small working dormitories directly on the territory of enterprises where migrants are employed or in the territory where migrants carry out their work [15]. At the same time, the processes of "acclimatization" of migrants to the new urban environment and responsibility for its balance should take place, as described by Doctor of Architecture L. B. Kogan [16]. Uniform dispersed settlement throughout the territory of the entire city and neighborhoods allows for an even distribution of the load on the sphere of public transport, services, medical (polyclinics and hospitals), and education (kindergartens and schools). Of particular note is the effect of this method of resettlement, which results in the integration of migrant children into the environment of an already formed society, namely the formation of their identity with the country of residence, in our case Ukraine. Thanks to such methods, full-fledged citizens are raised, following the example of the "melting pot" of the countries of North America [17].

Theoretical models of housing for migrants.

The solution to the housing problem has a number of specific features, one of which is taking into account resettlement when justifying architectural solutions (we are talking about the need to prevent the risks of segregation of the residential environment or "ghettoization" of urban space, preventing the concentration of such structures and dwellings in a certain territory, or their settlement only by immigrants). The development of a typology of housing for immigrants can form the basis for the development of a concept for regulating migration flows, taking into account the interests of both urban planning and architectural design of buildings and structures. A concept that would ensure balanced economic and demographic development of the

country, national security, ensuring the needs of the economy in human resources, and their conditionally rational distribution across the territory. A fairly traditional approach in his works on this topic is shown by B. Fainoky. He sees housing for migrants in the form of mobile housing, which a migrant can purchase for insignificant, as for the housing market, money - mobile and with a sufficient level of comfort. Such housing can migrate, depending on where the migrant found work, or be parked in a systematic manner and form a kind of “trailer town”. This type of housing can be attributed to the capsule type of housing, because the main unit on which such housing is based is a residential module.

The experience in this matter of the Qatar Science and Technology Park (QSTP), which is engaged in scientific and applied research and the implementation of commercial technologies, together with the Virginia Commonwealth University (VCUQatar), is interesting. The project was only supposed to assess the feasibility of converting containers into housing for migrants, but in the course of the work more was done than was intended [19].

The result of this work was a project proposal with a implemented prototype of housing for migrants. The basis was the authors' desire to implement a new concept of a sustainable social model of specialized life. This planning solution is based on the use of modules, which in combination create a residential formation that has quite dynamic properties - if necessary, the area, structure, and configuration can be changed, so everything is based on the use of portable modules [18,19].

The project to develop and implement housing for migrants and workers provides for the use and provision of land for development both in urban environments and outside the city to serve the growing market in Qatar. The designers of this type of housing emphasize that they relied on a business model that demonstrates cost-effectiveness by reducing operating costs. The proposed living conditions in such housing meet and exceed international standards for living conditions for migrant workers.

Surprisingly interesting and alternative is the work of a group of architects from the South Carolina Institute of Architecture, USA (Caroline Dahl, Robert Cha, Hossein

Lotfi Shemirani) [19]. The project shows the idea of combining elite-class housing with housing for migrant workers and service personnel. The essence is that along the outer perimeter of the high-rise building there are apartments of high comfort, with their own network of vertical communications. The inner perimeter is occupied by apartments of lower comfort, with their own vertical communications and a set of auxiliary premises. Thus, there is no crossing of the flows of residents of comfortable apartments with people, migrant workers, living nearby. This proposal can be attributed to housing for small groups.

According to the designers, this system shows a symbolic connection between the core of cheap modular housing and the shell with expensive real estate. It is clear that the expensive outer shell will bring profits, and therefore it will be possible to reduce the prices of housing for migrants. If cheap housing is "wrapped" from the outside with expensive real estate, then the expensive, representative layer will be able to mask the workers from the outside world, accordingly, such a building will easily fit into any elegant environment.

One of the main tasks is the integration of migrants into our society. The problem of affordable housing concerns not only immigrants, it is also relevant for a significant part of Ukrainian citizens. This issue could be solved by providing small-sized housing for long-term rent, perhaps even with a review of existing sanitary and hygienic and construction and design norms and rules. Obviously, such housing should not serve as permanent housing. When settling them, it is necessary for tenants to understand that this project is aimed at long-term, but not permanent, rental of housing. Renting this type of housing should be a transitional step for migrants: from "specialized housing for migrants" to a full-fledged entry into the real estate market.

For a person who finds himself in difficult living conditions, obtaining housing on preferential terms is a catalyst for his integration into society.

Housing with low comfort indicators (and sometimes with low technical, economic and operational indicators) for short-term rental should be envisaged as a "forced home" in crisis living conditions. This is relevant for both immigrants and our own citizens [20].

Today, according to current state building codes and rules for designing and building housing, the implementation of such ideas and projects is impossible. Therefore, outdated norms should be reviewed, clarified and adjusted in accordance with the requirements of the new time.

Research on finding a solution to the problem of housing for migrants is being conducted, although not as actively as for other underserved segments of society. International experience in studying and experimentally designing housing for migrants was highlighted. When reviewing literary sources and foreign experience, it became necessary to study and compare the regulatory framework of our country, which is used in housing design, with a view to implementing similar projects in Ukraine.

In parallel with the research, interesting theoretical work of the Urban Land Institute (ULI) was discovered. ULI, the Urban Land Institute, is a non-profit research and educational organization supported by its members. Founded in 1936, we now have over 40,000 members worldwide, representing the full spectrum of land use and real estate development disciplines working in private enterprises and public services.

A multidisciplinary forum for real estate, ULI fosters an open exchange of ideas, information, and expertise among industry leaders and policymakers dedicated to creating better places. ULI has a particularly strong presence in the core European real estate markets of the UK, Germany, France, and the Netherlands, but is also active in emerging markets such as Turkey and Poland [21, 22].

That is, we see that this institution is interested in an interdisciplinary approach to the study of new phenomena in urbanism. It is interesting to study this issue at the intersection of the interests of humanism and economically justified exploitation of real estate in the context of economics/finance. In 2017, this institution created certain reservations of its own in resolving the issue of housing for migrants.

Before developing its own position on the topic of housing for migrants, it is necessary to study theoretical developments on this topic and the experience of creating and seeing housing for migrants. Among a large range of countries with their own

history of creating housing for migrants, attention is focused on European countries. This is due to common civilizational and cultural values with Ukraine.

The European Commission decided to distribute migrants among EU member states as one of the solutions to the migrant crisis in the EU [23].

The main initiator in the rapid deployment of the network that will receive migrants was Germany. As the practice of implementing this solution has shown, migrants were resettled in groups in locations within the territory of settlements or outside it. Resettlement takes place either in existing places of detention of illegal migrants [24], or new ones are created or existing premises are adapted to these needs [22]. The above-mentioned means indicate a strategy that dominates the issue of migrants' integration into a new environment (in this case, the EU society and some other European countries). Such a strategy is the dispersed distribution of migrants among European states. Instead, states implement concentrated resettlement of migrants. Resettlement takes place in the territory of certain administrative units, which is implemented according to the vision of state bodies.

A review of the experience of solving housing problems for migrants suggests the need to single out the experience of individual countries for the sake of systematicity. This clearly shows a not very wide range of means of implementing this type of housing.

The experience of European countries in the issue of migrant resettlement has shown a distribution of conceptual approaches to this issue. Three generalizing vectors have been identified: resettlement of migrants in social housing; resettlement of migrants in specialized housing; resettlement of migrants on the basis of the free market. With the possible interaction of certain vectors with each other, one of them remains a bright dominant vector. Typical examples are the experience of such countries as France, Germany, Great Britain, and Spain.

The implementation of housing for migrants is an important problem that should be resolved in the process of rebuilding Ukraine (in the post-war period) [25]. At the same time, one should not forget the expressiveness of the architectural image of this architecture[26].

As a conclusion: most foreign models of housing for migrants are variations of temporary mobile or modular housing, which can be implemented quickly and without large capital investments. The placement of specialized residential buildings for migrants in the existing urban environment occurs without taking into account the prospects of negative social consequences. Such housing policy often leads to the formation of emigrant enclaves, their ghettoization and the creation of discomfort for indigenous citizens, which generates a biased attitude of the indigenous population towards potential neighborhood with migrants.

In EU countries, three approaches are used to provide migrants with housing: in social housing and on the real estate market (on a par with indigenous residents of the country), as well as in specialized temporary dormitory-type housing to quickly solve the mass need while ensuring minimally acceptable conditions. Specialized housing is arranged mainly in large hall-type premises (hangars, gyms, pavilions, etc.), therefore it is at least incorrect to consider it a full-fledged type of housing. For longer stays in Germany, it is common practice to convert one or more large buildings from the existing real estate stock into residential buildings for a large number (dozens or even hundreds) of migrants exclusively.

It is important to avoid repeating mistakes previously made in various European contexts. Alongside successful examples of integrating housing for migrants into existing urban environments, there are also cases where such integration has been carried out unsuccessfully. Problems usually arise when newly built accommodation significantly contrasts with, or exceeds in scale and density, the established character of the surrounding urban fabric.

One example often referenced in public discussions concerns a large temporary housing complex constructed on the grounds of a former educational facility. Local residents criticized the development, comparing it to institutional infrastructure and expressing concerns about its proximity to existing homes. The project, consisting of a sizable number of temporary housing units, was introduced under emergency development provisions, which allowed the local authorities to proceed without additional planning approvals.

Some residents noted that the distance between the new structures and their property lines was substantially smaller than what is typically recommended by planning guidelines. The local authority responded by emphasizing that the buildings were intended for short-term use, could be dismantled when no longer needed, and that the project fell within the legally permitted timeframe for such developments.

Officials stated that once the exceptional development period expires, the status of the site would need to be reviewed through standard planning procedures. They also emphasized the importance of providing decision-makers with a complete technical assessment, including community feedback, before determining how the project should proceed in the long term [27].

Another scandalous example occurred due to the accommodation of migrants in the United Kingdom, in an old, unsuitable building.

An oversight body reported that a government ministry made several poor decisions under pressure to rapidly discontinue the use of temporary accommodation facilities for migrants. One such decision involved purchasing a disused institutional property that had previously been identified as having significant structural and environmental hazards.

According to the report, the amount paid for the site substantially exceeded the price for which it had been purchased only a year earlier. Despite assessments identifying the property as high-risk and unsuitable for immediate occupation, measures were undertaken to make it available as quickly as possible for migrant housing.

The ministry stated that its findings concerned actions taken under a previous administration and reiterated its ongoing commitment to reducing reliance on temporary emergency facilities. The pressure to act quickly intensified after an official public announcement pledged to phase out these arrangements within an accelerated timeframe.

The report noted that the acquisition decision was made by a small, high-level group of officials, even though no formal technical review or approval process had

been completed. It emphasized that the lack of thorough evaluation, combined with time pressure, contributed to the decision-making challenges that later emerged.

‘High risk’

In February 2023, an environmental review found a risk from “asbestos-containing materials in existing buildings and contaminated land”, while a comprehensive inspection report rated the conditions at the site as “high risk”.

An internal inspection report estimated that the renovation of the buildings on the site would require a substantial investment, although this projected cost was not included in the recommendations ultimately presented to senior decision-makers. Shortly afterward, officials publicly stated that the development would create a significant number of jobs, and the purchase was finalized later in the year.

The final acquisition price included an additional payment to the previous owners, who had reportedly misjudged the time necessary to complete the transaction. The property had been purchased by those owners the prior year for a considerably lower amount, and independent assessments suggested that redevelopment costs ranged widely, reflecting the site’s deteriorated condition.

The oversight authority concluded that the ministry’s attempt to secure the site within a very short timeframe led to incomplete due diligence and several flawed decisions. As a result, the government obtained a facility that was not suitable for its initial intended function and paid more than what independent valuations suggested.

The site had been intended to increase overall accommodation capacity during a period when the government was incurring high daily costs for temporary lodging and experiencing a sharp rise in asylum applications. The original plan was for the location to operate as an open, non-detained residential centre for a large number of individuals, allowing freedom of movement. However, within a few months, it was determined that the site could not adequately fulfill this role, and authorities announced that it would instead be repurposed as a closed facility.

No work has been carried out so far to make the site suitable for living. A local representative described the situation as unfair to residents of the surrounding area and

expressed regret that the site had not been acquired in an optimal way, noting that lessons had since been learned.

Another political group stated that the findings raised serious concerns about recent appointment decisions within the national leadership. They also criticised what they described as many years of inefficient public spending, saying the new report highlights further examples of financial mismanagement.

In mid-year, the responsible government department stated that no final decision had been made about how the site would be used and that it would review its broader strategy and needs before determining future plans. In response to the audit, the department emphasised that it had inherited an asylum system under extreme pressure, with a significant backlog of unresolved cases, and reiterated its commitment to ending the use of hotels and moving people to more appropriate and cost-effective accommodation options.

The department added that it would continue working to ensure the system operates more quickly, reliably, and fairly.

A parliamentary oversight committee announced that it would carry out an additional inquiry. Its chair noted that once again, rushed and poorly considered decision-making had led to overpayment for accommodation that ultimately proved unsuitable for its intended purpose [28].

The above-mentioned histories of problems and conflicts must be avoided and not repeated in the implementation of housing for migrants in Ukraine.

1.3 The promise and pitfalls of ai in predicting sustainable urban growth

Urbanization is accelerating, with cities expected to host over 10 billion people by 2080. This rapid growth intensifies challenges related to resource management, energy demand, pollution, and social equity. As cities contribute around 70% of global CO₂ emissions and consume 75% of energy, sustainable urban development has become essential. It focuses on balancing economic, social, and environmental priorities to build resilient and livable cities.

Artificial intelligence (AI), especially predictive modeling, offers powerful tools to address urban complexity. AI can optimize infrastructure, forecast energy use, manage traffic, and assess environmental risks. It also aids in climate resilience by simulating future climate impacts on cities. However, AI adoption faces challenges, including data quality, privacy concerns, and algorithmic bias.

This paper explores how AI, particularly predictive modeling, can support sustainable urban development. It highlights opportunities, challenges, and real-world applications, emphasizing the need for ethical and inclusive use of AI in future city planning. Sustainable urban development has become a key strategy for addressing the economic, environmental, and social challenges facing modern cities. It promotes a balanced approach to urban growth, aiming for cities that are resilient, inclusive, and environmentally responsible. Rooted in the United Nations' Sustainable Development Goal 11, this framework emphasizes meeting present needs without compromising future generations [29].

Economically, it supports adaptive, inclusive growth that aligns with ecological preservation. Environmentally, it tackles the high resource consumption and emissions of cities—despite covering only 2–3% of land, urban areas account for 75% of resource use and 70% of global emissions. Socially, it stresses equity, community participation, and inclusive urban policies to reduce inequality.

By integrating green infrastructure, renewable energy, and participatory planning, sustainable urban development offers a holistic model for building cities that

are both livable and future-ready. Achieving sustainable urban development remains challenging due to rapid urbanization, climate change, limited resources, and political and financial constraints. With urban populations expected to grow by 2.5 billion by 2050, cities face increasing pressure on infrastructure, energy, and the environment. This growth drives higher emissions, waste, and resource consumption.

Community participation and integrated planning—such as coordinated water, energy, and material use—are essential for building resilience. To address these complex issues, cities are turning to predictive tools powered by AI and big data. Unlike traditional planning, these tools offer real-time insights and simulate future scenarios, helping urban planners make informed, long-term decisions.

Machine learning models and citizen-generated data further enhance planning by forecasting trends and incorporating community needs. As data quality and computational power improve, predictive technologies are reshaping urban planning into a proactive, inclusive, and future-ready practice. Urban development is being reshaped by AI and predictive modeling, making cities smarter, more efficient, and sustainable. Predictive modeling uses historical and real-time data to forecast trends and support better decision-making in areas like traffic, energy use, and public safety.

This approach involves several key stages: collecting structured and unstructured data (e.g., from sensors and social media), selecting relevant features, choosing appropriate algorithms (e.g., regression, classification, time-series, or deep learning), and training and validating models to ensure accuracy. Techniques like PCA, ARIMA, and LSTM, along with tools like CNNs for image data, enhance the predictive power of these models [30]. Once validated, models are integrated into real-time systems, enabling applications such as dynamic traffic management or energy demand forecasting. As a result, predictive modeling plays a vital role in tackling urban challenges and advancing sustainable city planning.

Predictive modeling is central to smart city development, enabling proactive planning, efficient resource use, and risk management. Key applications include:

- **Traffic Management:** By analyzing real-time and historical traffic data, predictive models help forecast congestion and optimize routes, as seen in Singapore's ITS and Google Maps.
- **Energy Efficiency:** AI forecasts peak energy demands using weather, usage, and sensor data. Tools like Tesla's Autobidder and Barcelona's smart lighting improve energy distribution and reduce waste.
- **Public Safety:** Predictive policing uses crime data and socio-economic indicators to identify high-risk zones. Systems like Chicago's SSL and PredPol aid in crime prevention through better resource allocation.
- **Disaster Management:** AI models analyze satellite and climate data to forecast natural disasters. Examples include IBM's PAIRS Geoscope and Japan's earthquake alert system.

These applications show how predictive modeling enhances urban sustainability, safety, and resilience. As technologies like edge AI, 5G, and quantum computing evolve, they will further strengthen the foundation for fully autonomous, data-driven smart cities. AI Techniques in Predictive Modeling. Predictive modeling in urban development relies on key AI methods—**machine learning (ML)**, **deep learning (DL)**, and **reinforcement learning (RL)**—each suited to different tasks:

- **Machine Learning:** ML uses both supervised (e.g., regression for housing price forecasts, classification for flood risk zones) and unsupervised methods (e.g., clustering for crime hotspots, PCA for data simplification). Its flexibility and scalability make it ideal for diverse urban datasets.
- **Deep Learning:** DL, a more advanced ML approach, handles complex, unstructured data like images or sensor readings. CNNs support video surveillance and traffic monitoring, while RNNs/LSTMs excel in time-series tasks like energy or pollution forecasting. DL offers high accuracy but demands more data and computing resources.
- **Reinforcement Learning:** RL learns through interaction, making it well-suited for dynamic systems like adaptive traffic lights or smart grid energy distribution. It's highly adaptive but requires extensive training and is resource-intensive.

These AI techniques collectively enhance predictive accuracy and responsiveness in modern urban systems. Different AI techniques offer distinct advantages in urban planning:

- **Machine Learning (ML)** excels in analyzing structured data for tasks like real estate forecasting and urban zone classification. It is efficient and interpretable.
- **Deep Learning (DL)** handles unstructured data—images, video, sensor inputs—making it ideal for smart surveillance and environmental monitoring.
- **Reinforcement Learning (RL)** supports real-time decision-making in dynamic systems like traffic control but requires significant computational resources.

The optimal technique depends on the problem context, data type, and system constraints. Hybrid models, combining ML for preprocessing and DL for complex data, often enhance predictive performance in smart city projects [31].

LLMs are reshaping urban development by assisting in planning, policy design, and public communication. They analyze extensive regulatory and planning documents, summarize public feedback, and translate technical language for broader accessibility—promoting inclusive and transparent governance. LLMs also process vast unstructured data from IoT sensors, social media, and civic platforms, enabling pattern detection in sentiment analysis, complaint categorization, and service optimization. They help draft data-informed and multilingual policies, making public administration more responsive and citizen-focused. However, ethical concerns remain. LLMs can perpetuate biases embedded in training data, raise issues of transparency and accountability, and pose risks to data privacy and consent, especially when sensitive citizen data is involved. Their high computational demands may also conflict with sustainability goals, and unmoderated content generation risks information overload [32].

Supporting AI Technologies in Smart Cities:

- **Internet of Things (IoT):** IoT sensors provide real-time data on air quality, traffic, energy use, and waste, enabling responsive infrastructure management and sustainable urban growth.

- **Computer Vision:** Used in traffic monitoring, crowd management, and infrastructure inspection, it processes visual data from surveillance and drones to automate safety and maintenance tasks.
- **Natural Language Processing (NLP):** NLP extracts insights from social media, surveys, and reports. Sentiment analysis informs policy responsiveness, while chatbots enhance public service access.
- **Big Data Analytics:** Core to smart city functions, it integrates diverse data sources to forecast trends, optimize operations, and support disaster preparedness.

Under the *Smart Nation Initiative*, Singapore has integrated AI and IoT to optimize traffic, energy, and public services. Its **GLIDE system** uses machine learning to adjust traffic signals in real time, reducing congestion and wait times. Smart grids forecast electricity demand using historical data and weather patterns, enhancing energy efficiency and reducing costs through the *Open Electricity Market* initiative. Additionally, AI-powered predictive maintenance in the **MRT system** helps detect potential faults before they cause disruptions, ensuring reliable public transportation. Barcelona has focused on sustainability through widespread IoT deployment and big data analytics. Smart waste bins equipped with sensors send real-time data on fill levels, enabling AI to optimize collection routes and cut emissions. The **Sentilo platform**, an open-source IoT network, supports efficient **water management** by monitoring consumption, detecting leaks, and adjusting irrigation schedules in public parks. These innovations have led to significant reductions in both waste and water use [33].

These examples highlight that **predictive modeling is not universally applied**, but rather must be tailored to local priorities and infrastructure readiness. Singapore demonstrates the effectiveness of AI for optimizing complex urban systems, while Barcelona showcases how IoT can drive scalable, sustainable services.

AI Technique Suitability by Application

- **Structured data:** ML is preferred (e.g., real estate forecasting).
- **Unstructured data:** DL excels (e.g., image-based traffic monitoring).

- **Dynamic environments:** RL is ideal (e.g., smart energy or traffic systems), though training requires intensive simulations.

Together, these cases offer valuable models for other cities, showing that success in AI-driven urban development lies in **context-specific adaptation**, not one-size-fits-all deployment. A comparative framework summarizing these strategies can guide future smart city initiatives toward efficient and sustainable growth.

Rapid urbanization has introduced challenges such as rising energy demand, infrastructure stress, and environmental degradation. In response, sustainable urban development aims to balance resource efficiency, equity, and environmental responsibility. AI, particularly through predictive modeling, plays a pivotal role by enabling data-driven planning, resource optimization, and climate resilience. AI applications span traffic control, disaster mitigation, energy optimization, and waste management. For instance, predictive models support infrastructure planning and forecast environmental risks like floods and heatwaves, strengthening urban resilience. Despite its promise, the integration of AI faces key challenges:

- **Data Quality and Availability:** Urban datasets often suffer from incompleteness, fragmentation, and inconsistency, limiting model reliability.
- **Ethical and Social Concerns:** Issues such as algorithmic bias, lack of interpretability, and data privacy are significant, especially when sensitive information is involved.
- **Adaptability and Transparency:** Many AI models struggle to generalize across novel scenarios and remain opaque to users, limiting public trust and adoption.

Emerging solutions reflect these advancements. Napisa et al. proposed XAI methods for energy and traffic systems. Le et al. explored vision–language models like Remote CLIP for urban monitoring via satellite imagery. Yao et al. applied AI and GIS tools in Shanghai to optimize urban tourism logistics, despite challenges with privacy, real-time data, and geographic complexity. Additionally, AI-powered traffic systems are being developed to reduce congestion, emissions, and waiting times. Studies address on-street parking’s impact on flow, propose adaptive traffic signaling using stochastic ML, and explore region-based demand management strategies. Other

innovations include real-time monitoring of noise and emissions, as well as AI-assisted wildfire detection via satellite systems. These developments illustrate AI's transformative potential for smart, sustainable cities but also underscore the need for responsible, transparent, and inclusive implementation [34].

AI-driven predictive modeling holds transformative potential for addressing the multifaceted challenges of urbanization, including climate change, infrastructure stress, and resource scarcity. This section explores strategic pathways for overcoming key barriers to the effective deployment of AI solutions in sustainable urban planning. While theoretically scalable, AI solutions often depend on local infrastructural maturity, governance alignment, and resource availability. Practical scalability requires a supportive ecosystem that includes strong data governance, flexible operational frameworks, and skilled personnel. Implementation stages—from planning to deployment must be supported by coordinated stakeholder engagement, adaptable procurement mechanisms, and resilient digital infrastructure. Crucially, success is not merely technical but also depends on delivering measurable public value. Cities with limited digital capabilities often face difficulties deploying real-time, data-intensive AI systems. For example, models such as Singapore's AI-powered transport systems or NEOM's autonomous vehicles rely on advanced digital infrastructure features not universally accessible. Beyond financial investments, successful deployment requires a competent workforce, comprehensive data governance, and standardized, interoperable technologies.

Governance structures also influence AI adaptability. Centralized models like Singapore's Smart Nation initiative may not be replicable in decentralized or fragmented policy environments. High implementation costs remain a constraint, especially for municipalities with limited budgets. In such contexts, phased or modular AI adoption anchored in strategic planning and cost-effective applications can promote feasible and scalable integration.

Public–private partnerships (PPPs) offer viable pathways to address contextual challenges. Examples include Copenhagen Solutions Lab, a municipal innovation incubator, and Barcelona's Bicing system, which integrates digital infrastructure with

public mobility services. However, many smart city projects are still developed as peripheral “New Towns,” following modernist planning paradigms that risk promoting sprawl, car dependence, and unsustainable land use. Moreover, current literature often emphasizes off-the-shelf solutions for newly built cities, offering limited guidance on retrofitting legacy infrastructure in established urban areas.

To unlock the full potential of AI in sustainable urban development, several interrelated challenges must be addressed:

1. Data Quality and Availability. Reliable AI models require high-quality, timely, and representative datasets. Cities should invest in modern data collection tools such as IoT sensors and satellite monitoring. The adoption of standardized data protocols and open data policies enhances interoperability and collaboration. Institutionalized data cleaning and validation processes further ensure data integrity.

2. Ethics and Bias Mitigation. Unchecked, AI systems may reinforce societal inequalities. Ethical guidelines such as the EU’s Trustworthy AI principles should guide development and deployment. Inclusive datasets and multidisciplinary ethics boards can help ensure fairness, transparency, and accountability.

3. Security and Privacy. Given the sensitivity of data on mobility, health, and energy consumption, robust safeguards are essential. This includes encryption, anonymization, and secure cloud infrastructure. Regulatory frameworks like GDPR should serve as benchmarks, with transparent opt-in models to inform citizens about data usage.

4. Algorithmic Fairness. Methodological bias can emerge from skewed or incomplete training data. Fairness-aware ML techniques and regular audits can mitigate this. Diverse development teams, along with explainable AI (XAI), support holistic and transparent decision-making.

5. Integration with Legacy Infrastructure. Many urban systems operate on outdated technologies. Gradual integration starting with pilot projects can modernize infrastructure incrementally. APIs and middleware facilitate interoperability, while public incentives and private-sector partnerships can support broader digital transformation.

6. Transparency and Stakeholder Engagement. Opaque AI models undermine public trust. Interpretability should be a design priority. Tools such as public dashboards and participatory review processes enhance transparency, understanding, and civic accountability.

7. Addressing Resource Constraints. Cities in developing regions often face shortages in funding and expertise. PPPs and international development organizations can mobilize capital and technical assistance. Building local capacity through AI literacy programs for urban planners and policymakers is crucial for sustainable implementation.

As cities increasingly integrate artificial intelligence (AI) into decision-making processes, ensuring accountability and transparency becomes paramount—especially in applications that influence public welfare, urban planning, and resource allocation. Effective AI governance demands robust frameworks that align with ethical, legal, and operational standards to prevent issues such as algorithmic bias, misuse of data, or opaque decision-making processes.

One widely adopted mechanism is the Algorithmic Impact Assessment (AIA), a structured evaluation tool designed to assess potential risks, fairness, and societal implications of AI systems prior to deployment. Cities such as Amsterdam and Helsinki have institutionalized AIAs to publicly disclose key components of municipal AI projects, including data sources, intended purposes, and decision-making logic. These assessments promote transparency and accountability while enhancing public understanding of AI applications in urban contexts.

Another essential safeguard is the implementation of Human-in-the-Loop (HITL) oversight, which ensures that critical decisions—especially in sensitive domains such as welfare distribution, law enforcement, or zoning regulations—remain under human supervision. HITL frameworks help mitigate the risks associated with full automation and reinforce human agency in ethically complex scenarios.

To further advance transparency, open data practices and model interpretability have become key enablers of public scrutiny. The publication of non-sensitive datasets, coupled with thorough documentation of algorithms and predictive logic, empowers

stakeholders to interrogate and understand AI-driven decisions. Tools such as model cards and dataset datasheets enhance the explainability and auditability of AI systems, fostering trust among citizens and stakeholders.

Several cities have gone a step further by establishing AI ethics boards or accountability commissions, such as in New York City, where independent bodies assess the fairness and societal alignment of municipal algorithms. These institutions serve as governance checkpoints, helping to ensure that urban AI applications uphold public values and democratic principles.

Legal frameworks based on General Data Protection Regulation (GDPR) principles also play a pivotal role in upholding individual rights. Initiatives such as local data charters and urban data trusts embed privacy, consent, and data stewardship into urban AI strategies. In parallel, audit trails and system logging provide traceable records of AI actions, enabling post-deployment evaluation and facilitating redress in case of errors or unintended consequences.

Furthermore, public engagement mechanisms, including civic consultations and participatory design approaches, are increasingly recognized as critical for ensuring that AI implementations reflect local needs and values. These inclusive strategies enhance legitimacy, foster community trust, and ensure that AI solutions are not only technologically sound but also socially responsive.

By adopting these multifaceted governance strategies—spanning ethical design, policy innovation, technological transparency, and civic engagement—cities can responsibly harness the power of AI. In doing so, they can improve model performance, reduce systemic risks, and promote equitable outcomes that align with the broader objectives of sustainable and inclusive urban development.

While artificial intelligence (AI) has demonstrated significant promise in optimizing energy systems and reducing urban emissions, it is equally important to critically assess the environmental footprint of AI technologies themselves. The development and deployment of large-scale AI models often require extensive computational resources, resulting in substantial energy consumption and associated carbon emissions. To ensure that AI remains a net contributor to sustainability

objectives, its design and implementation must incorporate environmentally responsible practices.

The emerging paradigm of Green AI emphasizes the necessity of prioritizing computational efficiency and minimizing environmental costs in AI research and development. Under this framework, model evaluation extends beyond accuracy and predictive performance to include metrics such as energy use and carbon footprint. This holistic approach encourages the adoption of more sustainable AI design principles.

To reduce environmental impacts, public agencies and developers can implement various efficiency-enhancing strategies. These include the adoption of lightweight model architectures, the application of model pruning, transfer learning, and quantization techniques, as well as the deployment of AI systems on energy-efficient hardware or edge computing devices. Such methods can substantially decrease dependency on energy-intensive data centers and reduce operational emissions.

Furthermore, integrating carbon accounting tools—such as the Carbon Tracker or frameworks developed by Hugging Face—into the AI development lifecycle can enable carbon-aware decision-making throughout model training and deployment phases. These tools provide transparency regarding the environmental costs of AI systems and support efforts to align innovation with sustainability benchmarks.

Municipal governments can play a leading role by embedding sustainability criteria into AI procurement and compliance frameworks. This includes requiring vendors to disclose energy usage data, carbon intensity, and mitigation strategies as part of project proposals and operational guidelines. Such measures ensure that public-sector AI initiatives contribute to, rather than detract from, broader climate and environmental targets.

In the long term, transitioning toward energy-conscious AI design, life-cycle environmental monitoring, and sustainable digital infrastructure is essential to prevent AI from becoming an inadvertent source of environmental harm. A commitment to green AI principles enables cities to fully leverage the benefits of intelligent systems

while upholding their climate responsibilities and advancing equitable, low-carbon urban development.

Advancing Sustainable and Intelligent Urban Development Through AI: Opportunities and Environmental Considerations. While artificial intelligence (AI) presents transformative potential in optimizing energy systems, improving urban services, and reducing greenhouse gas emissions, it is essential to critically examine the environmental implications of AI itself. The training and deployment of large-scale AI models demand vast computational resources, often resulting in significant energy consumption and carbon emissions. For AI to be a net positive contributor to urban sustainability goals, its development and implementation must be grounded in environmentally responsible principles.

The Green AI paradigm highlights the importance of computational efficiency and sustainability in AI research and development. This approach calls for the evaluation of models not only based on traditional performance metrics—such as accuracy and speed—but also on energy usage and carbon footprint. Emphasizing ecological considerations encourages the use of lightweight architectures, energy-saving algorithms, and low-impact deployment strategies.

Public agencies and AI developers can reduce environmental impact by adopting practices such as model pruning, transfer learning, and quantization, as well as deploying systems on energy-efficient hardware or edge devices rather than central servers. These measures collectively minimize dependency on energy-intensive data centers and promote sustainable deployment.

Tools like Carbon Tracker and frameworks developed by Hugging Face enable the integration of carbon accounting into AI development cycles, facilitating more informed, climate-conscious decision-making. Cities can lead by example by embedding sustainability requirements in AI procurement policies, mandating transparency regarding energy use, emissions, and mitigation efforts.

Ultimately, transitioning to energy-conscious AI design, ongoing lifecycle impact monitoring, and the adoption of sustainable digital infrastructure is essential to prevent AI technologies from becoming unintended contributors to environmental

degradation. A firm commitment to these principles empowers cities to responsibly leverage AI for sustainable urban growth.

AI systems can significantly enhance transportation efficiency by reducing congestion, improving public transit performance, and optimizing traffic flow. Integration with real-time data from GPS, traffic sensors, and surveillance infrastructure enables dynamic, adaptive traffic control strategies. AI technologies support long-term urban planning by improving land use efficiency, infrastructure forecasting, and energy management:

- Urban growth modeling helps simulate sprawl, predict infrastructure demand, and guide zoning policies to prevent inefficient expansion.
- Smart energy grids powered by AI can predict consumption patterns, optimize energy distribution, and facilitate renewable energy integration.
- Smart building systems use AI to monitor energy usage, automate climate control, and reduce operational carbon footprints.

AI enhances user experience by enabling personalized services for both residents and visitors, increasing satisfaction, operational efficiency, and cultural accessibility.

- Smart tourism applications provide tailored travel experiences, real-time crowd management, and interactive guides based on visitor preferences.
- Citizen engagement platforms leverage chatbots, sentiment analysis, and recommendation engines to personalize services and improve government responsiveness.
- Multilingual and inclusive design ensures accessibility for diverse populations, fostering equity and public trust.

Disaster Risk Reduction and Crime Prevention. Predictive analytics can significantly improve urban resilience by enabling early interventions in disaster and crime management:

- Disaster preparedness systems utilize AI to forecast extreme weather events like floods and heatwaves, enabling early warning systems and emergency planning.

- Predictive policing tools identify high-risk areas and support strategic resource deployment, provided they are implemented with strong ethical oversight to avoid bias.

- AI-enabled surveillance systems must be paired with privacy protection measures and community consultation to ensure transparency and accountability.

AI is transforming healthcare delivery in urban settings by improving system responsiveness, resource planning, and accessibility: predictive health analytics help forecast disease outbreaks, track epidemiological trends, and guide public health policy; smart hospital systems use AI for patient flow optimization, inventory forecasting, and capacity management; telemedicine platforms powered by AI expand access to care, especially in underserved communities and remote areas.

To unlock the full potential of AI in advancing sustainable and livable urban environments, city governments must adopt strategic, ethical, and inclusive implementation frameworks. This includes:

- Investing in robust data infrastructure that supports real-time integration, model transparency, and secure data governance;
- Fostering cross-sector collaboration among technologists, urban planners, policymakers, and community representatives;
- Engaging citizens in participatory design processes to ensure AI systems reflect real needs, cultural contexts, and societal values;
- Implementing regulatory and ethical frameworks to safeguard against algorithmic bias, data misuse, and environmental harm.

When thoughtfully designed and equitably deployed, AI-powered predictive models can significantly improve urban sustainability, operational efficiency, public service delivery, and climate resilience. By embedding AI into a broader vision of inclusive and green urban transformation, cities can thrive amid the complex challenges of the 21st century.

The accelerating pace of urbanization introduces complex challenges that necessitate innovative, data-driven strategies for achieving sustainable development. This paper has examined the pivotal role of artificial intelligence particularly predictive

modeling as a transformative tool in addressing these urban issues. AI-powered models contribute significantly by enabling accurate forecasting of infrastructure needs, optimizing resource utilization, and enhancing urban resilience to environmental and socio-economic stressors.

Case studies from global urban contexts illustrate the practical impact of AI in domains such as transportation management, environmental monitoring, energy forecasting, and public service delivery. These applications affirm AI's capacity to strengthen urban governance and facilitate informed decision-making. Nonetheless, a comprehensive review of the literature reveals persistent obstacles, including data quality limitations, ethical dilemmas, algorithmic bias, privacy concerns, and the absence of standardized regulatory frameworks [35].

Despite these barriers, AI presents considerable opportunities from intelligent traffic control and disaster risk reduction to personalized services and adaptive healthcare systems. Realizing these benefits requires more than technological deployment; it calls for interdisciplinary collaboration, transparent governance, and robust ethical frameworks.

To unlock AI's full potential in sustainable urban planning, cities must adopt an integrated and responsible implementation approach. This entails strategic investments in data infrastructure, promotion of public–private partnerships, institutional capacity-building, and mechanisms for meaningful civic engagement. When underpinned by inclusive policymaking and ethically grounded innovation, AI can catalyze the transition toward smarter, more equitable, and environmentally sustainable urban futures.

1.4 Architectural formation of a new volume within an existing campus: reconstruction of university buildings

Introduction

The reconstruction of university buildings involves numerous challenges: the need to bring facilities up to modern educational, technical, and safety standards while preserving their architectural and historical value, minimizing costs, and reducing environmental impact. Due to the large building areas and diverse functions (lecture halls, laboratories, libraries, museums, dormitories), campus projects typically combine measures ranging from local structural reinforcement to full-scale reconstruction with partial replacement of building volumes. Research and practical case studies show that retrofitting and adaptive reuse are often more technically and financially efficient than demolition and new construction, especially when considering life-cycle cost and carbon footprint.

Successful renovation of university facilities creates qualitatively new spaces that enhance opportunities for learning, research, and interaction. As a result, the campus receives an updated infrastructure that meets modern requirements and ensures long-term functionality.

Possible approaches to restoration work:

- repair works - minimal interventions aimed at restoring cladding, windows, and roofing while preserving historical authenticity;
- structural strengthening - works focused on increasing the load-bearing capacity of the building or its specific structural elements;
- energy-efficient measures - comprehensive upgrades such as insulation of the building envelope, replacement of engineering systems, and integration of ventilation with heat recovery;
- adaptive reuse - transformation of the building's function ;
- partial reconstruction (replacement, extensions) - preservation of the main structures with the addition of contemporary volumes;

Each type of reconstruction has its own technical requirements and risks: conservation — risk of hidden defects; structural strengthening - interaction with aged materials; energy-efficient measures - balancing between preserving authenticity and improving thermal performance.

Each type of reconstruction has its own technical requirements and risks: conservation - the risk of hidden defects; structural strengthening - interaction with aged materials; energy-efficient measures - balancing between preserving authenticity and improving thermal performance.

From the perspective of engineering modernization, universities are among the most energy-intensive types of public buildings. High heating and ventilation demands of laboratories, server rooms, computer clusters, and lecture halls with large occupancy require the integration of modern, highly efficient systems. Reconstruction typically includes zoning of ventilation units, local heat recovery devices, smart systems controlling air exchange based on CO₂ levels and humidity, low-temperature radiator networks, or fully air-based systems. Electrical network upgrades involve implementing high-capacity channels for laboratory equipment, next-generation distribution boards, uninterruptible power supply systems, and structured cabling networks.

Key technical issues in the reconstruction of university buildings:

- incompatibility of materials (old masonry, lime mortars, modern cement-based repairs).
- non-compliance with modern fire safety and evacuation standards (need for additional exits, fire-resistant shafts, smoke extraction systems).
- seismic vulnerability - many historical buildings require major strengthening measures (monolithic diaphragms, new transverse shear walls, reinforced belts).
- engineering networks - integration of modern heating/ventilation/air-conditioning systems and IT infrastructure into limited spaces.
- architectural and historical preservation requirements — demand for minimal intervention into original materials and elements.

Practical tools and technical solutions:

- diagnostics of the technical condition: non-invasive methods (ultrasound, infrared imaging), testing of masonry samples, on-site load testing.
- structural solutions: installation of external or internal steel frames, strengthening of damaged elements, injection methods for masonry crack repair.
- façade retrofits: ventilated façades, internal insulation with controlled dew point, use of breathable materials for historical façades.
- modular ventilation units, local energy nodes (heat pumps, cogeneration), zoning of systems for phased implementation.

Modern university buildings function not only as educational institutions but as extensive scientific-educational complexes. This requires adapting the spatial structure to multifunctionality and changes in pedagogical strategies. The reconstruction of buildings includes the creation of hybrid learning spaces, open-type laboratory clusters, informal learning zones, makerspaces, prototyping workshops, and integrated research platforms. Planning solutions must ensure the possibility of rapid spatial transformation, modular furniture layouts, mobile IT stations, integration of multimedia support systems, and adaptive lighting.

The role of acoustic design is increasing. Libraries, large lecture halls, and group work environments require proper management of acoustic parameters -reverberation time, sound absorption, and sound insulation between rooms. During reconstruction, sound-absorbing panels, suspended acoustic modules, materials with variable acoustic response, and multi-layered floor/ceiling systems are used. A particular challenge is creating a comfortable acoustic environment in corridors and common areas, where noise levels are often highest.

Inclusivity is an integral component of the reconstruction of educational buildings. The need to create universal access includes reconfiguring entrances, installing elevators in buildings that historically did not have them, widening corridors and door openings, providing barrier-free sanitary facilities, reducing floor level differences, and integrating tactile and visual wayfinding systems. In older buildings, such measures often face spatial and structural constraints, requiring individual

technical solutions - external elevator shafts, mobile platforms, or localized reconfiguration of specific areas.

Reconstruction of universities is impossible without the modernization of internal mobility and wayfinding. As the areas of educational and research complexes increase, internal transport communications within and between buildings become especially important. Integrated navigation systems are implemented using indoor positioning sensors, QR-coded classrooms, multi-format signage, and digital information panels. Managing large flows of students requires optimization of vertical circulation: creation of new stairwells, widening of elevator lobbies, and redistribution of movement routes to avoid narrow “bottlenecks.” This is critical in buildings where historical layouts were not designed for modern usage intensity.

Architectural lighting plays an important role in identifying university spaces in modern reconstructions. Buildings are equipped with dynamic LED lighting systems that adapt to events - conferences, celebrations, presentations. Interiors use multi-zone, scenario-based lighting for classrooms, laboratories, and coworking areas. This enhances not only the aesthetic quality of the space but also the ergonomics of the educational process: proper light temperature and illumination levels directly affect user productivity and comfort.

University campuses form complex landscape-spatial systems, so reconstruction also encompasses the adjacent territories. Important measures include relocation of utilities, modernization of underground networks, installation of surface water drainage systems, strengthening of the soil base for new pedestrian areas, and creation of barrier-free routes. The role of landscaping and climate solutions is increasing: pergolas, green roofs, local phytofilters, and water features to regulate the microclimate in courtyards. Such interventions enhance campus resilience to overheating and create a comfortable environment between buildings.

A comprehensive approach to the reconstruction of university buildings allows the building to be considered not as an isolated system but as part of an integrated campus. Planning takes into account external communications, landscaping, accessibility, student flow mobility, and potential for future development. An

important aspect is the formation of a phased strategy: dividing works into stages to ensure uninterrupted educational processes, temporary repurposing of buildings, and the possibility of modular implementation. This approach minimizes risks and ensures adaptability at all stages of reconstruction.

Concept

In our concept, we combine preserved elements of the past with new contemporary solutions. Existing columns are retained as a material symbol of resilience — they withstood impact but did not lose their support. In our project, these columns become not just a structural element but a sign of memory and endurance — a reminder that the university continues to stand on its solid foundations, even after attempts to destroy it.

The new volume is made of light glass, symbolizing openness and the pursuit of development. It is protected from above by a steel suspended façade, reminiscent of armor — a symbol of strength and safety. In this way, we combine the memory of wartime events with a forward-looking vision, creating a space that reflects recovery and resilience. All these solutions form a modern volume, dynamically integrated into the campus space and highlighted by the steel suspended façade. The architectural composition of the new building is shown in Figure 1.



Figure 1: Exterior view of the academic buildings [made by the authors]

The master plan

The master plan envisions the formation of a coherent functional-spatial

complex, within which the university buildings — 7(1) and 11(2) — are connected by a two-storey passage (3). The location of the passage provides convenient pedestrian links between the buildings and integrates them organically into the existing campus structure.

The planned area has rationally organized zones with different functional purposes. A separate area is provided for car parking (7), a specialized section for technical vehicles (6) used in the university's educational and research activities, as well as technical facilities (5), which include a transformer substation, a boiler room, and an electrical switchgear room, ensuring uninterrupted operation of the complex's engineering systems. Such zoning allows for optimization of traffic flows and minimizes conflicts between pedestrian and vehicular routes.

An important component of the planning structure is landscaping, arranged along the pedestrian connections. Green plantings serve recreational and ecological functions, improve the microclimate, and create a comfortable environment for students and staff.

Beneath the planned passage, a standard fire truck access route is provided (3). The geometric parameters of the passage and the height levels comply with fire safety requirements and ensure operational access for emergency vehicles to all parts of the complex.

Together, these solutions provide effective interaction between functional zones, safe use of the site, and harmonious integration of new elements into the overall spatial structure of the campus. The master plan layout of the proposed site is shown in Figure2.

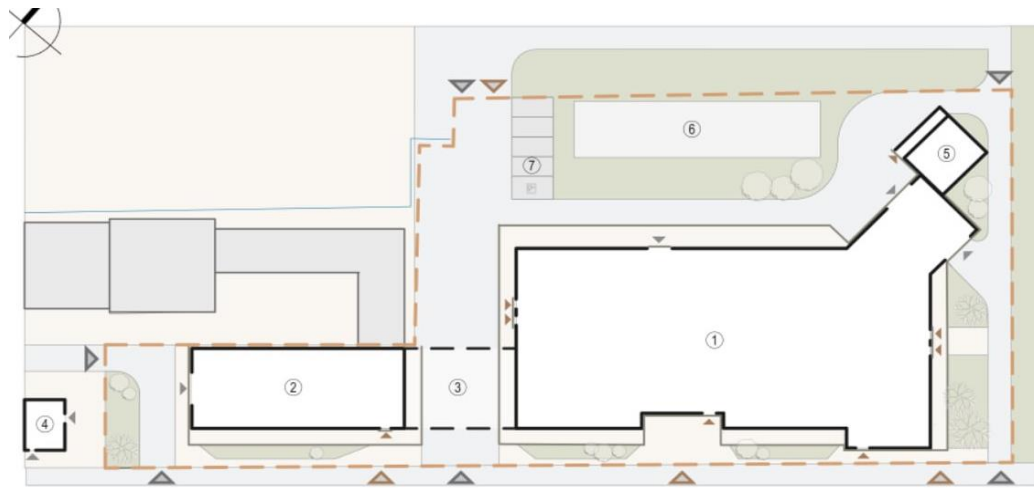


Figure 2: project master plan [made by the authors]

Planning decisions of the project

Workshops

The seventh building includes two large-scale educational and production workshops designed for laboratory work and practical exercises related to oil and gas extraction technologies. The spaces are equipped with appropriate technical installations, including pump units, drilling equipment simulators, and auxiliary mechanisms.

To enable the movement of heavy components of experimental equipment, both workshops are equipped with overhead cranes integrated into the load-bearing steel structure system. Gates are also designed to allow the equipment to be brought inside. This arrangement allows for installation, adjustment, and maintenance of equipment without the use of external machinery. The workshop layout can be seen in Figure 3.

One of the workshops features an observation balcony on the second-floor level (shown in Figure 4), providing visual supervision of the educational process and allowing students to observe demonstration operations under safe conditions. This spatial organization meets the requirements for visibility and openness in technical university teaching.

The structural system includes a perforated beam that supports part of the floor

slab. The use of a perforated profile reduces the beam's self-weight and optimizes load distribution without compromising its load-bearing capacity.

The exterior walls of the workshops are fully glazed. This scheme ensures maximum natural lighting of the work areas and creates visual openness — processes occurring inside can be observed by both students and visitors outside the campus. This aligns with modern trends of demonstrating technological processes in educational institutions. The workshop interior is shown in Figure 3, and the workshop floor plan is shown in Figure 4.



Figure 3: Interior view of the workshop from the east side [made by the authors]

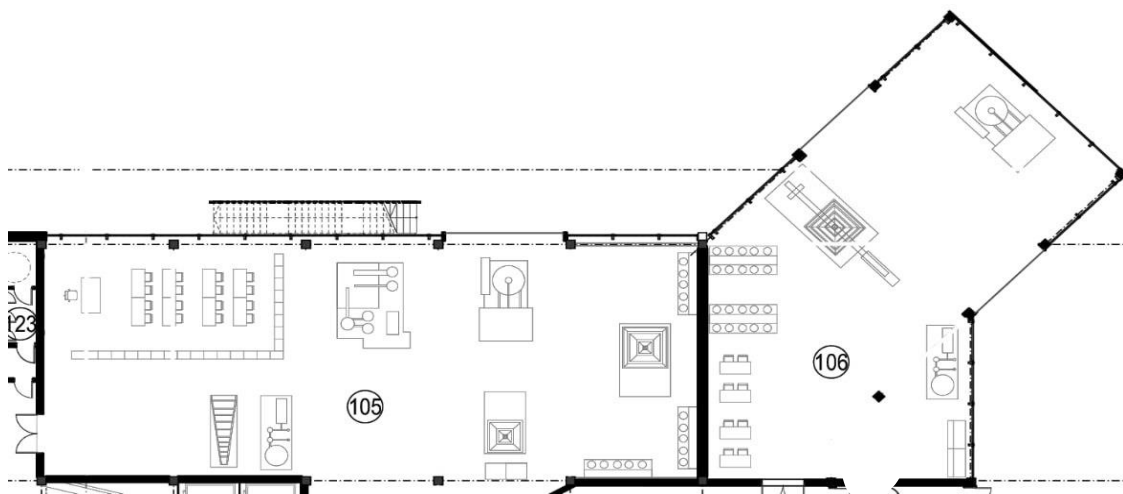


Figure 4: Floor plans of the workshops in Building 7 [made by the authors]

Laboratory

The 11th building houses an educational laboratory with gates that allow access for large-scale equipment. The space combines an area for experimental equipment and zones for conducting classes. Three sides of the laboratory are fully glazed, providing maximum natural lighting and comfortable conditions for educational and practical work. The laboratory floor plan is shown in Figure 5.

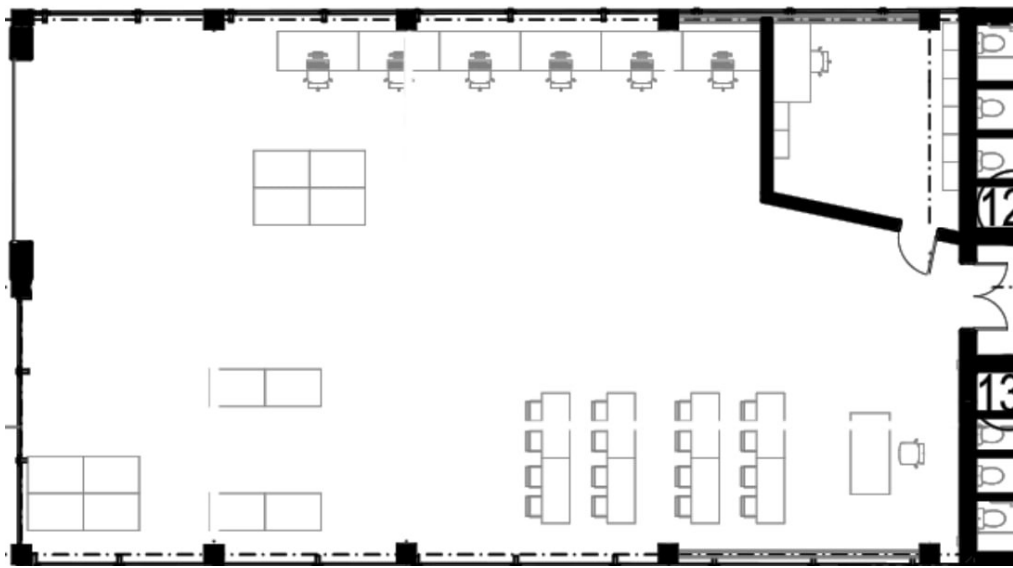


Figure 5: Floor plan of the laboratory in Building 11 [made by the authors]

Educational and Administrative Areas

The 7th and 11th buildings include a complete complex of educational and administrative spaces, ensuring an effective learning process and the organizational activities of the university.

The project provides 12 classrooms of various functional purposes, located exclusively in the 7th building and integrated into the volume of the passage between the buildings.

These include:

- 3 lecture halls designed for large-group classes and equipped with

modern visualization systems.

- 2 laboratory classrooms intended for practical research and work using specialized equipment.
- the remaining rooms are classrooms for practical exercises, organized for small- and medium-sized student groups.

All educational spaces are characterized by a high level of natural lighting, ensured by rational placement within the facades and the use of large glazed surfaces. Some classrooms are equipped with preparation rooms, allowing for efficient material preparation, equipment storage, and demonstration of practical lessons.

One classroom is integrated into the passage space between the buildings, facilitating efficient use of space and enhancing functional connectivity between campus learning zones. The main portion of the classroom stock is concentrated in the 7th building, which houses technical education spaces.

In the 11th building, the second floor contains exclusively administrative offices for departments, faculty, and management staff. The layout includes offices, meeting rooms, and auxiliary zones that ensure organized work for personnel and effective interaction with educational units.

Additionally, both buildings include a large assembly hall and a conference hall, used for scientific events, presentations, student gatherings, and public lectures. These spaces are equipped to meet modern multimedia and communication system requirements.

The spatial organization of educational areas located in different buildings of the complex is shown in Figures 6 and 7.

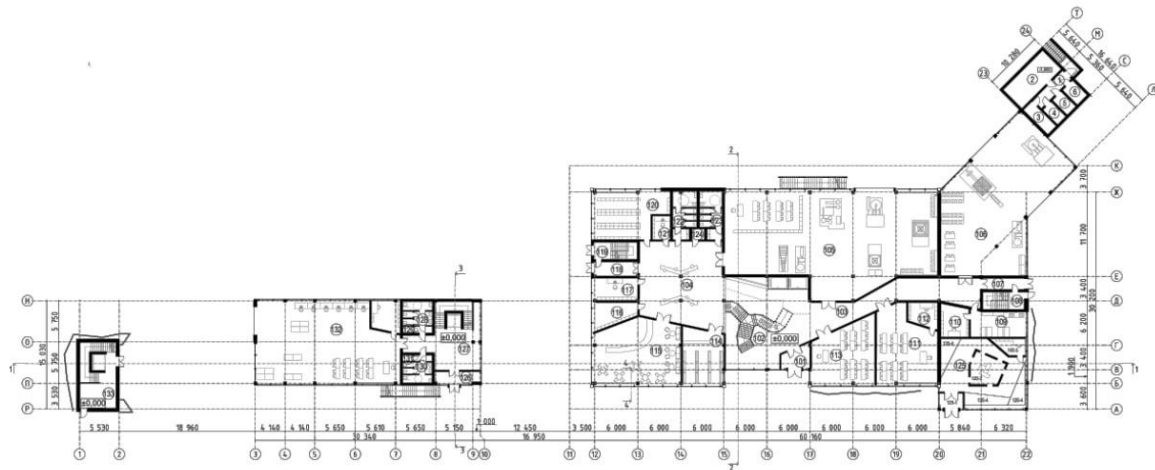


Figure 6: plan of the ground (first) floor [made by the authors]

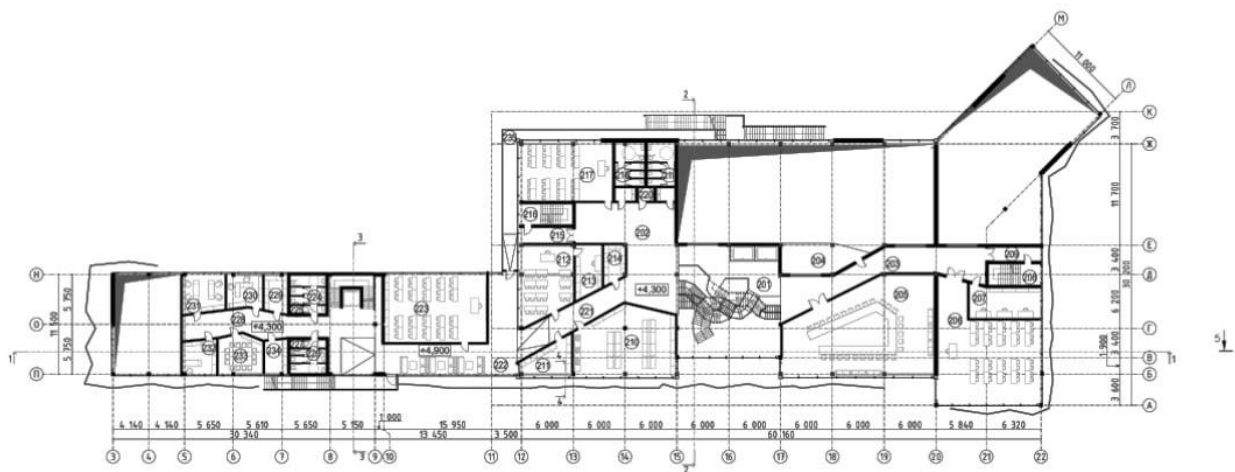


Figure 7: plan of the second floor [made by the authors]

Student Space

The student space occupies the third floor of the 7th and 11th buildings, as well as the passage between them, forming a single integrated zone for student life and learning. The layout combines different functional areas: open spaces for socializing and relaxation, individual workstations for independent study, and specially equipped rooms for group work and collaborative projects.

Organizing the student space over such an area allows for effective integration of educational and social functions, stimulating communication, idea exchange, and

the development of creative and research skills. Thus, the space becomes not only a place for learning but also an important element of student life, supporting interaction among students and creating favorable conditions for completing educational and project tasks.

The spatial solution of the student environment with multifunctional zones is shown in Figure 8.

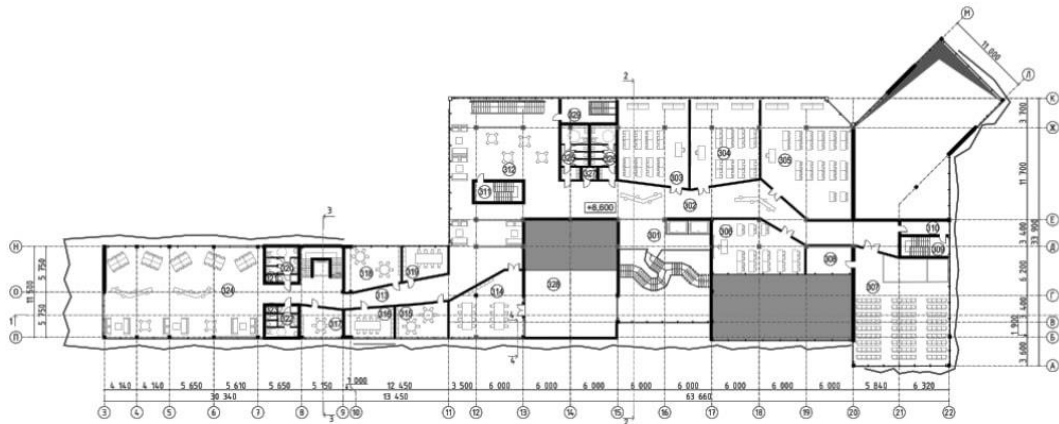


Figure 8: plan of the third floor [made by the authors]

Cafe

On the first floor, a compact café is provided, operating in a ready-meal service format. Food is not prepared on-site — products are delivered fully prepared. The café space is organized for quick service and short breaks, creating convenient conditions for relaxation and informal interaction between classes. The layout of the café interior with functional zoning is shown in Figure 9.

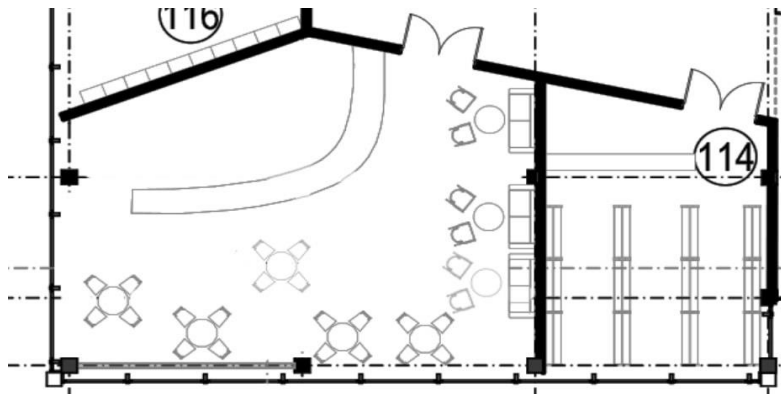


Figure 9: Floor plan of the café in Building 7 [made by the authors]

Museum

The missile strike museum is located on the first floor and has a separate entrance, providing open access for all visitors. Its space is organized around a quiet zone and an exhibition area arranged along the perimeter. This structure allows for a reflective experience of the event, combining an atmosphere of focus with an informative presentation of materials. The museum layout is shown in Figure 10.

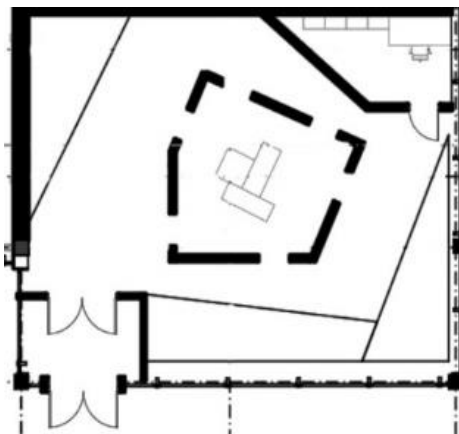


Figure 10: Floor plan of the museum in Building 7 [[made by the authors]]

As a result of the reconstruction, the campus receives a modern spatial identity and increased operational efficiency: pedestrian connections are optimized, universal accessibility is ensured, engineering systems are modernized, and the new architectural

form is harmoniously integrated into the existing environment. The updated complex not only restores the full functionality of the university after the destruction, but also brings it to a qualitatively new level of educational infrastructure, forming a sustainable and future-oriented academic center capable of meeting modern and promising challenges.

Functionally updated workshops, laboratories, and administrative premises significantly expand the university's capabilities in training specialists and conducting research in the field of oil and gas technologies, while flexible classrooms and multifunctional student space support modern pedagogical formats and teamwork.

Conclusion

The reconstruction of the complex not only restores the damaged spaces, but also rethinks their architectural essence, transforming the damaged buildings into a new integrated learning volume that symbolizes resilience and recovery. Preserved structural elements – in particular the surviving columns – become visible markers of continuity, while the new glass volume and steel suspended facade system reflect openness, technological progress and enhanced security.

The coordinated spatial and functional design of all elements of the complex forms a coherent architectural structure that supports the diverse needs of the university community. Classrooms, administrative offices, student spaces, the food zone, and the museum function as complementary components of a unified environment. They provide comfortable conditions for educational, research, communication, and social activities, creating a balanced space that combines learning, relaxation, and cultural reflection.

Thanks to thoughtful architectural logic and clear zoning, the complex becomes not only a place for acquiring knowledge but also an important element of the urban and social context, strengthening the connection between the university and the wider community.

1.5 Formation of the modern educational environment of the technical university during the development of the reconstruction project

Reconstruction of university buildings — is always more than a simple renovation of outdated premises. It involves a holistic review of how the educational space works, what functions it should perform today and what requirements it should meet in the future. In the case of campuses that combine classrooms, laboratories, science centers, libraries, museums and residential units, the modernization process turns into a complex task that requires coordination of safety, technology and cultural endurance.

One of the key challenges is the balance between current standards and the preservation of the architectural identity of buildings. Today's educational spaces must be inclusive, flexible, energy efficient and geared to digital technologies. However, the intervention should not cancel out the historical or symbolic value of the object, which today is increasingly becoming a separate component of the architectural concept.

Because of the scale and diversity of structures, university renovations typically combine point reinforcement of structures, renewal of utility networks, modernization of interior spaces, and partial volume replacement. An approach oriented towards adaptive reuse is increasingly predominant in international practice. Research shows that renovating existing buildings is often a more efficient and environmentally safer alternative to complete dismantling: it reduces CO₂ emissions, reduces life-cycle costs, and allows for faster campus reopening.

Successfully implemented projects create not just renovated premises, but a new architectural ecosystem. The campus receives a modern infrastructure that improves the quality of teaching and research, promotes interdisciplinary interaction and forms a comfortable environment for students, teachers and scientists. Reconstruction in this sense becomes an investment in the future of the university —, its competitiveness, stability and ability to adapt to global challenges.

University buildings today are considered not so much as separate objects of architecture, but as parts of a complex educational infrastructure that must function in the conditions of constant technological and social changes. Therefore, the reconstruction of large — buildings such as the №7 of one of the educational institutions — building turns into a review of their role in shaping the modern building environment. If in the study [48] attention was paid to the smaller-scale building №11, where the main issue was the restoration of a compact historical volume, then in the case of the building №7, the problem is expanding: it is no longer about local intervention, but about the complete modernization of a complex construction and technical system.

Large educational buildings combine different types of premises — from classroom areas to laboratory modules, server, library blocks and workshops. Therefore, each solution not only concerns a specific design or engineering network, but also the interaction between all functional elements. In such buildings, any updates inevitably affect the thermal regime, ventilation schemes, evacuation routes, static operation of ceilings and opportunities for adapting space in the future.

That is why the reconstruction of the №7 building does not involve the division of works into separate categories, but the integration of various technical approaches into a single modernization model. The issue of preserving authentic fragments is combined with the need to implement new engineering solutions that ensure energy efficiency and stability of operation in conditions of high load. Renewal of ventilation and heating systems, implementation of reasonable microclimate control, modernization of power supply for equipment that requires continuous operation, and optimization of internal communication routes are becoming critical for such buildings.

Large university buildings, unlike compact ones, often show accumulated structural problems that cannot be solved by point interventions alone. This may apply to weakened areas of the frame, loss of bearing capacity of old materials or non-compliance with modern safety standards. In such cases, the reconstruction involves

the creation of a new internal support system adapted to modern loads, or a partial redesign of the spatial structure of the building.

To accurately determine the required volume of interventions, a wide range of diagnostic methods — are used, from scanning with infrared cameras to testing individual fragments of masonry and analyzing the behavior of structures under load. The results of these studies form the technical basis for making project decisions and make it possible to predict the operation of the building after reconstruction.

As a result, the reconstruction of the building №7 becomes not only a process of restoration or repair, but a complex transformation that covers structural stability, engineering efficiency, energy optimization and preservation of architectural identity. Unlike the building №11 described in source [48], this facility operates as a large-scale infrastructure platform, and that is why it requires a different level of design: not local, but systemic, capable of transforming an existing building into an adaptive and modern part of the university environment.

The reconstruction of large university buildings today is not based on a set of separate technical solutions, but on a rethinking of the model of the educational space itself. Large buildings, like the №7 building, were created in the logic of the last century, when the educational process was rigidly structured, and the functions of the — premises were static. Modern campuses work differently: they form an environment that must respond to constant changes in the organization of education, the expansion of research programs and the growing role of teamwork. That is why renovation projects do not start with technical parameters, but with an analysis of how people, information, light and sound circulate in the building.

The most difficult aspect of updating large buildings is the flexibility of space. The building must withstand rapid changes in work scenarios: today — lecture, tomorrow — workshop, the day after tomorrow — experimental session. This requires a new approach to the structure of premises: walls should not dictate function, and engineering systems — limit the use of space. Modern classrooms and laboratory areas are designed so that they can be transformed without complex construction and

installation interventions — using mobile stations, quick-assembly partitions, replaceable furniture schemes and digital work modules.

Particular attention is paid to the acoustic environment, which is often a weak point in large buildings. The building №7 has a spacious central part and numerous corridors, which significantly increases the noise load. Solving this issue today is not limited to installing sound-absorbing materials; it covers the formation of a clear «acoustic topography», where each space has its own acoustic profile depending on how students and teachers use it. Thus, acoustics ceases to be a decorative detail and passes into the category of strategic characteristics of the building.

In old educational buildings, the question of accessibility is becoming more and more acute. Historical planning rarely took into account the needs of different groups of users, so inclusion in reconstruction projects becomes not only a technical, but also a spatial problem. It is not about adding ramps or technical platforms, but about forming a route that allows a person with any physical characteristics to use the building as naturally as everyone else. It depends on the geometry of the entrances, the width of the corridors, the logic of vertical movement and intuitive navigation. In the building №7, such questions become key due to its significant size and complex internal structure.

Modern universities are also increasingly relying on dynamic lighting, which determines the nature of space no less than planning. In large-area buildings, where natural light penetrates unevenly, it is important to create light scenarios that not only enhance architectural expressiveness, but also adapt to the type of activity. Classes, teamwork, experiment, presentation — each format requires a different level of brightness and temperature of light. In reconstructions, this becomes not an aesthetic option, but part of a pedagogical strategy.

The problem of reconstruction of large university buildings (such as the Building №7) requires not just engineering intervention, but a deep architectural and pedagogical synthesis. The old buildings were designed according to a pedagogical model, where learning was mainly frontal (teacher – audience) and disciplinedly isolated. Modern education requires interdisciplinary interaction, teamwork and

flexible, project-oriented learning. Architecture should become a tool for the realization of this new educational philosophy.

The transition from «Audience» to «Knowledge Lab must be made. The traditional relationship between lecture halls occupying a large volume and small offices should be revised. Reconstruction should maximise the scope for active learning and experimental activities.

Modular Learning Spaces are integrated areas that combine classroom, workshop and collaborative work areas. They must be equipped with mobile furniture that is easy to move and accessible network connection and power points. This organization of space destroys the rigid boundaries between theory and practice.

Cooperation studios are specially designed rooms that facilitate group work, equipped with interactive whiteboards, technologies for video conferences and acoustic solutions that ensure comfortable communication even in a large group.

The redevelopment should transform corridors, halls and disused corners into informal learning and recreation areas. These places, located between home and study, stimulate chance encounters, the exchange of ideas and social integration, which is critical for shaping an innovative environment.

The implementation of architectural and engineering solutions aimed at energy saving is the central axis of reconstruction. Building Envelope: The greatest impact is the insulation of external walls and roofs, as well as the complete replacement of old windows with high-quality energy-saving double-glazed windows. This minimizes heat loss and reduces the necessary load on heating and air conditioning systems.

The reconstruction of large roofs opens up opportunities for the installation of photovoltaic panels to partially meet the building's electricity needs. While this may be difficult from an engineering perspective, such a move increases the university's energy independence and underscores its commitment to sustainability principles.

Reconstruction — is not only about designs and engineering; it is about the quality of life of users. Architectural solutions directly affect the level of stress, productivity and creativity of students and teachers.

The visitor must understand the logic of the building without having to constantly refer to the maps. The renovation should create unique architectural elements or public spaces (atriums, galleries, terraces) that will become symbols of the campus, meeting places and emotional connection with the university. It enhances the sense of community and belonging.

The reconstruction of the №7 building is seen as an element of the wider university system, and the renewal takes place in stages and without interruptions in studies. This approach allows modern solutions to be implemented gradually, preserving the functionality of the building and creating the basis for further transformation of the entire campus.

Concept

The combination of metal planes and transparent elements that form the modern material language of the building plays a key role in the facade solution. The main volume is lined with vertical steel panels with a stable protective coating, which set a strict rhythm of the facade and ensure the durability of the structure.

A significant part of the plane is occupied by panoramic glass inserts made of energy-efficient double-glazed windows. They enhance natural light and create a visual connection between the interior and the space of the campus.

The main accent of the facade is a block lined with natural copper. Due to its physical properties, copper creates a deep multi-tone texture that changes under the influence of light and time. This material gives the building warmth, character and exquisite expressiveness, and also emphasizes its material quality and durability. The contrast between cold steel and living copper volume enhances the plasticity of the composition and makes the facade recognizable in the campus structure. (Figure 1)



Figure 1. Exterior view of the academic buildings [made by the authors]

The master plan

The master plan demonstrates the integral spatial organization of the territory, formed in accordance with the functional requirements of the educational complex and the principles of modern improvement. The main volume of the academic building is located in the central part of the site and is oriented parallel to the internal transport highway, which ensures ease of access and optimal interaction with the existing infrastructure of the campus. Adjacent to the main building is a laboratory block, which has a separate access area and a self-contained pedestrian approach, allowing the flow of visitors and students to be demarcated.

A system of walking routes is organized around the buildings, which provide barrier-free access to all entrances and form a consistent transition between the interior and exterior spaces. Next to the main facade, there is an access road with the possibility of a short-term traffic stop, and nearby there is a parking area with designated places for groups with reduced mobility. This organization of transport infrastructure allows for safe movement and separation of transit and local traffic flows.

The southern part of the territory is designed as a public space with a predominance of landscape improvement. The landscaping system is based on a

combination of decorative trees and group plantings of bushes, which form a comfortable environment for stay and short-term rest. Smooth curvilinear landscaping lines create a soft geometry for the space, enhancing its pedestrian character and contributing to the visual relief of the building.

The northern part of the territory retains a mostly natural character and acts as a green buffer between the university buildings. In this area there is a memorial or exhibition element that serves as a local compositional accent and diversifies the spatial structure of the master plan. (Figure 2)

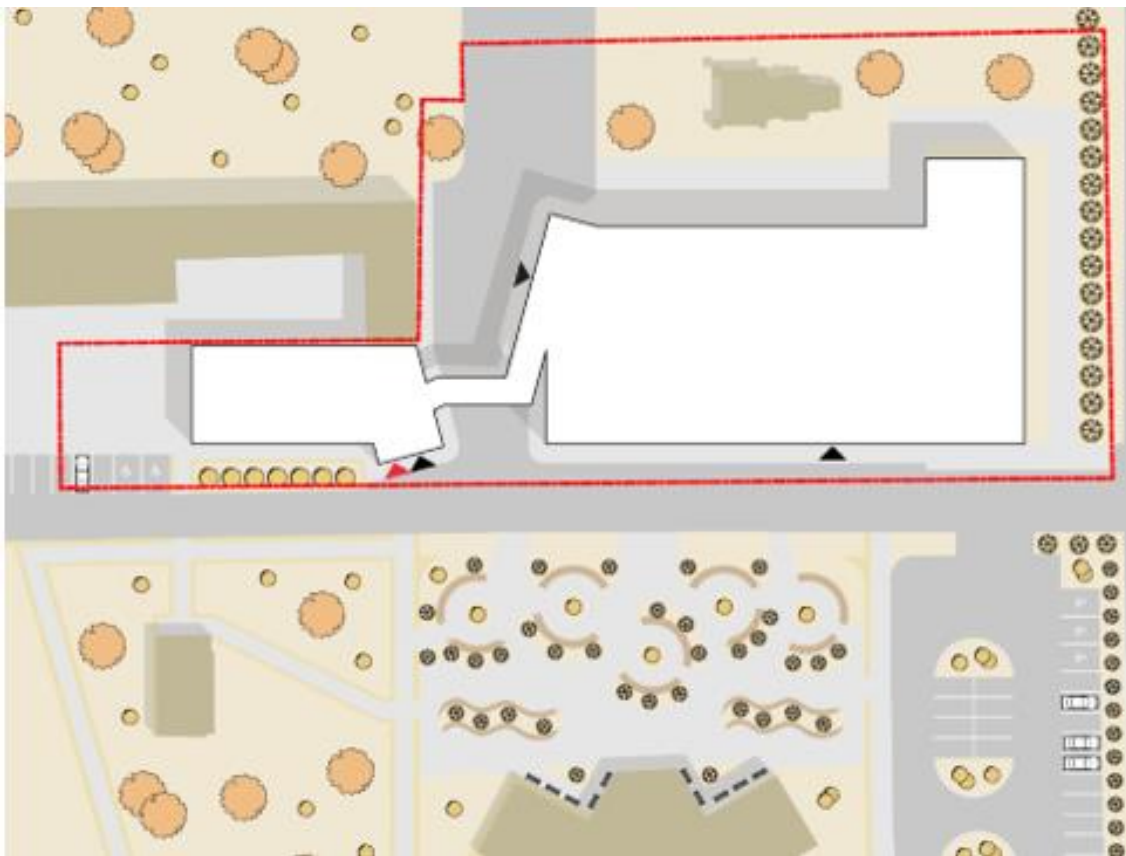


Figure 2. Project master plan [made by the authors]

Planning decisions of the project

The №7 building is formed as a complex of educational spaces that combine large workshops, lecture halls and areas for collective work of students. The two main workshop halls — are designed for practical classes, laboratory demonstrations and

project work. Their large open areas make it possible to place specialized training stands, assemblies, layouts and modules for technical experiments.

The halls are equipped to ensure the free transformation of space: mobile work surfaces, the possibility of zoning and conducting several types of classes at the same time. Due to the considerable height of the premises and the open layout, the workshops are suitable for both team classes and individual work of students. (Figure 3)

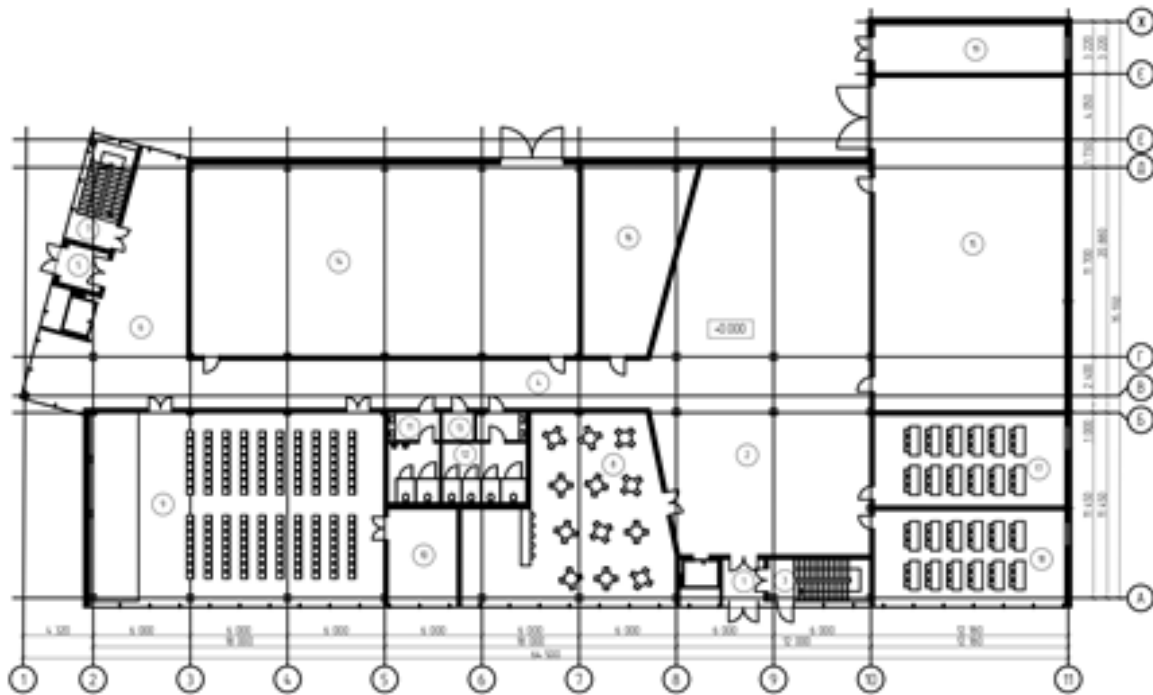


Figure 3. Plan of the ground floor [made by the authors]

The hall at the entrance to the building №7 (Figure 4) forms an atmosphere of openness and comfort from the first seconds of being in the building.

The central accent of the space is a green island composition with living plants, which creates a feeling of naturalness and serves as a place of rest and informal interaction. Surrounding it are padded ottomans and seats supporting the idea of a flexible and user-friendly space.

Wooden wall panels and warm light form a cozy atmosphere, while contrasting red columns add expressiveness and emphasize the architectural character of the interior.

With a combination of natural light, neutral materials and landscaping, the hall works as a modern public space where students can meet, wait for classes or simply relax between couples.

The hall also plays an important role in navigation inside the building, as the open two-level space visually combines the first and second floors, providing intuitive orientation and enhancing the feeling of spatial integrity. Glass fences and perforated ceiling panels contribute to maintaining the lightness of the interior and optimal light distribution.

The placement of vegetation in the central part of the hall not only improves the microclimate, but also acts as a natural «anchor, around which internal communications are organized. This approach corresponds to modern principles of biophilic design aimed at increasing the psychological comfort and productivity of users.

In general, the hall of the building №7 forms a multifunctional space that combines aesthetics, functionality and technology, demonstrating the holistic concept of building reconstruction as an open, flexible and needs-oriented environment for students and teachers.



Figure 4. Interior view of the academic buildings [made by the authors]

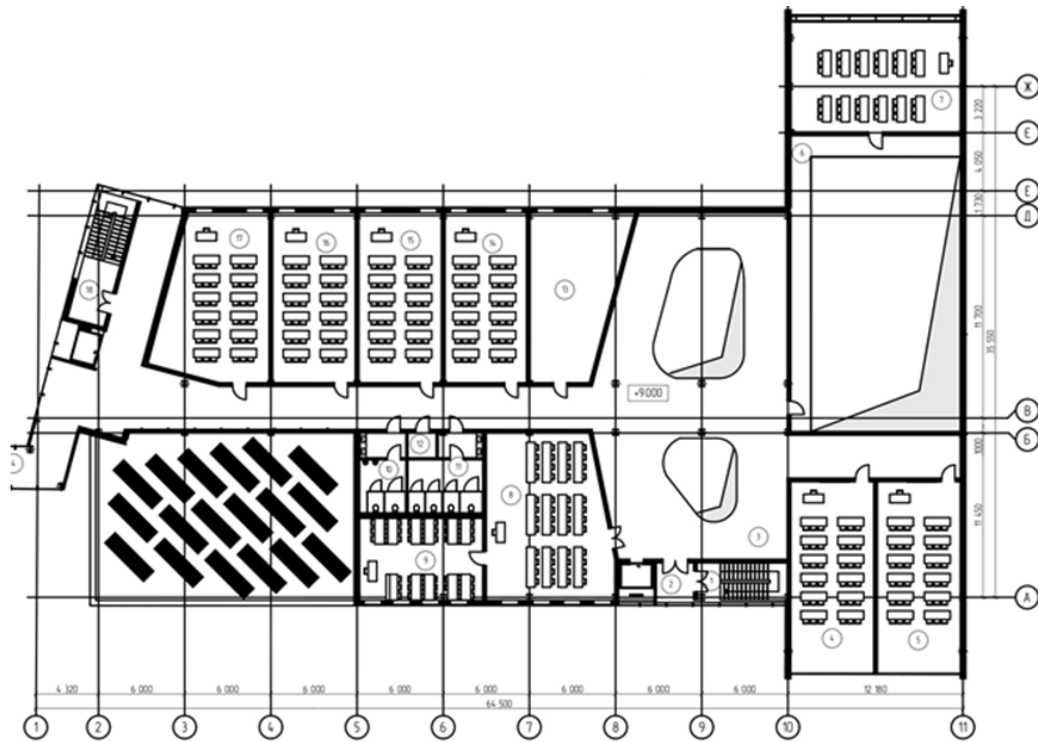


Figure 6. Plan of the third floor [made by the authors]

Cafe

In the structure of the first floor of the building, the №7 cafe (Picture 7) plays the role of an important social space that combines an educational environment with a comfortable recreation area. It is located next to the main hall, thanks to which the cafe becomes a natural crossing point of student flows and a convenient area for short breaks between classes.

The space is organized as an open and bright area with panoramic glazing that provides sufficient natural light and visual contact with the external environment of the campus. Mobile furniture allows you to easily adapt the space to different scenarios: from a quick snack to informal teamwork or meetings.

Functional zoning involves a separate part for cooking and dispensing dishes, logically separated from the seating area. This ensures ease of movement and comfort for visitors. The atmosphere of the cafe supports the general architectural language of the building — restrained materials, clean lines and light modern surfaces create a feeling of organization and technology.

Due to its location and openness, the cafe becomes not only a service element of the building, but also a place of interaction where students can work, communicate and relax, forming a living and flexible environment of the №7 building.

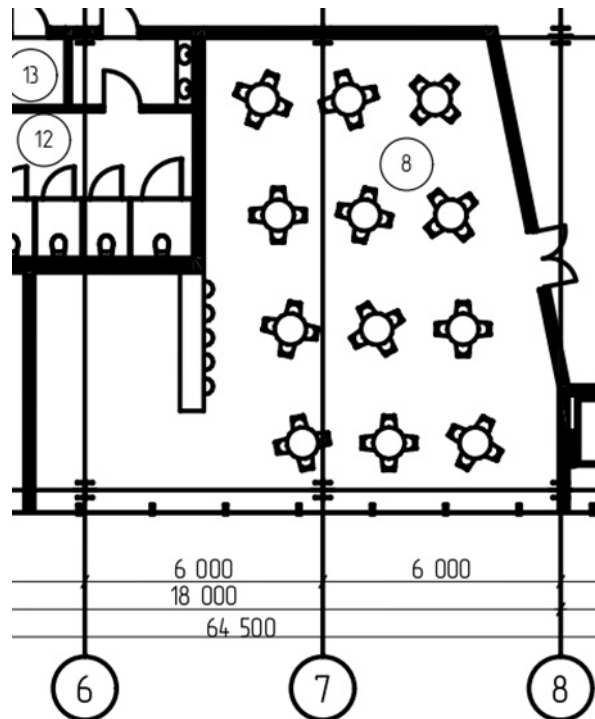


Figure 7. Cafe [made by the authors]

Conclusion

The reconstruction of the №7 enclosure demonstrates the effectiveness of a comprehensive approach to the renovation of educational buildings, when spatial, structural and engineering solutions are formed as an interconnected system. Established workshops, open study areas, a renovated hall and integrated seating areas ensure flexibility in the use of space and meet modern technical education requirements.

The proposed architectural and planning solutions contribute to improving the conditions of the educational process, optimizing the movement of users, increasing the comfort of interiors and integrating the building into the general structure of the campus. Renewal of facades, use of modern materials and strengthening of natural lighting form a complete image of the case, which reflects its new functional model.

Thus, the modernization of the №7 building not only ensures compliance with regulatory, operational and educational requirements, but also creates prerequisites for the further development of the university's infrastructure, increasing the quality of the educational environment and the competitiveness of the institution.

**SECTION 2. AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND
ROBOTICS**

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.2.1

2.1 Розробка методу дистанційного керування мобільним роботом за допомогою жестів

В даний час застосування мобільних наземних роботів охоплює цілий спектр областей від спостереження, пошуку та порятунку, розвідки, сільського господарства, військової справи та ін. У неструктурованих і небезпечних середовищах, таких як місце катастрофи, військові поля або хімічний спрей на сільськогосподарських фермах, досвід і інтелект оператора необхідні для прийняття складних рішень, що виходять за рамки автономності робота. У таких випадках дистанційна робота дозволяє оператору керувати роботом у досягненні складного завдання з безпечного місця. Ефективність, з якою оператор керує роботом, залежить, серед іншого, від обізнаності оператора про навколишнє середовище робота, якості каналу зв'язку, надійності системи керування роботом та досвіду людини-оператора. Наземні мобільні роботи складають основу цієї роботи, оскільки вони застосовні в багатьох сферах і в основному працюють у динамічних середовищах, які потребують додаткового керівництва з боку людини-оператора.

Застосування автономних мобільних роботів (АМР) – інноваційний спосіб підвищення ефективності транспортних операцій. На виробництві використання АМР обумовлює підвищення продуктивності праці за рахунок скорочення часу простою обладнання та усуненню помилок позиціювання об'єктів. Для сільськогосподарських підприємств мобільні роботи можна використовувати для інспекції полів (аналіз характеристик ґрунту, наявності шкідників, кількості та якості сходів та врожаю і т. п.) та обслуговування пташиних й тваринницьких комплексів. Широко застосовуються АМР для різноманітних проєктів для маломобільних людей: «робот-помічник», безпілотна кур'єрська доставка, інтелектуальні інвалідні візки, робота у медичних закладах під час пандемій.

Розвиток технологій дозволяє запровадити АМР для здійснення місій в екстремальних умовах (гасіння пожеж, роботи в зонах хімічного та радіоактивного забруднення, інспекція пошкоджених споруд, логістика в бойових умовах, саперні та інженерні роботи, евакуація поранених, вогнева підтримка і т. п.).

Розширення області застосування АМР обумовлює наявність у складі конструкції навісного обладнання (маніпулятор, ківш, бур, тощо). Виконання технологічних операцій вимагає узгодження руху мобільного робота вздовж траєкторії з переміщенням навісного обладнання відносно платформи. При використанні пристроїв керування у вигляді джойстика або пульта виникають складнощі в одночасному формуванні команд для шасі та навісного обладнання. У сучасних розробках керування багатозв'язними системами здійснюється по сепаратним каналам з використанням корегувальних пристроїв для відокремлення каналів. Для конструкцій АМР з навісним обладнанням перехресний нестационарний зв'язок каналів обумовлено динамічними особливостями об'єкту керування. Нестационарність зв'язку ускладнює визначення поточного корегувального пристрою, ускладнює конструкцію та призводить до запізнення команд.

Для здійснення місій в екстремальних умовах зазвичай застосовуються наземні мобільні роботи під дистанційним керуванням оператора в режимі «он-лайн». При цьому доцільно застосувати пристрій керування у вигляді двох рукавичок: ліва для керування шасі, а права для керування навісним обладнанням. Для впровадження таких пристроїв керування потрібно розробити систему команд керування у вигляді жестів. Однак, сучасні програмні та апаратні засоби дозволяють перерозподіл функцій між оператором та системою керування зі збільшенням автономності мобільних роботів. Для реалізації методу керування потрібно розробити: пристрій керування, інформаційну систему, систему команд, програмне забезпечення, канали зв'язку та засоби захисту інформації.

Результати такого дослідження можуть бути впроваджені у різноманітні

сфери життя: медицина, виробництво, сільське господарство, логістика, подолання наслідків природних та техногенних катастроф. Тому дослідження, присвячені розробці методів керування мобільним роботом за допомогою жестів є актуальними.

Постановка проблеми. У світі з швидко зростаючим рівнем автоматизації робототехніка відіграє все більш важливу роль у кожному аспекті людської діяльності. Відомі приклади повністю автономних мобільних роботизованих платформ, які можуть виконувати складні завдання без прямого керівництва з боку людини-оператора. Наприклад, в роботі [62] наведено методи управління мобільним роботом, який складається з мобільної платформи та роботизованої руки. Маніпулятор на рухливій основі співпрацює з робітником при спільному виконанні технологічних операцій. На основі кінематичного аналізу розроблено алгоритми для забезпечення в реальному часі небезпечної взаємодії робота та працівника. На основі взаємної проекції відносної швидкості людини і робота та їх спільного нормального вектору обчислюється загрозливий індекс для вибору найбільш вразливих частин тіла людини. Цей індекс розраховується для декількох можливих приростів швидкостей та прискорень. За допомогою системи штучного інтелекту система може адаптуватися до кінематичних параметрів працівника і «передбачати» подальші координати, швидкості та прискорення частин його тіла. Зазначено, що запропоновані методи керування на основі загрозливого індексу покращують ефективність безпечного співіснування людини та мобільного робота для змодельованого сценарію. Але залишилось не визначеним питання наскільки ефективним буде запропонований метод при дистанційному керуванні мобільним роботом. Яким чином здійснюється одночасне керування шасі та маніпулятором мобільного робота? Чи забезпечено захист каналу зв'язку при передачі команд? Який час автономної роботи мобільного робота? Визначені алгоритми для забезпечення в реальному часі небезпечної взаємодії робота та працівника доцільно застосовувати, але формування та передача команд потребують доопрацювання.

Застосування штучного інтелекту для керування мобільним роботом в

апріорно не визначеному робочому просторі, або в екстремальних умовах також є дискусійним. Слід зазначити, що в реальності переконливі результати застосування штучного інтелекту та машинного навчання в робототехніці досягнуто для місій в структурованому середовищі, без апріорної невизначеності та з вузько обмеженими контекстами. При використанні АМР в екстремальних умовах оператор приймає участь в контурі керування при реалізації функцій «відчувати», «планувати» та «діяти». Але достовірність інформації з датчиків, захист інформації та швидкість передачі команд впливають на прийняття рішення оператором. Таким чином, ефективність застосуванні АМР залежить не лише від кваліфікації оператора але й від технічної реалізації процесу керування. Можливості використання АМР значно розширюються завдяки бездротовому дистанційному керуванню.

В роботі [63] наведено результати досліджень бездротового дистанційного керування будівельного робота, який працює в небезпечних для людини умовах. Система дистанційного керування складається з центру керування, об'єкту керування – мобільного робота і інтерфейсу – дисплейного терміналу. Показано, що запропонована система надає відео у режимі «реального часу» та забезпечує точність керування роботом. Але залишилися невирішені питання, пов'язані з одночасним керуванням шасі та маніпулятором. Яким чином формуються команди на шасі та маніпулятор? Чи передбачено захист каналу зв'язку від зовнішніх збурень? За яким принципом створено зворотний зв'язок від маніпулятора до оператора при взаємодії з навколишнім середовищем? При контакті робочого органу маніпулятора з елементами робочого простору оператор має не лише зафіксувати момент взаємодії, але й «відчути» тривалість, силу, напрямок та площу контакту. Причиною контакту може стати не лише нестабільність робочого простору але й похибки в приводах та кінематичних парах маніпулятора. Для подолання таких труднощів слід застосовувати білатеральне керування. Запропонована система дистанційного керування потребує доопрацювання захисту каналів зв'язку та впровадження білатерального керування.

В роботі [64] наведено результати досліджень застосування рукавички для дистанційного білатерального керування маніпулятором. Але для функціонування АМР з маніпулятором в робочому середовищі з екстремальними умовами необхідно передбачити захист від спотворення команд керування. Розповсюдження запропонованого методу керування для шасі, дозволить застосувати пристрій керування у вигляді двох рукавичок: ліва для керування шасі, а права для керування навісним обладнанням.

В роботі [65] силовий зворотній зв'язок використовується не лише для інформування про контакт маніпулятора із зовнішнім середовищем, але й для підтримки рішень оператора. Але автори зазначають, що сила взаємодії та віртуальна сила наведення не можуть бути роз'єднані. Це ускладнює роботу оператора та обумовлює похибки позиціонування схвату.

В роботі [66] проведено аналіз декількох інтерфейсів для телекерування мобільним роботом. Зворотний зв'язок по силі реалізовано на основі інформації про дальність перешкод та поточний стан робота. Але залишилися не визначеними питання, щодо врахування характеристик об'єкту маніпуляцій у запропонованих методах керування. При роботах в екстремальних умовах маніпулятор повинен здійснювати технологічні операції з крихкими або вибухонебезпечними об'єктами.

В [67] наведено огляд робіт в галузі телеопераційних систем мобільних роботів з акцентом на архітектуру, канали зв'язку та засоби створення обізнаності оператора про ситуацію у робочій зоні. Зазначено, що використання якісної мережі та засобів візуального та силового зворотного зв'язку значно підвищують ефективність навігації та виконання завдань мобільними наземними роботами. Але навіть при створенні відчуття присутності оператора в середовищі робота залишилися невирішені питання, пов'язані з надійністю такої системи за умов збурень та спотворення сигналу. Причиною похибок можуть бути як зовнішні збурення так і перехресний вплив між каналами керування. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути захист інформації, сепарація каналів керування або дублювання при передачі команд.

При сепарації каналів керування можна окремо розглянути завдання керування мобільною платформою та керування маніпулятором на рухливій основі. В роботі [68] аналізуються, класифікуються та узагальнюються існуючі методи дистанційного керування мобільних роботів. Зазначено, що сучасні роботизовані транспортні засоби працюють в структурованому середовищі з високим рівнем автономності. Якщо місія має виконуватись в наперед не визначених чи екстремальних умовах, або складність завдання занадто велика доцільно застосовувати дистанційні методи керування. Але залишаються питання пов'язані з вибором пристрою керування та каналом зв'язку. Варіантом пристрою керування може бути звичайний смартфон.

У [69] досліджено дистанційне керування мобільним роботом із застосуванням різних пристроїв: смартфон, гарнітура віртуальної реальності та комп'ютер. Аналіз якості дистанційного керування здійснювався за чотирьома показниками: складність завдання, час виконання, успішність і кількість помилок. Всі ці параметри було об'єднано в єдину метрику користувача (SUM). Результати SUM для пристроїв становлять: на смартфонах – 54,9%, на пристроях віртуальної реальності – 79,5% і на комп'ютерах – 90,4%. Таким чином, на ефективність АМР впливає інтерфейс та конструкція пристрою керування. Однак, не з'ясовано вплив захисту інформації та каналів зв'язку.

В роботі [70] наведено результати впровадження керування мобільною платформою. Зв'язок мікроконтролера, датчиків та смартфона (Android) здійснюється за допомогою Bluetooth. Таким чином, з використанням спеціального програмного застосунку смартфон перетворюється на пристрій керування мобільним роботом. Але залишились питання, пов'язані з дальністю покриття Bluetooth що впливає на межу досяжності мобільного робота.

В статтях [71,72] описуються мобільні роботи, якими дистанційно керують зі смартфона за допомогою застосунку для Android. Передача даних здійснюється за допомогою Wi-Fi з'єднання між смартфоном і роботом. Зв'язок через Wi-Fi дозволяє збільшити дальність дій мобільного робота, але надійність каналу зв'язку буде залежати від зони покриття та наявності зовнішніх збурень.

Для робіт в екстремальних умовах надійність такого каналу зв'язку викликає сумніви.

Аналіз літератури доводить недосконалість існуючих методів дистанційного керування АМР. Проблема полягає в тому, що на ефективність АМР впливають засоби створення обізнаності оператора про ситуацію у робочій зоні, інтерфейс та конструкція пристрою керування. Bluetooth та Wi-Fi зручно використовувати, але виникають питання щодо меж досяжності, зовнішнього втручання та збурень при передачі команд дистанційного керування. Засоби візуального та силового зворотного зв'язку значно підвищують ефективність навігації та виконання завдань АМР з навісним обладнанням. Для розширення застосування АМР з пристроєм керування у вигляді рукавички потрібно розробити систему команд, програмне забезпечення та канал зв'язку для перетворення жестів оператора в маневри шасі.

Мета й задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методу дистанційного керування АМР за допомогою пристрою керування рукавичка. Формування команд здійснюється спеціальними жестами оператора. Передачу команд реалізовано із забезпеченням захисту від похибок та спотворення команд. Це дасть можливість підвищити продуктивність та якість технологічного процесу за участю АМР, забезпечити безпеку людини–оператора та покращити ефективність та живучість мобільних роботів при експлуатації їх в екстремальних умовах.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розробити метод дистанційного керування мобільного робота за допомогою «рукавички»;
- розробити систему команд для дистанційного керування АМР за допомогою «рукавички».

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є метод дистанційного керування автономним мобільним роботом змінюваної конфігурації.

Система команд має бути простою та зрозумілою для операторів з

мінімальною підготовкою.

Пристрій керування повинен: мати обмежену масу, достатній ресурс для автономної роботи, декілька каналів зв'язку та забезпечувати інтерпретацію керуючих впливів оператора.

Канал зв'язку для дистанційного керування повинен бути захищеним від зовнішніх збурень та спотворення сигналів.

Об'єктом керування є повнопривідний чотирьохколісний мобільний робот з елементами конструкції, рухомими відносно платформи. При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи [73]. Для виконання технологічних операцій мобільний робот оснащено навісним обладнанням: маніпулятор, ківш, бур, антена тощо (рис. 1).

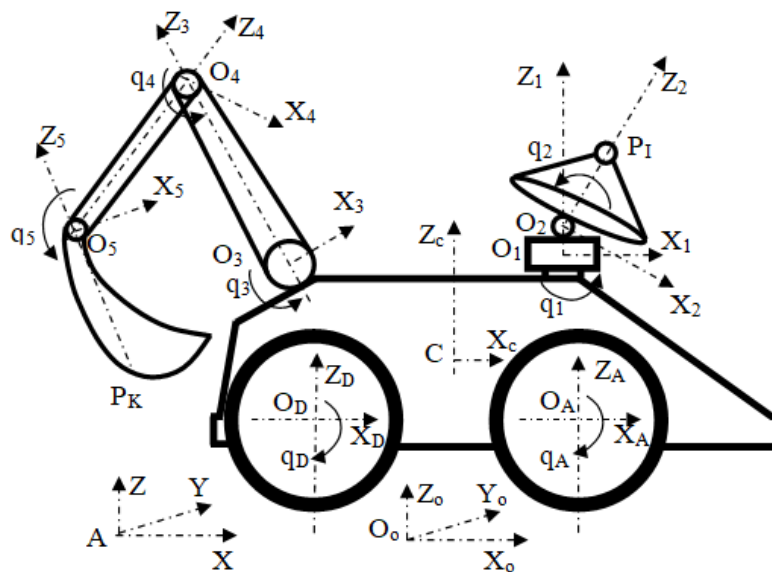


Рисунок 1. Схема конструкції автономного мобільного робота з навісним обладнанням [73]

Конструкція АМР змінюваної конфігурації побудована за агрегатно-модульним принципом, в залежності від завдання навісне обладнання можна замінити. Наявність елементів конструкції, рухливих відносно повнопривідної платформи, обумовлює нестационарність та недиагональність тензору інерції

відносно системи координат зв'язаної з центром мас платформи. Динамічні особливості конструкції обумовлюють нестационарний перехресний зв'язок каналів керування. Сепарація каналів та розробка корегуючих пристроїв для кожного варіанту навісного обладнання ускладнює технічну реалізацію системи керування.

Реалізація дистанційного керування АМР змінюваної конфігурації має два рівні: керування маніпулятором на рухливій основі та керування платформою шасі. Керування маніпулятором на рухливій основі розглянуто в [74], тож розглянемо метод дистанційного бездротового керування повнопривідною платформою.

Для розробки методу керування розглянемо розрахункову модель об'єкту керування – повнопривідну чотирьохколісну платформу АМР без навісного обладнання (рис. 2).

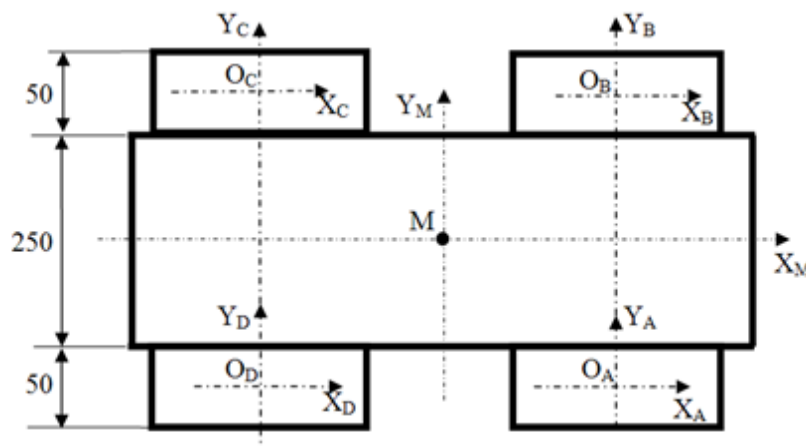


Рисунок. 2. Розрахункова модель платформи автономного мобільного робота [75]

Вважаємо, що керуючі моменти направлені вздовж осей системи координат, зв'язаної з платформою АМР [75]. Платформа має форму паралелепіпеду з рівномірним розподілом мас. Мотор - колеса мають однакові кінематичні та динамічні характеристики. Монтаж мотор-колес виконаний співвісно, без

похибок.

Об'єкт керування – повнопривідне чотирьохколісне шасі мобільного робота. Для опрацювання методу дистанційного керування за допомогою жестів в межах інжинірингової школи ГО «Ноосфера» була створена експериментальна модель мобільного робота з довжиною платформи 30 см. (рис. 3).

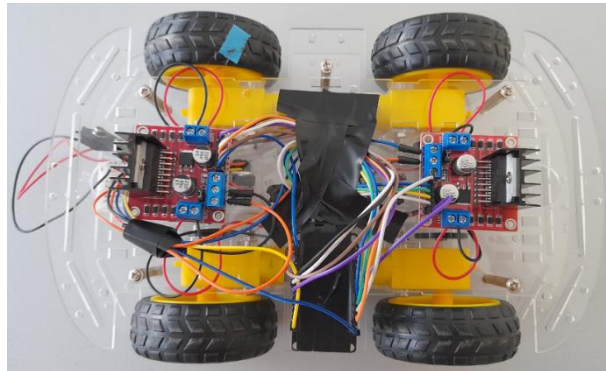


Рисунок. 3. Конструкція експериментальної моделі повнопривідного мобільного робота [Авторська розробка]

Систему керування моделі повнопривідного мобільного робота (рис.4) створено на базі мікроконтролера ESP 32 Devkit v1 [76]. При складанні системи керування повнопривідного чотирьохколісного шасі використано чотири мотор – редуктори з колесами [77]. Ці мотори мають високий коефіцієнт корисної дії, що дозволяє економно використовувати заряд акумулятора.

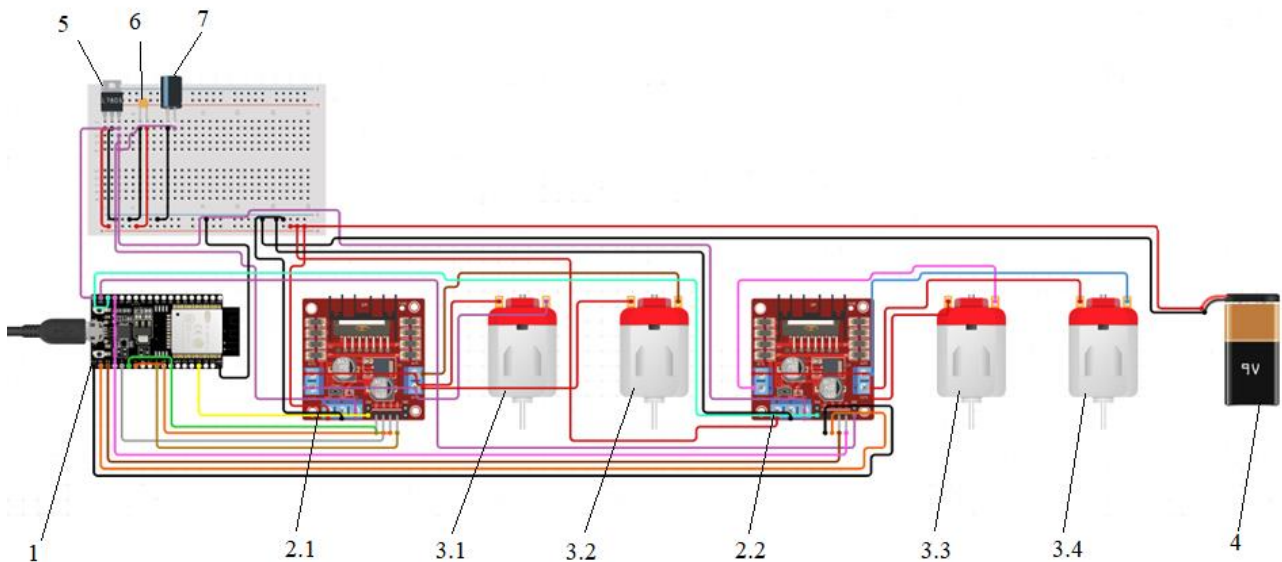


Рисунок 4. Схема системи керування повнопривідного чотирьохколісного шасі: 1 – мікроконтролер ESP 32 Devkit v1; 2.1, 2.2 – драйвер L298N; 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 – мотор – редуктор; 4 – акумулятор «Крона 9V» (6F22); 5 – стабілізатор напруги L7805; 6 – конденсатор Capacitor Ceramic 100nF; 7 – конденсатор Electrolytic Capacitor - 1uF/50V [Авторська розробка]

Драйвер двигунів на базі чипу L298N [78] має два незалежних канали для керування двигунами, що забезпечує незалежне керування двома колесами шасі з чотирьох. Це дозволяє контролювати рухи шасі вперед, назад та повороти.

Для забезпечення характеристик електричних ланцюгів до схеми системи керування додано стабілізатор напруги L7805 [79] та конденсатори. Живлення системи керування шасі забезпечено акумулятором «Крона 9V» (6F22).

Пристрій керування – рукавичка для дистанційного керування автономним мобільним роботом. Рукавичка для дистанційного керування забезпечує взаємодію між оператором та АМР (рис. 5).

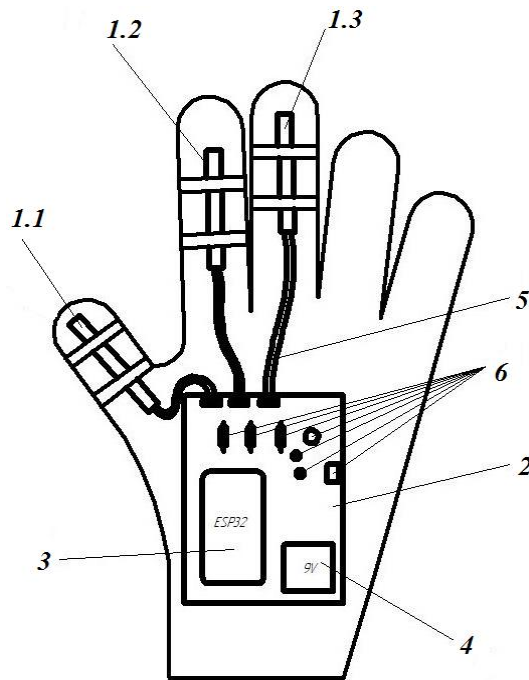


Рисунок 5. Схема пристрою керування «рукавичка»: 1.1, 1.2, 1.3 – датчик вигину (flex sensor 2.2"); 2 – друкована плата; 3 – мікроконтролер ESP32 Devkit v1, 4 – акумулятор «Крона 9V» (6F22); 5 – провідник; 6 – резистори; 7 – конденсатори [Авторська розробка]

Конструкція рукавички передбачає наявність вбудованих датчиків руху. У даній конструкції задіяні три датчики вигину (flex sensor) розміром 2.2", які розташовані на вказівному, середньому та великому пальцях рукавички (рис. 5). Датчик вигину це резистор, у якого величина опору прямо пропорційна куту вигину [80].

Метод дистанційного керування мобільного робота за допомогою «рукавички». Дистанційне керування АМР здійснюється при взаємодії мікроконтролерів об'єкту керування (шасі) та пристрою керування (рукавички).

Мікроконтролер рукавички 3 (рис. 5) виступає в ролі трансмітера. Він отримує сигнали від датчиків вигину 1.1, 1.2 та 1.3 (рис. 5). Мікроконтролер шасі 1 (рис. 4) виконує роль ресивера і отримує сигнал від мікроконтролера рукавички 3 (рис. 5). Бездротова передача сигналу може здійснюватись за трьома незалежними каналами одночасно.

Після отримання команди мікроконтролер шасі передає коди керування на драйвери 2.1 або 2.2 (рис. 5). Драйвер 2.1 містить два незалежних канали для управління мотор-редукторами А і В. Драйвер 2.2 містить два незалежних канали для управління мотор-редукторами С і D. Керована зміна швидкості та напрямку обертання коліс дозволяє забезпечити маневреність АМР.

Активізація керування настає при вигині трьох датчиків одночасно. Для керування напрямком руху АМР задано відповідні жести, утворені вигином трьох пальців:

- вперед – вигин вказівного пальця (зміна опору датчику вигину 1.2),
- назад – вигин середнього пальця (зміна опору датчику вигину 1.3),
- вліво – вигин вказівного і великого пальця (одночасна зміна опору датчиків вигину 1.2 та 1.1),
- вправо – вигин вказівного і середнього пальця (одночасна зміна опору датчиків вигину 1.3 та 1.2).

За умови, що жоден датчик не зігнутий, або комбінація виконана невірно, АМР зупиняється. Платформа не буде рухатись ні в якому напрямку, чекаючи коректної команди руху.

Система команд для дистанційного керування автономним мобільним роботом за допомогою «рукавички».

Рух вперед. Для здійснення руху вперед задіяні: датчик вигину 1.2 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вперед»: при згинанні датчику вигину 1.2 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.2 подається на gpiol3 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. Мікроконтролер передавач на основі цього сигналу формує код, який передається на мікроконтролер приймач за допомогою обраного каналу зв'язку Wi-Fi, Bluetooth або радіо. Мікроконтролер приймач, розташований на платформі АМР здійснює перетворення прийнятого коду у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час

експериментальних досліджень при русі вперед команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А `int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;`
- для двигуна В `int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14;`
- для двигуна С `int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;`
- для двигуна D `int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5.`

При переміщенні АМР вперед датчики вигину 1.1 та 1.3 не зігнуті, значення їхніх вихідних опорів знаходяться в межах 700–900. У відповідних гілках електричного ланцюга зміни опору не виникає. Це означає, що сигнал від датчиків вигину 1.1 та 1.3 не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух назад. Для здійснення руху назад задіяні: датчик вигину 1.3 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух назад»: при згинанні датчику вигину 1.3 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.3 подається на `gpio14` мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. Мікроконтролер передавач на основі цього сигналу формує код, який передається на мікроконтролер приймач за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймач, розташований на платформі АМР здійснює перетворення прийнятого коду у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D.

Під час експериментальних досліджень при русі назад команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А `int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;`
- для двигуна В `int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;`
- для двигуна С `int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14;`
- для двигуна D `int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5.`

При переміщенні АМР вперед датчики вигину 1.1 та 1.2 не зігнуті, значення їхніх вихідних опорів знаходяться в межах 700–900. У відповідних гілках електричного ланцюга зміни опору не виникає. Це означає, що сигнал від

датчиків вигину 1.1 та 1.2 не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух вправо. Для здійснення руху вперед задіяні: датчики вигину 1.1. та 1.3 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вправо»: при згинанні датчику вигину 1.3 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.3 подається на gpiol4 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. При цьому одночасно згинається датчик вигину 1.1. Сигнал від датчику вигину 1.1 подається на gpiol2 мікроконтролера передавача. Мікроконтролер передавача на основі двох вхідних сигналів формує код, який передається на мікроконтролер приймача за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймача, перетворює прийнятий код у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час експериментальних досліджень при русі вправо команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;
- для двигуна В int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;
- для двигуна С int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5;
- для двигуна D int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14.

При переміщенні АМР вправо датчик вигину 1.2 не зігнутий, значення його вихідного опору знаходиться в межах 700–900 і не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух вліво. Для здійснення руху вперед задіяні: датчики вигину 1.1. та 1.2 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вліво»: при згинанні датчику вигину 1.1 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.1 подається на gpiol2 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. При цьому одночасно згинається датчик вигину 1.2. Сигнал від датчику вигину 1.2 подається на gpiol3 мікроконтролера передавача.

Мікроконтролер передавача на основі двох вхідних сигналів формує код, який передається на мікроконтролер приймача за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймача, перетворює прийнятий код у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час експериментальних досліджень при русі вправо команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А $\text{int motor1Pin1} = 22; \text{int motor1Pin2} = 12; \text{int enable1Pin} = 23;$
- для двигуна В $\text{int motor1Pin1} = 25; \text{int motor1Pin2} = 33; \text{int enable1Pin} = 32;$
- для двигуна С $\text{int motor1Pin1} = 18; \text{int motor1Pin2} = 19; \text{int enable1Pin} = 5;$
- для двигуна D $\text{int motor1Pin1} = 26; \text{int motor1Pin2} = 27; \text{int enable1Pin} = 14.$

При переміщенні АМР вправо датчик вигину 1.3 не зігнутий, значення його вихідного опору знаходиться в межах 700–900 і не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Під час експериментальних досліджень проводилось 100 спроб для кожного виду траєкторії моделі. Результати дослідження середньої швидкодії моделі АМР наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Середня швидкодія моделі автономного мобільного роботу

Траєкторія		Програмне керування	Дистанційне керування з використанням		
			Канал 1	Канал 2	Канал 3
Лінійна	3 м	4,6 с	4,3 с	5,8 с	4,8 с
	6 м	9,1 с	8,8 с	10,4 с	9,6 с
Кутовий маневр	90°	1,2 с	1,0 с	1,6 с	1,2 с
	180°	1,8 с	1,6 с	2,0 с	1,8 с

Аналіз експериментальних даних доводить, що розроблений метод дистанційного керування забезпечує рухи АМР із заданою швидкістю.

Розробка методу дистанційного керування повнопривідною платформою мобільного робота (рис. 4) базується на застосуванні пристрою керування у вигляді рукавички (рис. 5). На трьох пальцях рукавички закріплено датчики вигину. Ці датчики реагують на рухи рук і жести, змінюючи опір відповідної гілки електричного ланцюга. За програмою зміна опору на вході

мікроконтролера ESP32 передавача (рукавички) перетворюється у код, який за допомогою Wi-Fi або Bluetooth передається до мікроконтролера ESP32 приймача (шасі). Приймач розташований на платформі AMP і у відповідності до отриманого коду формує команди на виконавчі приводи. Таким чином, жестам можна поставити у відповідність команди на приводи мотор-колес.

Електрична схема системи керування (рис. 4) містить стабілізатор напруги та конденсатори для забезпечення керованості та зменшення похибок. Джерелом живлення є акумулятор «Крона 9V» (6F22).

Представлений метод керування дозволяє здійснити просте та інтуїтивне дистанційне управління AMP. Спеціально розроблена система керуючих жестів для реалізації чотирьох напрямків руху AMP. Пристрій керування «рукавичка» дає можливість швидко провести навчання оператора, здійснювати дистанційне керування AMP для роботи у небезпечних для людини умовах або для виконання соціальних проєктів. Розроблений метод дистанційного керування забезпечує руху AMP із заданою швидкістю, продуктивністю та точністю позиціонування.

Перевагами запропонованого методу дистанційного керування є відсутність запізнення між жестами оператора та формуванням команд, наявність простого інтерфейсу та забезпечення захисту інформації, за рахунок дублювання сигналу за трьома каналами зв'язку. Це досягається за рахунок спеціально розробленого пристрою керування та програмного забезпечення.

При роботі в екстремальних умовах на канали дистанційного керування можуть діяти засоби радіо-електронної боротьби, джерела природного або штучного електромагнітного випромінювання і т. п. Для забезпечення ефективної роботи представленого методу керування передбачено передачу команд по трьом незалежним каналам зв'язку. Вибір робочого каналу здійснюється мікроконтролером шасі за спеціально розробленим алгоритмом з метою зменшення похибок та спотворення сигналів.

Недоліком запропонованого методу є те, що оптимальність синтезованої траєкторії руху платформи залежить від обзору робочої зони. Для керування діями робота у режимі реального часу оператору потрібен візуальний контроль

наявних перешкод або карта місцевості.

Для збільшення ефективності запропонованого методу систему керування потрібно доповнити датчиками та системою технічного зору. При таких доопрацюваннях оператор отримує повну інформацію про робочу зону, наявність перешкод та зовнішні впливи. Доповнення системи керування елементами відеоспостереження розширює області застосування АМР та обумовлює доцільність використання запропонованого методу дистанційного керування для роботів, які працюють у шкідливих чи небезпечних для людини умовах.

Висновки

1. Розроблено метод дистанційного керування мобільним роботом за допомогою «рукавички». Запропонований метод реалізує три канали управління АМР для забезпечення захисту від зовнішнього впливу, похибок та спотворення команд. Вибір робочого каналу здійснюється мікроконтролером за спеціально розробленим алгоритмом. При зовнішніх впливах або виявленні перешкод у робочому просторі оператор миттєво реагує та приймає управлінське рішення.

2. Розроблена система команд дистанційного управління АМР за допомогою «рукавички» є розвитком нового інтерфейсу та технології взаємодії між людиною та мобільним роботом. Це дозволяє виконувати складні технологічні операції та зберегти функціональність робота, незважаючи на апіорну невизначеність та екстремальні умови робочого простору. Формування сигналів для приводів робота проводиться на основі визначення кутів вигину пальців оператора. Маса і габарити пристрою не обмежують рухливість кисті оператора, що дозволить запровадити цей метод для реабілітації та покращення якості життя людей з інвалідністю.

Недоліком запропонованого методу є залежність точності позиціонування, маневреності та вибору оптимальної траєкторії робота від апіорної інформації про робочу зону. У подальших дослідженнях необхідно доповнити конструкцію АМР системами технічного зору для забезпечення ефекту присутності оператора в робочій зоні. Для ефективного дистанційного керування АМР необхідно

розробити алгоритм побудови цифрової моделі робочої зони.

Подяки

Представлені у статті результати отримані авторами під час досліджень за темами 0119U101151 «Прикладні дослідження в механіці та мехатроніці», 0121U108950 «Розробка вимірювальних перетворювачів з цифровим виходом», 0122U001287 «Математичні методи та алгоритми обробки даних в системах автоматизованого управління та захисту інформації».

SECTION 3. CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.3.1

3.1 Purification of aqueous media from Rhodamine B dye using a Fenton-like process

According to the Industry ARC (industry research council) report, the global production of Rhodamine B dyes during the period of 2022-2027 is estimated at \$232.5 million [81]. Rhodamine B is a chemically stable, well-soluble in water xanthene dye (its solubility is 50 g/L at 25 °C), which is widely used in the chemical, pulp and paper, paint and textile (for dyeing leather, silk, wool, cotton, etc.) industries. Its long-term effect on the human body may be accompanied by potential carcinogenic and mutagenic effects [82]. The chemical stability of the structure of rhodamine B (Fig. 1) results in its low ability to degradation by biological methods.

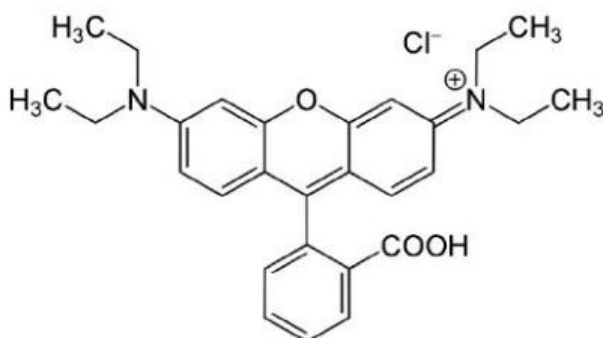


Figure 1. Chemical structure of Rhodamine B [made by the authors]

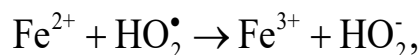
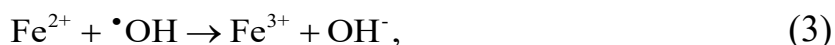
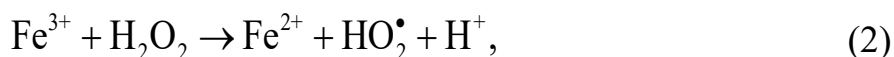
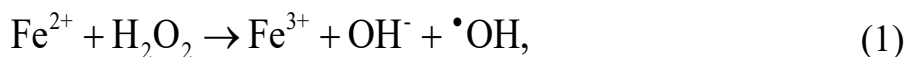
A feature of the development of modern water purification technologies is the use of advanced oxidation processes for the removal of harmful organic pollutants from aqueous media. Advanced oxidation processes belong to innovative and environmentally friendly methods of water purification from various harmful substances [83], including dyes. The essence of advanced oxidation processes lies in the generation of highly reactive intermediates, known as secondary oxidants (most commonly, reactive oxygen species), as a result of the activation (catalytic or in physical fields) of primary oxidants (hydrogen peroxide, ozone, persulfates, etc.). The

most common reactive oxygen species formed during the realization of advanced oxidation processes are hydroxyl radicals with an oxidation potential of 2.7 eV. It is these hydroxyl radicals that often play a key role in the degradation of organic pollutants in aqueous media.

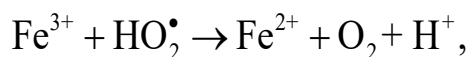
The most well-known advanced oxidation process today is the Fenton process. For the degradation of Rhodamine B in aqueous media, both the traditional Fenton process and its various modifications, known as Fenton-like processes, are used.

So, the aim of this work was to review the applications of the Fenton process and Fenton-like processes for aqueous media purification from the Rhodamine B xanthene dye, as well as to conduct experimental investigation of the efficiency and intensity of oxidative degradation of this dye using the developed Fenton-like advanced oxidation process “ultrasonic cavitation/MgMn₂O₄ (nanoparticles)/Na₂CO₃·1.5H₂O₂”.

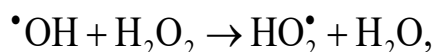
The Fenton reaction was discovered by H.J.H. Fenton in 1894. He used hydrogen peroxide activated by Fe²⁺ ions (iron(II) salts) to oxidize tartaric acid [84]. Usually, the mechanism of the Fenton process is described by the following reactions (Eqs. (1)-(9)) [83, 84]:



(4)



(5)



(7)





Eq. (1) is considered the core of the Fenton process. According to this equation, hydrogen peroxide decomposes to form hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) and oxidizes Fe^{2+} ions to Fe^{3+} . The formed hydroxyl radicals actively attack molecules of organic pollutants, leading to their mineralization into CO_2 , H_2O , and inorganic salts. The regeneration of Fe^{2+} ions by a cyclic mechanism is called a Fenton-like reaction (Eq. 2). In this case, Fe^{3+} ions are reduced to Fe^{2+} ions in an excess of hydrogen peroxide. This is accompanied by the formation of hydroperoxyl radicals ($\text{HO}_2\cdot$), which are less reactive compared to hydroxyl radicals. Iron (in the form of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions) acts as a catalyst for the decomposition of hydrogen peroxide.

Eqs. (2)-(5) are limiting, that is, they determine the overall rate of the Fenton process. Eqs. (6)-(9) correspond to termination reactions.

Both the traditional Fenton process [85-87] and its various modifications, known as Fenton-like processes [88-105], are used for the degradation of Rhodamine B in aqueous media.

Ollo et al. [85] reported that using the Fenton process for oxidative degradation of Rhodamine B (with a concentration of 5 mg/L in an aqueous medium) for 30 min led to achieving a degree of dye degradation of 99.4%. The experimental conditions were as follows: reaction temperature – 25 °C; pH = 2; initial concentration of Fe^{2+} ions – 8.4×10^{-4} mg/L; initial concentration of H_2O_2 – 3×10^{-3} M. It was found that the rate of Rhodamine B degradation decreased with an increase in the concentration of inorganic anions in the following order: $\text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{PO}_4^{3-}$.

Ghribi and Bagane [86] also reported about the high efficiency of Rhodamine B degradation in an acidic medium using the homogeneous Fenton process. Thus, at the reaction temperature of 25 °C, pH = 3, $C_0(\text{Fe}^{2+}) = 1.04$ mM, $C_0(\text{H}_2\text{O}_2) = 12.1$ mM, during 120 min of purification, it was possible to achieve a degree of Rhodamine B decolorization of 97.6% (the initial dye concentration in the reaction medium was 30 mg/L).

In the case of applying the homogeneous Fenton reaction for the simultaneous degradation of Rhodamine B (initial concentration – 3.6 mg/L) and Acid Red 14 (initial concentration – 25 mg/L) binary solution for 30 min, the degradation degrees of Rhodamine B and Acid Red 14 of 81.6% and 80.2% were achieved, respectively [87]. The conditions of the experimental studies were as follows: temperature of the reaction medium – 25 °C; pH = 3.7; initial concentration of Fe^{2+} ions – 143.9 mg/L; initial concentration of H_2O_2 – 126.9 mg/L.

Gayathri et al. reported that solar Fenton and solar photocatalytic Fenton processes are effective for the complete removal of dye pollutants, and the presence of ZnO as the catalyst enhanced the Fenton-assisted mineralization of Rhodamine B under solar irradiation [88]. The mechanism of the solar photocatalytic Fenton process is shown in Fig. 2.

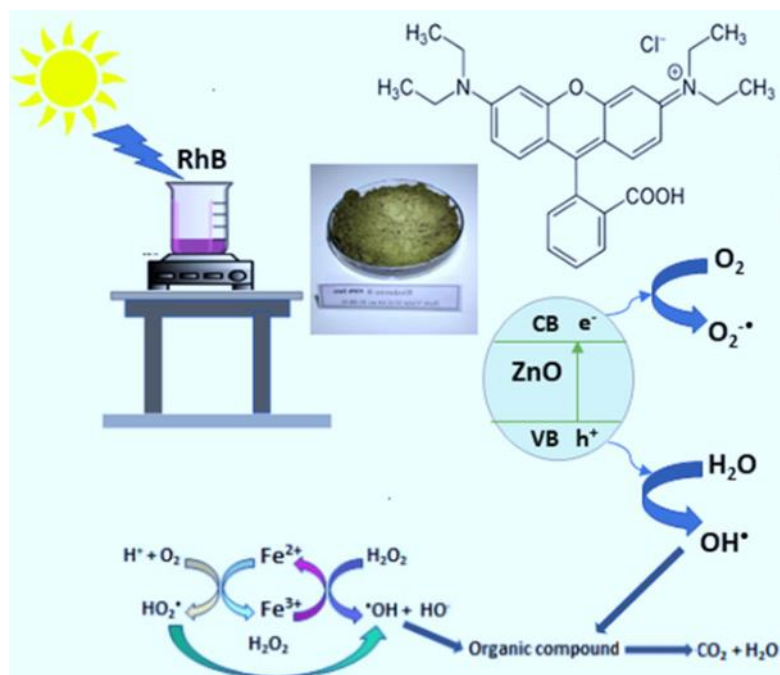


Figure 2. The proposed mechanism of the solar photocatalytic Fenton process [88] under the terms of the Creative Commons CC BY license.

A perspective technique for the mineralization of organic pollutants is the Fe^0 -based Fenton process [89, 90]. Compared to the traditional Fenton process based on

Fe^{2+} and H_2O_2 , the $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ process has advantages such as low corrosion of Fe^0 powder, low hydrogen peroxide consumption, and a wide operating range of pH values. Hou et al. [89] reported that complete decolorization of an aqueous solution of Rhodamine B (initial dye concentration – 0.1 mM) and a 69% reduction in total organic carbon (TOC) were achieved using the $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ process for 30 min. The experimental conditions were as follows: temperature of the reaction medium – 25 °C; pH = 4.0; initial content of Fe^0 powder – 1.0 g/L; initial H_2O_2 concentration – 2.0 mM. During purification, the total concentration of iron cations did not exceed 0.3 mg/L. Liang et al. [90] proposed two competitive pathways (Fig. 3) to degrade Rhodamine B using the $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ process: one is an N-de-ethylation process, and the other is cleavage of the chromophore.

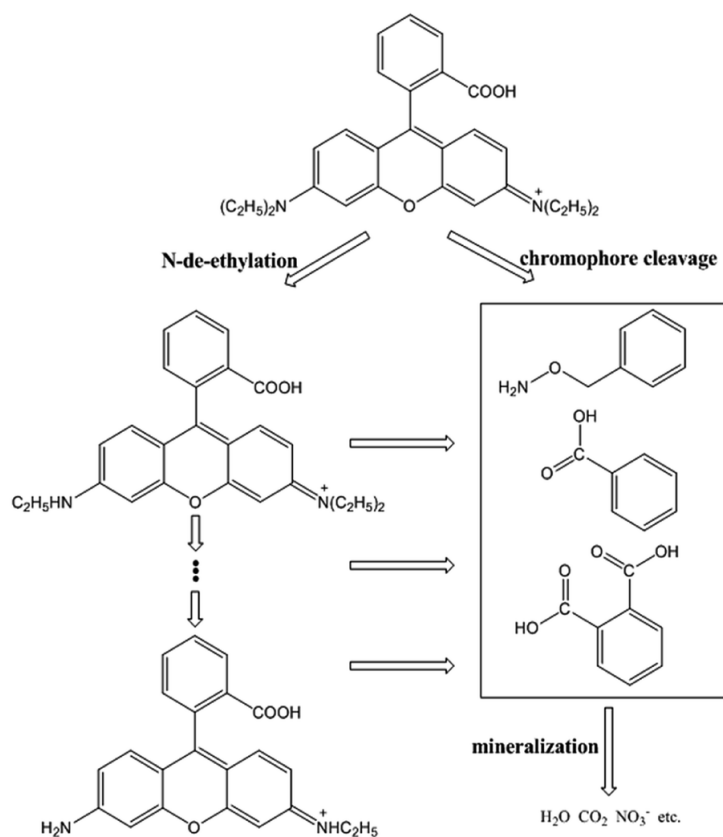


Figure 3. Degradation pathway of Rhodamine B by Fenton-like system [90]
under the terms of the Creative Commons CC BY license.

In Fenton-like processes, the following are used as catalysts for hydrogen peroxide decomposition: Co-N co-doped carbon nanotubes [91], zeolite-supported Co and Cu oxides (Co/Cu/zeolite) [92], Zn-Cr layered double hydroxide catalysts [93],

natural minerals (iron-bearing attapulgite granular catalyst [94], thermally activated natural chalcopyrite [95]), Fe-based metal-organic frameworks (for example, MIL-88B-Fe as $\text{Fe}_3\text{O}[\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO}_2)_2]_3\text{X}\cdot n\text{H}_2\text{O}$, where $\text{X} = \text{Cl}^-$ or OH^-), photocatalytically active materials (Fe-Mo-O doping g- C_3N_4 exfoliated composite [97], iron molybdate $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ nanopowders [98], iron(II) doped copper ferrite $\text{Cu}_{(x)}^{\text{II}}\text{Fe}_{(1-x)}^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}\text{O}_4$ nanoparticles [99], quasicrystals $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ [100]).

Based on studies of the influence of anions (CH_3COO^- , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} , and HCO_3^-) in the reaction medium on the oxidative capacity of the heterogeneous Fenton process, Zhang et al. found that HCO_3^- (Fig. 4) had the best promotion effect, which could degrade Rhodamine B, achieving a 7 times increase in the degradation efficiency of Rhodamine B compared with the traditional heterogeneous Fenton system (from 13.7% to 95.3%) [92].

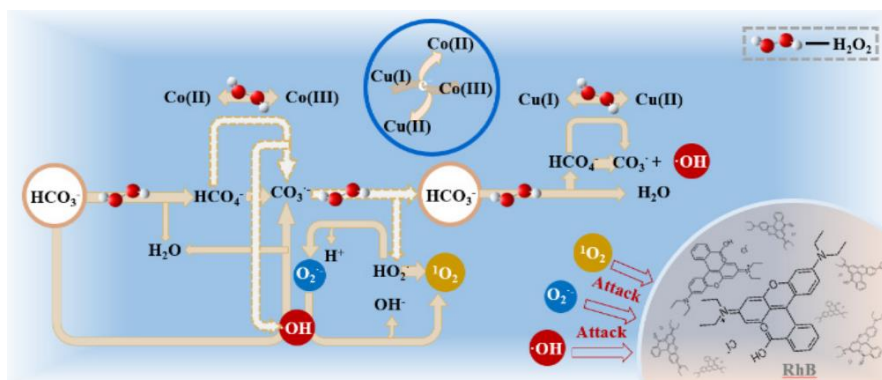


Figure 4. The proposed reaction mechanisms of bicarbonate ions enhanced Co/Cu/zeolite catalyzed heterogeneous Fenton process [92] under the terms of the Creative Commons CC BY license

The rate constant for the oxidative degradation of Rhodamine B using the HCO_3^- enhanced Co/Cu/zeolite/ H_2O_2 process (3.181 h^{-1}) was approximately 20 times higher than that of the Co/Cu/zeolite/ H_2O_2 process (0.158 h^{-1}). The radical quenching and EPR experiment results (Fig. 4) indicated that singlet oxygen ($^1\text{O}_2$) was the main oxidative species, followed by superoxide anion radicals ($\text{O}_2^{\bullet-}$) and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$).

The catalyst based on Zn-Cr layered double hydroxide [93] demonstrated good activity during the decomposition of hydrogen peroxide to generate hydroxyl radicals, which participated in the oxidation of Rhodamine B. Over a period of 90 min a degree of Rhodamine B decolorization of 99.8% was achieved under the following conditions: an initial Rhodamine B concentration in its aqueous solution of 20 mg/L, a volume of the solution of 100 mL, a molar ratio of Zn:Cr = 2:1 in the layered double hydroxide, a catalyst content in the reaction medium of 3.0 g/L, an H₂O₂ concentration of 9 g/L, and a pH=6.5.

Yang et al. [95] used thermally activated natural chalcopryrite (CuFeS₂) for the Fenton-like degradation of Rhodamine B. It was found that the use of the thermally activated chalcopryrite/H₂O₂ system for 50 min under optimal conditions (the reaction temperature – 25 °C; the initial pH 5.1; the initial concentration of Rhodamine B in the aqueous solution – 10 mg/L; the catalyst dosage – 0.75 g/L; the initial H₂O₂ concentration – 43.0 mM) resulted in a degree of Rhodamine B degradation of 96.7%. The calculated activation energy value of the Rhodamine B degradation was 9 kJ/mol. The dominant reactive oxygen species in the thermally activated chalcopryrite/H₂O₂ system were hydroxyl radicals (Fig. 5).

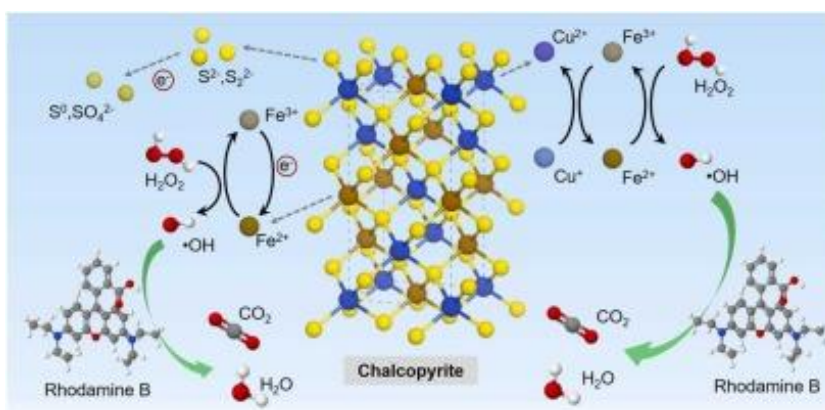


Figure 5. The proposed mechanism of Rhodamine B degradation in thermally activated chalcopryrite/H₂O₂ system [95] under the terms of the Creative Commons CC BY license

For the photo-Fenton-like degradation of Rhodamine B under visible light irradiation, Fe-Mo-O doping g-C₃N₄ exfoliated composite [97], iron molybdate Fe₂(MoO₄)₃ nanopowders [98], and iron(II) doped copper ferrite Cu_(x)^{II}Fe_(1-x)^{II}Fe₂^{III}O₄ nanoparticles [99] were used, and under UV irradiation – Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅ quasicrystals [100] were used.

As a result of applying a new photocatalytic process (UV/quasicrystals Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅/Na₂CO₃·1.5H₂O₂), in which sodium percarbonate (Na₂CO₃·1.5H₂O₂; SPC) was an alternative source of H₂O₂, a 95% degree of Rhodamine B degradation (the initial dye concentration in the aqueous solution – 5 mg/L) was possible to achieve over 60 min of purification [100]. At the same time, the rate constant of Rhodamine B degradation was 0.048 s⁻¹. The experimental conditions were as follows: the UV irradiation power – 36 W; the UV irradiation wavelength – 365 nm; the initial SPC concentration in the reaction medium – 33.3 g/L; the quasicrystal concentration – 8.3 g/L.

Wang et al. [101] proposed a new system (Ce(IV)/H₂O₂/hydroxylamine) to accelerate the formation of aminoxyl radical (NH₂O•) by the addition of cerium Ce(IV) to induce the continuous production of hydroxyl radicals (Fig. 6) through reaction with hydrogen peroxide.

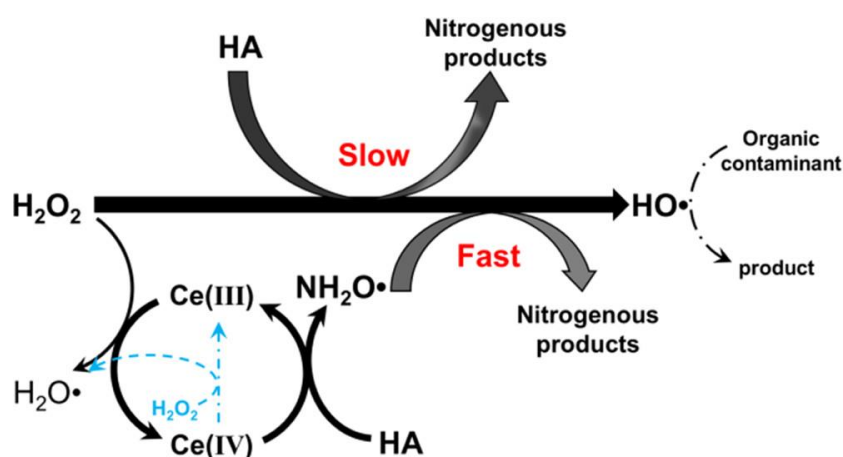


Figure 6. The proposed mechanism of organic contaminant degradation in Ce(IV)/H₂O₂/hydroxylamine system [101] under the terms of the Creative Commons CC BY license

The usage of such a triple system for 12 h to mineralize Rhodamine B made it possible to reduce the total organic carbon content (which is used to assess the degree of mineralization) by 85.6%. The experimental conditions were as follows: the initial concentration of Rhodamine B in its aqueous solution – 10 mg/L; the volume of solution – 100 mL; the pH of the initial solution – 4.0; $[H_2O_2]_0$ – 2 mM; $[hydroxylamine]_0$ – 2 mM; $[Ce^{4+}]_0$ – 0.1 mM.

The efficiency and intensity of Fenton-like processes can be significantly increased by inducing cavitation (acoustic or hydrodynamic) in aqueous media [102-105]. Combinations of ultrasound or cavitation impinging stream (CIS) with the Fenton process provide enhanced generation of hydroxyl radicals, resulting in increased degradation rates of organic pollutants.

For the degradation of Rhodamine B, we developed a Fenton-like advanced oxidation process “ultrasonic cavitation/ $MgMn_2O_4$ (nanoparticles)/ $Na_2CO_3 \cdot 1.5H_2O_2$ ”. This process involves the combined activation (in an ultrasonic field and with spinel nanoparticles) of the oxidizing agent (sodium percarbonate), which was as the “source of solid hydrogen peroxide”. Spinel nanoparticles of $MgMn_2O_4$ were synthesized using the co-precipitation method in an ultrasonic field (the specific power of ultrasonic treatment of the reaction medium – 200 W/L; frequency of ultrasonic oscillations – 20 kHz). The precursors were magnesium nitrate hexahydrate and manganese(II) nitrate hexahydrate in a molar ratio of 1:2, and the precipitating agent was a water solution of sodium hydroxide with a molar concentration of 2 M. As a result of the synthesis, a suspension containing dispersed particles of light brown color was obtained. The removal of impurities was carried out by sequentially washing the synthesized product three times with deionized water and ethanol, respectively. Solid particles were separated from the liquid phase by centrifugation (frequency – 5000 rpm). The solid phase was dried at a temperature of 60 °C for 12 h, and then calcined in an air atmosphere at a temperature of 200 °C for 5 h. X-ray phase studies of the synthesis product was performed using an XRD diffractometer AERIS Research with $CuK\alpha$ -radiation. The average crystallite size was calculated using the Debye-Scherrer

equation. The shape of MgMn_2O_4 spinel particles and their size assessment were determined based on the results of scanning electron microscopy.

During the experimental studies of the oxidative degradation of Rhodamine B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$) xanthene dye in an ultrasonic field, the temperature of the reaction medium in the glass reactor maintained at a constant value of 25 °C. The initial concentration of Rhodamine B in the solution obtained by mixing two aqueous solutions (Rhodamine B and sodium percarbonate) was equal to 100 mg/L (209 μM). The concentration of the aqueous solution of the primary oxidant ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$) was varied from 1 to 5 mM, and the constant pH value of the reaction medium (which was equal to 3) was adjusted by adding an aqueous solution of HCl. The catalytic decomposition of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ was initiated by introducing nanoscale MgMn_2O_4 spinel particles into the reaction medium (catalyst content – 1.0 g/L). Acoustic vibrations in the ultrasonic range with a frequency of 22 kHz were generated by a magnetostrictive emitter “Ultrasonic Disintegrator UD-20”.

The peaks on the diffractogram (Fig. 7) of the synthesized product matched well with the standard model of MgMn_2O_4 spinel (JCPDS No. 01–072-1336) with a tetragonal structure [106]. Using the Debye-Scherrer equation, the average crystallite size of MgMn_2O_4 was calculated to be equal to 24 nm based on the diffraction maximum at $2\theta = 36.13^\circ$ (plane (211)).

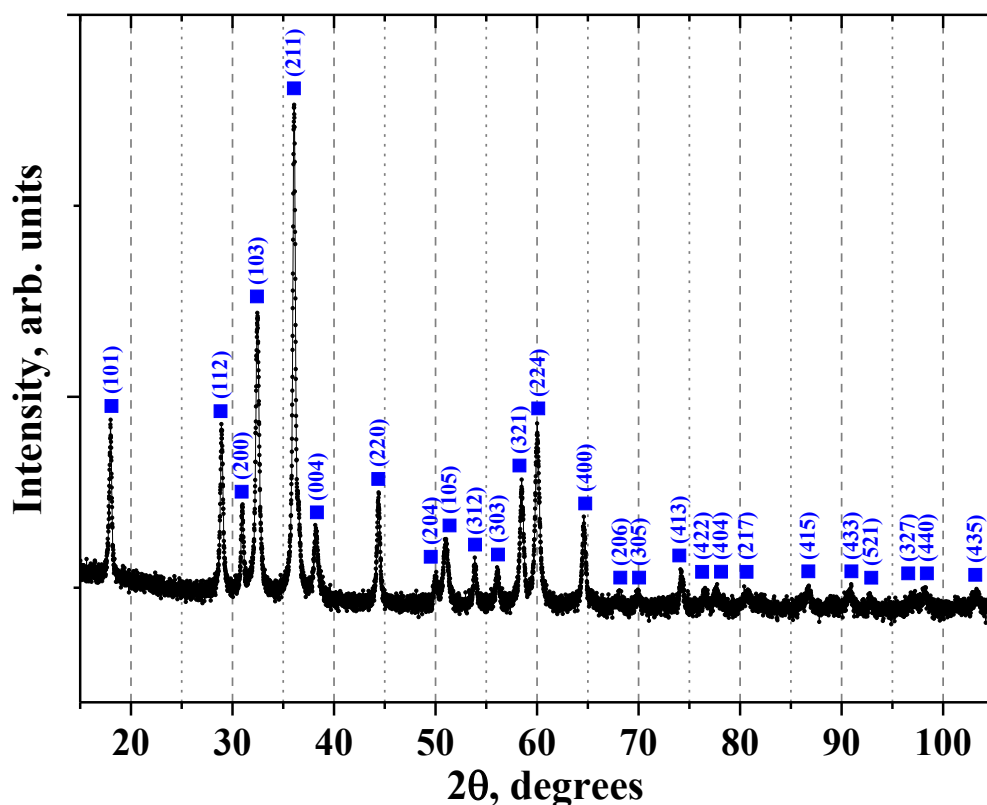


Figure 7. XRD pattern of MgMn_2O_4 spinel particles synthesized by co-precipitation in an ultrasonic field [made by the authors]

The formation of agglomerates from nanosized (size – 20...50 nm) quasi-spherical particles of MgMn_2O_4 spinel was confirmed by scanning electron microscopy (Fig. 8). The phenomenon of agglomeration was caused by the paramagnetic properties of the spinel particles.

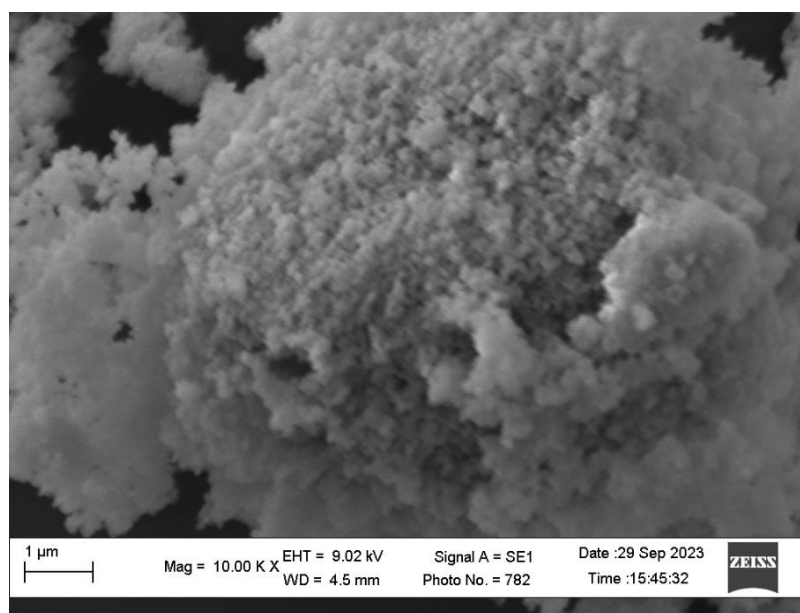


Figure 8. SEM image of MgMn_2O_4 spinel particles [made by the authors]

It was found that as a result of using the developed Fenton-like advanced oxidation process “ultrasonic cavitation/ MgMn_2O_4 (nanoparticles)/ $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ ” for the degradation of Rhodamine B for 3600 s, the change in dye concentration in the reaction medium depended on the initial dose of oxidant ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$). Thus, at the initial dose of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ in the reaction medium of 1 mM, the concentration of Rhodamine B decreased from 209 to 38 μM for 3600 s, 3 mM – from 209 to 18 μM , 5 mM – from 209 to 4 μM (Fig. 9). Accordingly, the degree of oxidative degradation of Rhodamine B at the initial dose of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ in the reaction medium of 1 mM was 81.9%, 3 mM – 91.5%, 5 mM – 98.0%. The rate constant of oxidative degradation of Rhodamine B increased by 3 times with the increase in the initial dose of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ in the reaction medium from 1 to 5 mM, rising from 1.35×10^{-3} to $4.13 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

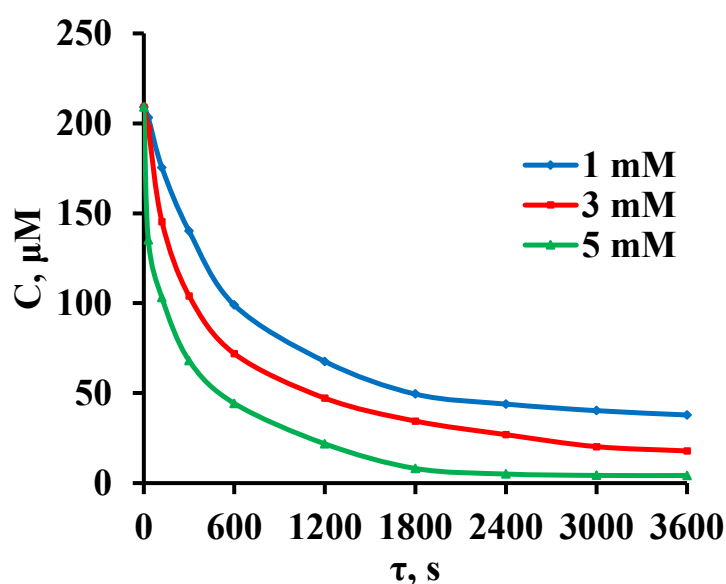


Figure 9. Influence of the initial dose of sodium percarbonate (in mM) in the reaction medium on the kinetics of oxidative degradation of Rhodamine B (conditions: $V = 200 \text{ mL}$; $C_0(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3) = 209 \mu\text{M}$; catalyst content (MgMn_2O_4 spinel nanoparticles) – 1.0 g/L ; $\text{pH} = 3$; $T = 298 \text{ K}$; specific power of ultrasonic treatment – 51 W/L) [made by the authors]

Acknowledgements

The authors acknowledge the funding of the Ministry of Education and Science of Ukraine for the scientific research project of young scientists “Advanced oxidation processes, including nanocatalytic, based on cavitation technologies for purification of aqueous media from resistant N-substituted organic compounds” (state registration number 0122U000790).

SECTION 4. CHEMISTRY

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.4.1

4.1 The feasibility of holding chemistry tournaments for high school students

The conditions of modern scientific and technological progress and increased competition in the global labor market are placing new demands on the education system in Ukraine. One of the priority tasks is the timely identification, development, and support of gifted children, as they will form the basis of Ukraine's scientific potential in the coming decades. Holding various extracurricular events involving schoolchildren, such as academic competitions, intellectual contests, and „HACKATONS”, are promising and effective mechanisms for achieving this goal. Today, chemistry competitions are of considerable importance in Ukraine, especially for students in grades 10–11, as this age is critical for professional determination and the formation of scientific interests. Therefore, holding intellectual competitions and „HACKATHONS” can have an additional positive impact on the desire of future applicants to choose chemistry-related professions.

The purpose of this document is to justify the need for the systematic holding of chemistry Olympiads, intellectual chemistry competitions, and „HACKATHONS” among high school students, to predict and describe educational, upbringing, and socio-political factors, to identify problems that hinder the development of the Olympiad movement and the possibility of holding intellectual competitions and "HACKATHONS," and to offer practical recommendations for improving the organization and accessibility of such competitions. Therefore, the following factors can be identified that have a certain impact on the possibility of holding such events [107]:

1. *Historical and international aspects of chemistry Olympiads.*
2. *Structure and formats of chemistry competitions for Ukrainian schoolchildren.*
3. *Educational benefits of holding chemistry competitions.*

4. *Development of research skills of Ukrainian schoolchildren through experimentation.*
5. *The motivational and psychological impact of scientific chemistry competitions on schoolchildren in Ukraine.*
6. *Career guidance and social mobility of Ukrainian schoolchildren in their final years of school.*
7. *The role of subject teachers (chemists) and the main methods of preparing for student competitions.*
8. *Main existing problems of the modern chemistry competition movement in Ukraine.*
9. *The influence of digital technologies as a tool for expanding access to participation in student competitions.*
10. *Socio-economic benefits for the state in supporting student chemistry competitions.*
11. *The impact of such measures on the socialization of school youth and their awareness of their role in the future of Ukraine.*

The history of physical competitions between people has its roots in ancient times. However, the history of international subject Olympiads began only in the mid-20th century, and the first International Chemistry Olympiad (IChO) was held in 1968 in Prague [108]. Since then, it has become one of the most prestigious school science events, attended by students who see chemistry not only as their favorite subject, but also as a fascinating tool for learning about the world, an opportunity for creative thinking, and a significant first step toward choosing a future career in science or engineering, which are closely related to chemistry.

Participation in various scientific chemistry tournaments allows students to familiarize themselves with the international scientific environment, compare their level of preparation with their peers in Ukraine and other countries, and gain experience working on complex theoretical, practical, and experimental chemistry tasks [107-116].

An analysis of the existing Olympiad and tournament movement in chemistry around the world shows that countries that systematically invest in their development achieve stable results in training highly qualified chemists.

If we consider the structure and format of various chemistry competitions for schoolchildren, it is worth noting that Olympiads usually take place at the school, district (city), regional, national, and international levels. They mainly include theoretical and practical (laboratory) rounds. Theoretical tasks usually involve solving complex problems in inorganic, organic, and physical chemistry, as well as problems in thermodynamics, chemical kinetics, chemical equilibrium, etc. The practical round involves laboratory experiments, analytical measurements, etc., and always takes place in the relevant chemical laboratories of higher education institutions [107-116].

Given the realities of today, the format of chemistry competitions can be in the form of traditional tests, written problems with detailed answers, as well as using modern digital formats — online tests, simulations of laboratory experiments. The latter partially compensate for the lack of equipment in schools, but they cannot completely replace practical work with real substances.

The main educational value of chemistry competitions lies in creating and arguing for certain educational benefits, which consist in promoting in-depth study of the subject of chemistry. Chemistry competitions encourage students to go beyond the school curriculum and introduce them to scientific methodology: posing scientific chemistry problems, constructing relevant hypotheses, conducting chemical experiments, analyzing research results, and formulating scientific conclusions [107-116].

In addition to chemical knowledge, participation in the preparation for chemistry competitions develops certain key competencies in schoolchildren: critical thinking, mathematical literacy, information literacy, and the ability to conduct scientific chemical dialogue. Such important skills will contribute not only to the further successful education of Ukrainian youth in higher educational institutions of Ukraine, but also to their professional choices [115].

Chemistry competitions also contribute to the development of research skills in schoolchildren through experimentation. It is the experimental component of chemistry that makes chemistry competitions unique, as students have the opportunity to practice various methods of chemical analysis. The skills that schoolchildren acquire in conducting and interpreting experiments are an integral part of chemical scientific culture. Participation in laboratory rounds develops laboratory ethics in students, the ability to work competently with instruments, and adherence to safety procedures. Therefore, the practice of laboratory research contributes to the development of interest in chemistry among schoolchildren and the choice of professions related to chemistry [108-111].

It should be noted that participation in chemistry competitions motivates students to work purposefully. Achievements in the form of diplomas, awards, and opportunities to participate in specialized scientific schools and training courses increase students' self-esteem and develop their internal motivation to study chemistry. The process of competition in a healthy format, which is supported by the organizers of chemistry competitions, develops stress resistance, self-control, and time management skills in students. Therefore, for students who have not won high awards in chemistry competitions, support and feedback from mentors and organizers are important.

Holding various chemistry events and the participation of students in them has a significant impact on their choice of future profession. Students who have had a positive experience in scientific chemistry activities are more likely to choose natural science specialties in higher education institutions. This contributes to the growth of the contingent of young specialists in various chemical and technological fields in Ukraine.

Chemistry competitions in Ukraine also promote the social mobility of today's youth: talented children from low-income or remote regions, having received support and scholarships, have the opportunity to obtain higher education and pursue scientific careers [107-116].

The key factor in successfully preparing schoolchildren for chemistry competitions and winning them is the chemistry teacher. Effective methods of preparing students include extracurricular activities, individual consultations, participation in science clubs, and cooperation with universities. Teachers impart not only knowledge to students, but also skills in conducting scientific research, modeling, testing hypotheses, etc.

Given the rapid development of technology, teaching methods should be constantly diversified: problem-based lessons, case studies, laboratory research, and the integration of information technology (chemical reaction simulators, databases, remote lectures by specialists) should be used. This will ensure the development of a wider range of skills in students while studying chemistry [114].

It is also worth noting certain problems in the modern chemistry competition movement that are relevant to chemistry teachers. These include unequal opportunities in preparing students from different regions for chemistry competitions, lack of funding, insufficient laboratory facilities in rural and small schools, and the absence of a regular mentoring system [107-116]. In addition, there is a certain risk of excessive specialization in the current environment, as some students prepare only for chemistry competitions, which may cause them to fall behind in other subjects.

Another problem is of a moral and ethical nature, namely that competition between students sometimes exceeds acceptable limits, with the emergence of practices such as the "commercialization" of preparation (paid courses, tutoring) for chemistry competitions, which limits access for the most talented but financially vulnerable students.

To successfully motivate high school students to study chemistry, the development of online platforms with educational materials, video lectures, interactive laboratories, and test banks can significantly expand access to quality training. Webinars from leading teachers, distance training, and online competitions make it possible to attract students from remote regions. It should be noted that digital resources should complement the educational process, not replace practical or laboratory work. Therefore, the ideal format for chemistry lessons is a hybrid one,

where theoretical training in an online environment is combined with face-to-face practical training [109-116].

Current problems in Ukrainian education can significantly affect the development of chemistry competitions among schoolchildren. Therefore, investing in this area is an investment in the development of future human capital in Ukraine. Supporting gifted young people has long-term prospects and returns: growth in innovative activity, development of applied research, and increased competitiveness of Ukraine's national economy. Continuous encouragement of participation in various chemistry competitions for students from different regions of Ukraine, the creation of grant programs and scholarships for winners are modern and effective tools for implementing our country's state policy in the field of education and science.

Given the existing problems in the desire of high school students to study chemistry-related subjects, certain practical recommendations can be offered to expand and improve student interest through intellectual tournament games and "HACKATHONS" [107-116]:

- ✓ develop a permanent state-level program to support gifted students, including funding for practical tours, the purchase of laboratory equipment for schools, and decent scholarships;
- ✓ create a single centralized online platform with open materials: video lectures, databases of past years' tasks, interactive simulators;
- ✓ develop a network of regional science schools and training centers that can provide face-to-face laboratory courses for talented students from neighboring schools;
- ✓ introduce mentoring programs: cooperation between schools and universities and scientific institutions (joint projects, supervision by scientists);
- ✓ ensure a transparent selection system for national teams, minimizing corruption risks and increasing trust;
- ✓ create mechanisms to reimburse expenses for students from low-income families (travel, accommodation, reagents).

✓ promote chemistry through the mass media, science festivals, demonstration experiment competitions, and social networks.

With some experience in organizing chemistry-related intellectual competitions, the authors have discussed the following plan of recommendations to encourage students to participate in them:

- propose that chemistry teachers assess the basic level of senior students and jointly develop an individual program for each student for further participation in chemistry training;

- combining regular optional chemistry classes (at least twice a week) both at school and in the laboratories of higher education institutions with work on basic chemistry problems and laboratory research;

- conducting intensive courses on theoretical sections of chemistry: thermodynamics, chemical kinetics and equilibrium, etc.

- conducting practical training sessions for schoolchildren by a chemistry teacher to prepare them for school, city, regional, and national chemistry tournaments, intellectual chemistry competitions, and „HACKATHONS”.

- participation in regional chemistry tournaments.

- participation of senior school students in specialized summer science schools in chemistry, which can be organized both at the school and at a higher education institution.

In order to interest students in long-term and frequent participation in organized school tournaments, it is important for organizers to ensure the quality and fairness of their assessment. The proposed criteria should be clear and understandable, first and foremost, to the participants: the correctness of the calculations of the tasks, the logical presentation of ideas, the correctness of the experimental results and their interpretation, etc. The authors recommend creating appropriate open criteria scales for all rounds so that participants clearly understand them and can systematically prepare for subsequent tasks.

The organizers should also take into account the ethical principles of holding various tournaments, with regard to inclusion: equal access for all interested students

studying chemistry to participate in competitions, tournaments, etc.; prohibition of corrupt practices; and correct feedback to participants. Organizers should pay special attention to students with special needs: creating conditions for the participation of students with special educational needs, providing adapted tasks, and mandatory technical support.

Today, many regions in Ukraine demonstrate positive practices in conducting school tournaments, Olympiads, and other competitions with a focus on chemistry: centralized training centers with basic laboratory infrastructure, internship programs for teachers, and active cooperation with universities. In Ukraine, examples of educational institutions that systematically prepare Olympiad participants confirm the effectiveness of combining face-to-face training and distance learning resources. It is worth noting the successful practice of holding a "HACKATHON" at the National University "Lviv Polytechnic." [116] The intellectual competition was organized by the director of the ICCT, Volodymyr Skorokhoda, the head of the ICCT Department of Organic Chemistry, Volodymyr Donchak, and the head of the ICCT Department of Physical, Analytical and General Chemistry, Pavlo Shapoval. The coordinators of the competition were ICCT lecturers Roksoliana Bukliv, associate professor of the Department of Chemistry and Technology of Inorganic Substances, and Olha Budishevskya, professor of the Department of Organic Chemistry, associate professors of the Department of Physical, Analytical and General Chemistry Lilianna Oliynyk and Zoryana Komarenska, did their utmost during the event to encourage students to study chemistry and demonstrate their quick wits and intellect.

Student volunteers Vladyslava Novosad and Vladyslava Zhuk provided great assistance in preparing and organizing the competition, while Oleksandra Bondar and Olga Burets also took part in conducting the competition. Together with the teachers of Lviv Polytechnic National University, the leaders of the Lviv Regional Small Academy of Sciences for Schoolchildren, Svitlana Kernichna and Maria Ostapiuk, worked on compiling the competition tasks.

The following competitions were offered to tournament participants:

1. Rules for working in a chemical laboratory (1 point each, 12 points, 5 minutes).

2. Laboratory equipment (1 point each, 12 points, 5 minutes).
3. Chemical erudition (1 point each, 10 points, 10 minutes).
4. Chemistry crossword puzzle (1 point each, 9 points, 5 minutes).
5. Chemical rebuses (2 points each, 12 points, 10 min).
6. Pictures of substances (1 point each, 12 points, 5 minutes).

In the first contest, the participants of the "HACKATHON" had to answer YES/NO to the following questions:

✓ When preparing an acid solution, water should be added to the acid in small portions.

Answer: NO.

✓ After conducting experiments, the remaining reagents should be poured down the sink.

Answer: NO.

✓ You should not eat while conducting experiments.

Answer: YES.

✓ Do not stir solutions with your finger.

Answer: YES.

✓ When heating, do not point the opening of the test tube at yourself; point it at your neighbor.

Answer: NO.

✓ Dry substances are collected with a spatula, and wet substances are scooped up with a beaker.

Answer: NO.

✓ When stirring a solution, do not cover the opening of the flask with your finger.

Answer: YES.

✓ Do not look at the substances in the test tube opening during heating.

Answer: YES.

✓ When heating substances in a test tube, only the area where the substance is located should be heated.

Answer: NO.

✓ Do not work with volatile substances near open flames.

Answer: YES.

✓ To determine the smell of a substance, bring the container with the substance close to your nose and inhale deeply.

Answer: NO.

✓ After conducting experiments, wash your hands.

Answer: YES.

The second contest involved correctly identifying the names of laboratory equipment:

- ✓ Test tubes.
- ✓ Measuring cylinder.
- ✓ Conical flask.
- ✓ Mortar and pestle.
- ✓ Test tube holder.
- ✓ Tripod foot.
- ✓ Tripod.
- ✓ Round-bottom flask.
- ✓ Gas burner.
- ✓ Burette.
- ✓ Measuring cup.
- ✓ Alcohol lamp.

In the "Chemical erudition" competition, teams of schoolchildren had to give the correct answers to the following questions:

✓ What is the name of the spontaneous process of metal oxidation in air?

Answer: corrosion.

✓ What is the smallest particle of a substance that carries the properties of that substance?

Answer: molecule.

✓ What is "black gold"?

Answer: petroleum.

✓ What substance is called "dry ice"?

Answer: carbon(IV) oxide.

✓ What color does litmus indicator turn in an acidic environment?

Answer: red.

✓ What is the formula of the main substance in chalk?

Answer: CaCO_3 .

✓ What is the name of the layer in the atmosphere that plays a significant role in preserving life on planet Earth?

Answer: ozone layer.

✓ What acid is used as a flavoring agent for preserving and pickling vegetables?

Answer: acetate (acetic, ethanoic) acid.

✓ What acid is found in gastric juice?

Answer: hydrochloric acid.

✓ What substance did Leonardo da Vinci call the "juice of life"?

Answer: water.

In the "Chemical Crossword puzzle" task, students had to fill in the horizontal rows with the names of nine elements, whose symbols are depicted in circles around the crossword (one letter per cell). Then, they had to write their names horizontally in the " " so that the surname of the scientist who created the symbols for the chemical elements could be read vertically in the cells highlighted in red.

The "Chemical rebuses" contest involved guessing the chemical name from a picture. To do this, in the cells under each rebus, it was necessary to guess and write the name of a chemical element or simple substance: write the names of objects and animals in a row, a comma above the image meant to cross out one letter.

The "Pictures of substances" task included 12 slides with corresponding images and questions, which are listed below:

- ✓ This metal is in a liquid state at room temperature.

Answer: mercury.

- ✓ A product made from this bloodiest metal in history could have cost Archimedes his head.

Answer: gold.

- ✓ The only substance that has a purely salty taste.

Answer: sodium chloride.

- ✓ This gas is responsible for the smell of rotten eggs.

Answer: hydrogen sulfide.

- ✓ Dihydrogen monoxide is the official name of this substance. According to a popular saying, you can drown in a spoonful of this substance.

Answer: water.

- ✓ The absence of this simple substance would lead to the destruction of life on Earth from ultraviolet rays.

Answer: ozone.

- ✓ The name of this gas translates as "sunny".

Answer: helium.

- ✓ In ancient times, this metal was called "heavenly copper." Until people learned how to extract it, they had to wait for it to fall from the sky.

Answer: iron.

- ✓ One drop of this substance kills a horse.

Answer: nicotine.

- ✓ This metal shortened the lives of the inhabitants of Ancient Rome.

Answer: Pb.

- ✓ This substance does not burn, but it can be extinguished with acid.

Answer: baking soda.

- ✓ Insects use this substance to kill their victims.

Answer: formic acid.

The competition took place in a creative and friendly atmosphere. The teams of students actively discussed the answers to the competition questions.

At the end of the intellectual competition, the participating teams were awarded diplomas in various categories and souvenirs.

Considering the above, it should be noted that holding chemistry tournaments, in particular intellectual competitions and "HACKATHONS" for students in grades 10–11, is a very significant contribution to the development of education in Ukraine, which will contribute to improving the quality of chemical knowledge and the development of scientific chemical thinking, and thus to the formation of human resources and the enhancement of Ukraine's international prestige. To achieve the greatest effect, it is advisable to systematically support the chemical tournament movement in various formats and invest in the chemical laboratory infrastructure of educational institutions, develop existing online resources, and create real support programs for talented chemistry students and their mentors. According to the authors, the implementation of the proposed recommendations will ensure the accessibility and quality of preparation for chemistry competitions, promote the wider involvement of students from different regions and social groups in such events, and strengthen the role of chemistry as a key element of science education in the future development of Ukraine.

SECTION 5. COMPUTER ENGINEERING

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.5.1

5.1 Методи створення відмовостійкості та доступності серверів ліцензування

5.1.1 Сучасні системи ліцензування з використанням апаратних засобів захисту

У сучасному світі програмне забезпечення стало одним із найважливіших ресурсів, що визначають розвиток технологій, бізнесу, науки та освіти. Його створення потребує значних інтелектуальних і фінансових витрат, тому захист результатів програмної діяльності є одним із ключових завдань розробників і компаній, які постачають ПЗ на ринок. У цьому контексті ліцензування програмного забезпечення виступає не лише юридичним інструментом регулювання відносин між розробником і користувачем, а й технічним механізмом, що забезпечує контроль за використанням програмного продукту.

Поняття «ліцензія» в контексті програмного забезпечення означає надання користувачеві певних прав на встановлення, використання або розповсюдження програми згідно з умовами розробника чи власника авторських прав. Ліцензійна угода визначає кількість дозволених інсталяцій, тип доступу (персональний, корпоративний, мережевий), термін дії, а також функціональні можливості, що залежать від рівня підписки або купленої редакції. Саме через механізми ліцензування виробник має змогу контролювати обсяг використання ПЗ, захищати свій продукт від несанкціонованого копіювання, а також отримувати дохід, необхідний для подальшого розвитку[117].

Значення ліцензування особливо зростає у галузях, де програмне забезпечення є не просто інструментом, а критичною складовою виробничих процесів. Це системи автоматизованого проєктування (CAD/CAM/CAE), інженерні комплекси, геоінформаційні системи, фінансові застосунки, медичне та наукове ПЗ. Такі продукти, як правило, мають високу вартість і потребують

спеціального контролю за доступом до функціоналу. Відсутність належного захисту призводить до значних економічних втрат розробників через піратство та нелегальне використання ліцензій.

Історично перші системи ліцензування реалізовувалися у вигляді програмних ключів – унікальних кодів, що активували програму на конкретному комп'ютері. Проте з поширенням глобальних мереж та віртуалізації цей підхід виявився недостатньо безпечним: ключі можна було копіювати або зламувати. У відповідь на ці виклики були створені апаратні засоби ліцензування, або апаратні ключі (рис. 1). Вони забезпечують апаратний рівень захисту, що робить несанкціоноване копіювання програмного забезпечення значно складнішим або практично неможливим.

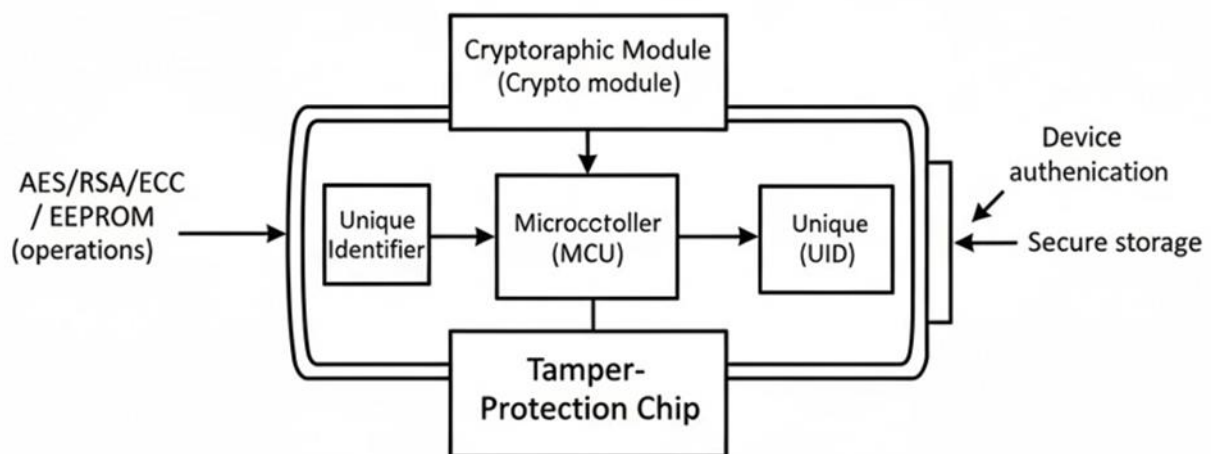


Рисунок 1. Схема апаратного ключа [авторська розробка]

Апаратний ключ виконує роль фізичного носія ліцензії – він містить зашифровану інформацію про права користувача, унікальний ідентифікатор, криптографічні ключі та алгоритми перевірки автентичності. Такий пристрій зазвичай підключається до комп'ютера через USB-інтерфейс або інтегрується у локальну мережу як ліцензійний сервер. Програма звертається до ключа при запуску або виконанні певних функцій, перевіряючи наявність і дійсність ліцензії. У разі відсутності ключа або невідповідності даних виконання програми блокується.

Із технічного погляду, сучасні системи ліцензування з апаратними ключами виконують кілька важливих функцій:

- ідентифікація користувача або робочого місця кожен ключ має унікальний ідентифікатор,
- контроль кількості активних ліцензій для мережевих продуктів обмежується кількістю одночасних підключень,
- захист від підроблення або емуляції за рахунок криптографічних протоколів та апаратного шифрування,
- автоматичне відключення при порушеннях, наприклад, під час спроби перенесення ключа без авторизації.

Таким чином, ліцензування виконує подвійну функцію економічну (захист комерційних інтересів розробника) та технічну (забезпечення безпеки програмного продукту). Його роль стає ще важливішою у корпоративних середовищах, де від безперервності роботи ліцензійних серверів залежить функціонування багатьох бізнес-процесів.

В умовах глобальної цифровізації та поширення контейнеризованих інфраструктур виникає потреба у нових підходах до організації ліцензування. Сучасні компанії прагнуть інтегрувати апаратні ключі у віртуальні середовища, розподілені кластери та хмарні платформи. Це відкриває нові можливості, але водночас створює низку проблем, пов'язаних із відмовостійкістю, масштабованістю та безпекою доступу до фізичних пристроїв[118].

Отже, ліцензування у сучасних програмних продуктах є фундаментальним механізмом не лише захисту авторських прав, а й забезпечення стабільної, контрольованої та безпечної експлуатації програмних систем. Його розвиток безпосередньо впливає на економічну ефективність, надійність і конкурентоспроможність програмних рішень, а тому дослідження методів удосконалення ліцензування, зокрема в контейнеризованих середовищах, є актуальним завданням сучасної інформаційної інженерії.

Системи ліцензування з використанням апаратних засобів захисту є одним із найефективніших інструментів протидії несанкціонованому використанню

програмного забезпечення. Їхня поява стала логічним етапом еволюції засобів захисту авторських прав – від простих програмних ключів і серійних номерів до апаратних пристроїв, що реалізують складні криптографічні алгоритми. Такі рішення використовуються в багатьох комерційних, інженерних та промислових продуктах, де втрати від піратства можуть перевищувати витрати на впровадження захисних технологій.

Основна ідея апаратного захисту полягає в тому, що для запуску або роботи програмного забезпечення необхідна фізична наявність спеціального пристрою – апаратного ключа. Цей ключ, як правило, підключається через інтерфейс USB або використовується як мережевий модуль, який зберігає зашифровану інформацію про ліцензію, криптографічні ключі та алгоритми перевірки автентичності. Програма взаємодіє з ним за допомогою спеціального API або драйвера, виконуючи перевірку перед початком роботи.

Переваги систем ліцензування з апаратними засобами захисту:

- високий рівень безпеки. На відміну від програмних ключів, які можуть бути скопійовані або зламані, апаратний ключ містить криптографічно захищену інформацію, до якої неможливо отримати доступ без фізичного пристрою. Більшість сучасних ключів підтримують шифрування з використанням алгоритмів AES, RSA, ECC, а також реалізують механізми захисту від реверс-інжинірингу та апаратного злому (апарат виявлення, самознищення даних при спробі зламу тощо);

- надійна ідентифікація користувача. Кожен ключ має унікальний ідентифікатор, що дозволяє точно визначати власника ліцензії, кількість активних копій програми та права доступу. Це особливо важливо для корпоративних і мережевих середовищ, де контроль за кількістю одночасних користувачів є обов'язковим;

- захист від підроблення та емуляції. Апаратні ключі використовують унікальні криптографічні обчислення (наприклад, challenge–response), що унеможлиблює створення програмного аналога. Навіть у разі копіювання програмного коду, відсутність справжнього ключа блокує роботу ПЗ;

- незалежність від мережевих збоїв або серверів авторизації. У локальному режимі роботи апаратний ключ забезпечує автономну перевірку ліцензії без потреби постійного з'єднання з сервером, що знижує ризики зупинки програмного продукту через проблеми з мережею;

- довготривала експлуатація. Більшість сучасних апаратних ключів мають термін служби понад 10 років, не потребують складного обслуговування і сумісні з різними операційними системами.

Недоліки систем ліцензування з апаратними засобами захисту:

- залежність від фізичного пристрою. Основною проблемою є необхідність фізичного підключення ключа. У разі його пошкодження, втрати або виходу з ладу користувач може повністю втратити доступ до програмного забезпечення, доки не буде отримано заміну. Це створює ризики простою, особливо у випадку віддалених або критично важливих систем;

- складність інтеграції у контейнеризовані та хмарні середовища. Апаратні ключі розроблялися для традиційних фізичних серверів або локальних робочих станцій. У контейнерах або віртуальних машинах їх підключення потребує спеціальних механізмів, таких як USB-over-IP або емуляція пристроїв, що часто призводить до проблем з продуктивністю, безпекою чи сумісністю;

- обмежена масштабованість. На відміну від програмних ліцензій, які можна легко масштабувати шляхом активації додаткових ключів у базі даних, апаратні рішення вимагають наявності фізичних пристроїв. Це ускладнює швидке розширення інфраструктури або міграцію на інші платформи;

- висока вартість впровадження. Вартість апаратних ключів, драйверів і серверів ліцензій є суттєвою. Для великих організацій із сотнями користувачів це може призвести до значних початкових витрат (CAPEX), а також витрат на підтримку (OPEX). Необхідність резервування та управління.

Для забезпечення відмовостійкості потрібне дублювання ключів або побудова кластерних ліцензійних серверів, що вимагає додаткової інфраструктури, моніторингу та адміністрування.

Таким чином, системи ліцензування з апаратними засобами захисту мають високий рівень безпеки, стабільність та надійність, що робить їх оптимальними для критично важливих застосунків і комерційного програмного забезпечення з високою вартістю. Проте їх основними недоліками залишаються залежність від фізичного пристрою, складність інтеграції у сучасні контейнеризовані інфраструктури та висока вартість володіння.

Ці фактори зумовлюють актуальність подальших досліджень і розроблення методів підвищення відмовостійкості та доступності серверів ліцензування, які поєднували б переваги апаратного захисту з гнучкістю сучасних хмарних і контейнерних технологій.

5.1.2 Підходи до побудови відмовостійких сервісів із використанням апаратних ключів

Із розвитком інформаційних технологій, хмарних платформ і контейнеризації особливої актуальності набули питання забезпечення відмовостійкості та високої доступності серверних систем. Для ліцензійних серверів, що використовують апаратні ключі як засіб автентифікації та контролю доступу до програмного забезпечення, ці завдання мають специфічний характер, оскільки такі ключі є фізичними пристроями, які мають обмеження у масштабуванні, переміщенні й дублюванні. Забезпечення безперервної роботи подібних систем потребує комплексного підходу, який враховує як програмну, так і апаратну складові.

Традиційно найпростішим способом побудови ліцензійного сервера є локальне підключення апаратного ключа до фізичного вузла, де виконується програма-сервер. Така архітектура має мінімальні затримки, не потребує складних мережових налаштувань і є ефективною для невеликих підприємств або лабораторій. Проте її головним недоліком є наявність єдиної точки відмови: у разі виходу з ладу сервера або самого ключа вся система стає недоступною. Для великих корпоративних середовищ це неприпустимо, тому виникла потреба у розподілених архітектурних рішеннях [119].

Одним із підходів є використання мережевих апаратних ключів, які функціонують як окремі сервери ліцензій. У цьому випадку кілька користувачів або застосунків можуть одночасно підключатися до спільного ключа через локальну мережу. Така архітектура дозволяє централізовано керувати ліцензіями, відслідковувати їхнє використання та забезпечувати контроль доступу на рівні користувачів. Водночас вона також створює ризики – у разі відмови вузла з ключем або мережевого інтерфейсу система втрачає доступ до ліцензій, що може призвести до зупинки критичних процесів. Для мінімізації таких ризиків застосовуються механізми резервування, дублювання серверів і використання балансувальників навантаження.

Сучасні архітектури з високою доступністю (High Availability) реалізуються за схемами active-passive або active-active (рис. 2). У першому випадку основний сервер має ексклюзивний доступ до апаратного ключа, тоді як резервний перебуває у режимі очікування. У разі збою система автоматично перемикається на резервний вузол. Такий підхід забезпечує передбачувану поведінку системи, однак потребує коректної синхронізації станів і механізмів “fencing”, щоб уникнути ситуацій, коли два сервери одночасно намагаються звертатися до одного ключа.

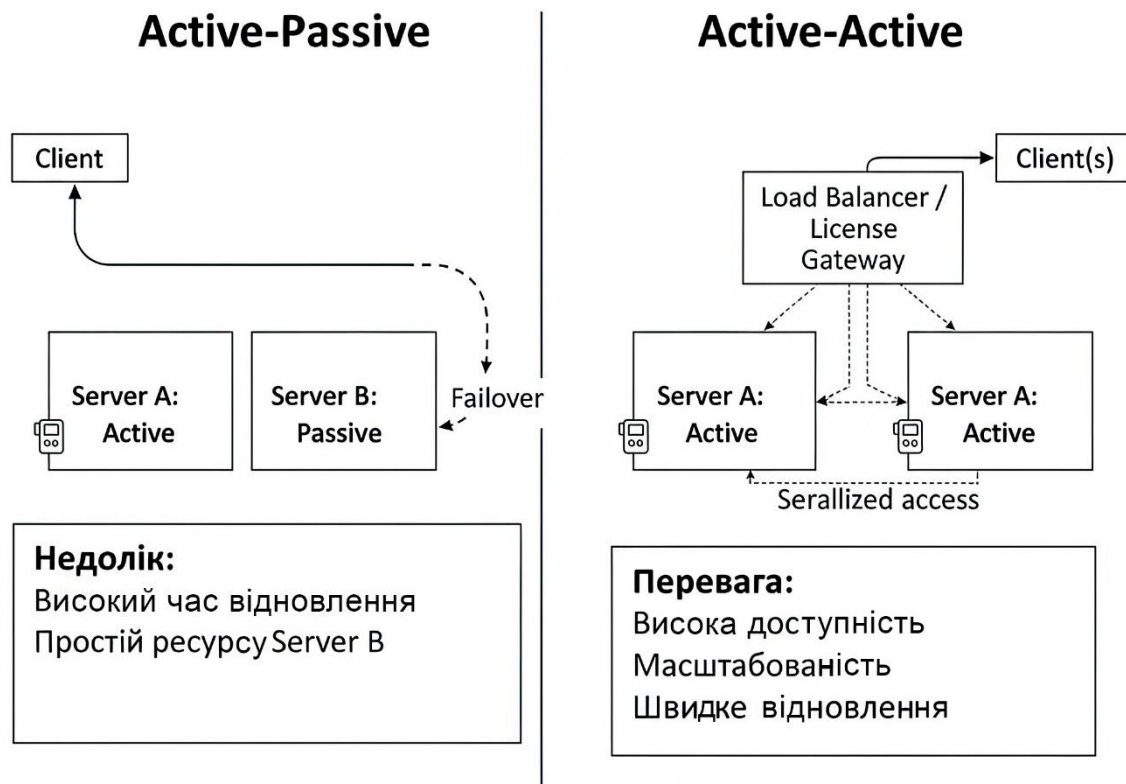


Рисунок 2. Архітектури з високою доступністю на схемах взаємодії active-active, active-passive [авторська розробка]

У схемі active-active декілька серверів або контейнерів можуть одночасно обслуговувати клієнтів, але звернення до апаратного ключа відбувається через спеціальний програмний шлюз або сервіс-посередник. Цей шлюз виконує серіалізацію запитів, забезпечує контроль черги, а також веде журнал операцій видачі й повернення ліцензій. Така модель більш гнучка, вона дозволяє масштабувати клієнтське навантаження, однак вимагає особливої уваги до надійності самого шлюзу, який стає критичним елементом системи.

В умовах контейнеризації, коли сервіси розгортаються у середовищах на зразок Kubernetes, з'являються додаткові інструменти для реалізації відмовостійкості. Для підключення апаратних ключів у таких середовищах використовують Device Plugin (рис. 3) – спеціальний компонент, який інформує оркестратор про наявність доступного апаратного ресурсу.

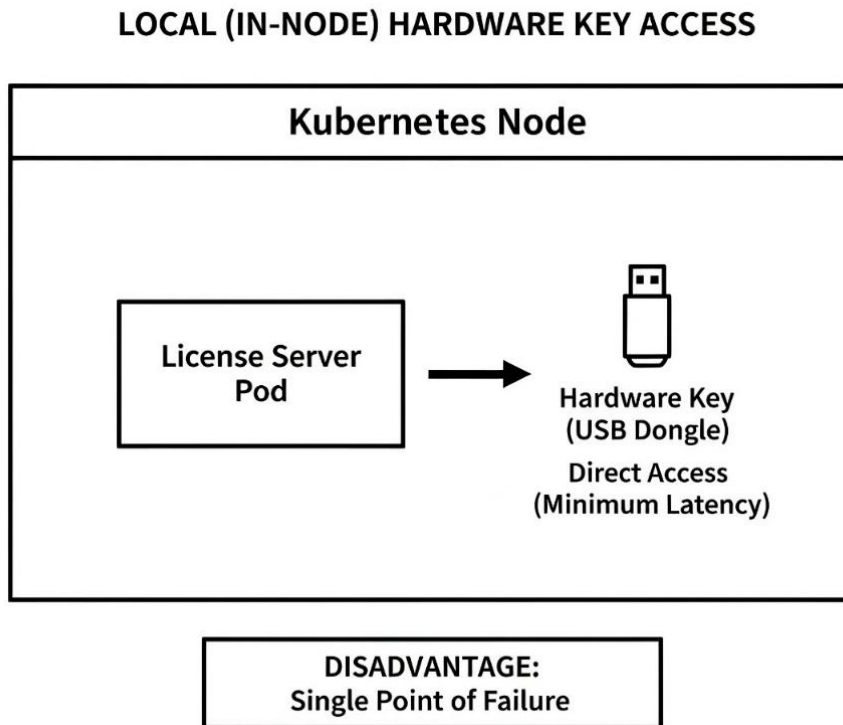


Рисунок 3. Схема підключення Device Plugin у кластер Kubernetes [авторська розробка]

Завдяки цьому можна забезпечити, щоб контейнери, які потребують доступу до ключа, розміщувалися виключно на вузлах, де такий ключ підключено. Додаткові механізми, як-от `PodDisruptionBudget`, допомагають обмежити кількість одночасно недоступних контейнерів під час оновлень або перезапусків, а `Topology Spread Constraints` забезпечують рівномірний розподіл реплік по вузлах кластера, що знижує ймовірність одночасного збою.

Особливу роль у побудові відмовостійких систем відіграють `health-checks` та `watchdog`-сервіси, які постійно перевіряють стан апаратного ключа, драйвера та ліцензійного демона. У разі втрати зв'язку або збоїв вони ініціюють автоматичне перезапускання контейнера або перемикання на резервний вузол. У поєднанні з механізмами `leader election` це дозволяє досягти автоматичного відновлення працездатності без втручання адміністратора [121].

Важливим аспектом також є безпека. Оскільки апаратний ключ є джерелом істини для ліцензійної системи, доступ до нього має бути захищений на всіх рівнях – від фізичного до мережевого. Для цього використовуються протоколи

взаємної автентифікації (mTLS), ролева модель доступу (RBAC), ізольовані мережеві простори (NetworkPolicy), а також секрет-менеджери, які відповідають за безпечне зберігання криптографічних параметрів. Таким чином, забезпечується як цілісність процесу ліцензування, так і захист від внутрішніх і зовнішніх загроз.

У розподілених інфраструктурах, де доступ до апаратних ключів здійснюється через мережу, важливим завданням є мінімізація затримок і забезпечення стабільного каналу зв'язку. Для цього застосовуються технології VPN, Zero-Trust Network Access, а також системи моніторингу, що відстежують продуктивність ліцензійних запитів, рівень помилок та час відгуку (latency). За допомогою метрик типу p95 або p99 адміністратори можуть вчасно виявляти деградацію продуктивності та запобігати аваріям.

Також одним із ключових аспектів побудови відмовостійких сервісів є забезпечення високої доступності системи зберігання даних. Оскільки апаратний ключ є лише одним із компонентів комплексної інфраструктури захисту, стабільність роботи програмного сервісу значною мірою залежить від доступності бази даних, у якій зберігаються метадані ліцензій, журнали аудиту та конфігураційні параметри. У разі недоступності бази втрачається можливість фіксації операцій, виконання перевірок ліцензій або обробки транзакцій, що може призвести до блокування сервісу навіть за наявності справного апаратного ключа. Тому архітектура системи повинна враховувати механізми реплікації, автоматичного перемикавання між вузлами та розподілення навантаження [120].

Залежно від вимог до узгодженості даних, продуктивності та масштабованості можуть застосовуватися різні типи баз даних.

Традиційні реляційні системи керування базами даних (PostgreSQL, MySQL, SQL Server) забезпечують високу цілісність і транзакційність, що є критичним для ліцензійних операцій, де неприпустимі дублікати або некоректні стани. Для забезпечення доступності ці системи підтримують синхронну та асинхронну реплікацію, режим primary–standby, а також кворумні кластери на основі групової реплікації.

Нереляційні бази даних (MongoDB, Cassandra, Redis), натомість, краще підходять для високонавантажених і географічно розподілених систем, де важливо мінімізувати латентність і забезпечити горизонтальне масштабування.

У кластерних середовищах із використанням апаратних ключів доцільно комбінувати кілька типів сховищ залежно від задачі: реляційні СУБД використовуються для зберігання критичних параметрів ліцензування та аудиту, тоді як нереляційні сховища можуть застосовуватись для кешування частих запитів, зниження навантаження на основну базу та прискорення обробки операцій. Забезпечення високої доступності реалізується шляхом використання операторів Kubernetes (наприклад, Patroni для PostgreSQL або MongoDB Operator), механізмів автоматичного відновлення (self-healing), розподілених транзакцій та балансування навантаження. Таким чином система отримує здатність продовжувати роботу навіть за умов відмови окремих вузлів або цілих сегментів інфраструктури, що є фундаментальним для проєктування відмовостійких сервісів із апаратними ключами.

Отже, архітектура відмовостійких сервісів із використанням апаратних ключів має поєднувати кілька взаємопов'язаних рівнів – фізичний, програмний та оркестраційний. Ефективність таких систем визначається не лише наявністю резервних вузлів чи дублюванням обладнання, а й узгодженою роботою механізмів моніторингу, балансування навантаження, серіалізації доступу до ключа та контролю безпеки. Архітектура Active-Active (рис 1.3) повністю відповідає вимогам до доступності та оптимізує використання обчислювальних ресурсів (серверів). Кількість серверів можна збільшувати відповідно до навантаження що забезпечить високу доступність. Отже для подови програмного продукту буде доцільно обрати саме її.

5.1.3 Вимоги до відмовостійкості систем

Відмовостійкість – це здатність системи зберігати свою функціональність у разі виникнення збоїв окремих компонентів, забезпечуючи безперервність виконання основних процесів. Для серверів ліцензування, які взаємодіють з

апаратними ключами, вимоги до відмовостійкості є критично важливими, оскільки будь-яка втрата доступу до ключа призводить до зупинки роботи програмного забезпечення, що може спричинити значні фінансові та операційні втрати [122].

Загальні вимоги до відмовостійких систем визначаються на основі трьох ключових критеріїв: доступності (availability), надійності (reliability) та відновлюваності (recoverability) (рис. 4).

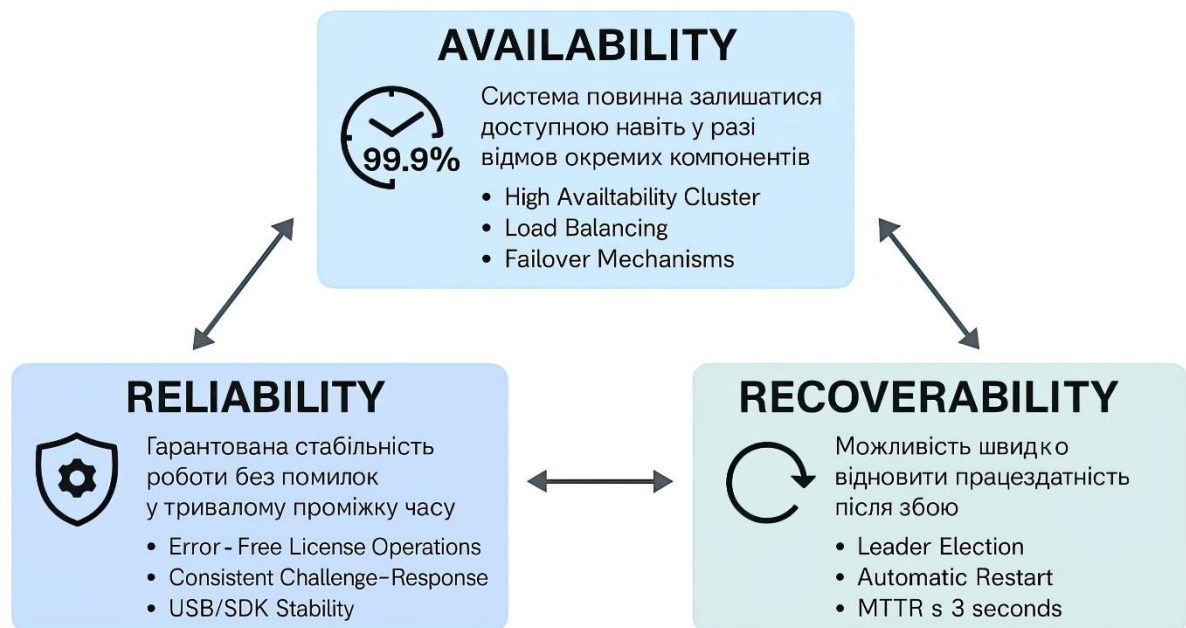


Рисунок 4. Складові відмовостійкості системи ліцензування з апаратними ключами [авторська розробка]

Доступність характеризує відсоток часу, протягом якого система працює безперебійно. Для критичних сервісів, таких як ліцензійні сервери, типовими орієнтирами є показники 99.9% (так звана “три дев’ятки”) або вище. Це означає, що сумарний час простою не повинен перевищувати кількох хвилин на місяць на табл. 1. [123]

Надійність визначається здатністю системи виконувати свої функції без збоїв протягом певного періоду часу, а відновлюваність – часом, необхідним для повернення системи до робочого стану після відмови.

Таблиця 1. Рівні доступності сервісу та відповідний час простою

Відсоток безвідмовної роботи	Щомісячний простій	Щорічний простій
99.5%	3,6 години	43,8 години
99,9%	43 хвилини	8,76 години
99,99%	4,3 хвилини	52,6 хвилини
99,999%	26,3 секунди	5,256 хвилини

Для забезпечення таких характеристик у системах із апаратними ключами мають бути реалізовані певні технічні й організаційні вимоги.

По-перше, необхідно передбачити фізичне резервування компонентів – використання декількох вузлів або серверів, які можуть дублювати функції основного у разі його виходу з ладу. Якщо ключ є єдиним фізичним пристроєм, то слід передбачити наявність резервного ключа з ідентичними правами або використання схеми “primary-secondary” із можливістю швидкого перемикання доступу.

По-друге, система повинна мати механізми автоматичного виявлення відмов і перемикання (failover). Це передбачає безперервний моніторинг стану апаратного ключа, ліцензійного демона, мережевого з’єднання та контейнерів, у яких вони працюють. При втраті зв’язку або виявленні помилки система має самостійно ініціювати перезапуск або переключення на резервний вузол без втручання оператора.

По-третє, важливим є забезпечення цілісності даних та синхронізації станів між активними й резервними компонентами. Усі зміни ліцензійних даних, лічильників або журналів доступу повинні зберігатися у транзакційному вигляді та передаватися в резервну копію для уникнення втрати інформації при відмові.

Ще однією вимогою є ізоляція відмов, тобто запобігання каскадному впливу збоїв. Вихід з ладу одного вузла або контейнера не повинен впливати на стабільність усього кластера. Для цього використовуються механізми оркестрації, такі як PodDisruptionBudget, anti-affinity, node taints та topology

spread constraints, які обмежують кількість одночасно недоступних компонентів і забезпечують їх розподіл по різних фізичних або віртуальних хостах.

Важливо також визначити вимоги до моніторингу та спостережуваності. Система має збирати показники часу відгуку, кількості успішних та неуспішних запитів, стану ключа, продуктивності мережі, використання ресурсів та інших параметрів, що характеризують її стабільність. Наявність таких метрик дозволяє проактивно виявляти проблеми та вживати заходів до настання критичних відмов.

Не менш значущим є питання безпеки, яке тісно пов'язане з відмовостійкістю. Будь-яке втручання в роботу апаратного ключа, спроби несанкціонованого підключення або підміни пристрою можуть призвести до зупинки системи, тому важливо реалізувати контроль автентичності компонентів (mTLS).

Щодо експлуатаційних вимог, система повинна підтримувати оновлення без простоїв (rolling updates) і мати механізми rollback у разі невдалого оновлення програмного забезпечення. Це особливо актуально для середовищ, у яких обслуговування ліцензійного сервера відбувається без зупинки критичних бізнес-процесів.

Крім того, важливо забезпечити географічну відмовостійкість – можливість роботи системи у разі втрати цілого дата-центру або мережевого сегмента. Для цього застосовується реплікація ключів або ліцензійних серверів у різних зонах доступності (Availability Zones), синхронізація станів та глобальне балансування навантаження з автоматичним маршрутизацією трафіку [124].

Також однією з ключових вимог до відмовостійкості апаратного ключа є його здатність продовжувати роботу у випадку часткової втрати доступу до окремих компонентів або інфраструктурних сервісів. Оскільки апаратний ключ є фізичним носієм логіки ліцензування, його відмова безпосередньо впливає на доступність програмного забезпечення. Тому пристрій має підтримувати автономний режим функціонування, зберігати працездатність при тимчасовій втраті мережевого з'єднання, забезпечувати захищену обробку запитів та

гарантувати цілісність криптографічних операцій незалежно від стану зовнішніх ресурсів. До базових вимог входять також захист від фізичного доступу, стійкість до перебоїв живлення та здатність до автоматичного відновлення після перезапуску.

Окремим аспектом відмовостійкості апаратного ключа є наявність GPS-модуля, який забезпечує контроль місцезнаходження пристрою та виступає додатковим механізмом виявлення аномалій. У випадку втрати супутникового сигналу, появи надмірних похибок координат або повної недоступності GPS, ключ повинен переходити в безпечний режим роботи, у якому криптографічні операції виконуються з використанням резервних параметрів або обмеженої функціональності. Це запобігає ситуаціям, коли тимчасові порушення у прийомі GPS-сигналу можуть призвести до збою ліцензійної системи або помилкового блокування користувачів. Важливою вимогою є також наявність допустимого діапазону похибки, який дозволяє уникнути помилкових спрацювань захисту під час природних флуктуацій супутникових даних.

GPS-модуль виконує також функцію сенсора безпеки, що дозволяє виявляти спроби фізичного переміщення або викрадення ключа. Відповідно, вимоги до відмовостійкості включають механізм поведінки пристрою у разі різкої зміни координат або виходу за межі дозволеного геопериметру. За таких ситуацій апаратний ключ повинен негайно активувати захисні процедури: перейти у режим часткового або повного блокування, змінити параметри шифрування, сформувати подію безпеки для серверної інфраструктури та передати відповідні сповіщення до системи моніторингу. Це забезпечує можливість оперативного реагування та мінімізує ризик компрометації, навіть якщо фізичний доступ до пристрою був отриманий зловмисником.

Отже, узагальнюючи, основними вимогами до відмовостійких систем ліцензування з апаратними ключами є:

- наявність резервування фізичних і програмних компонентів,
- автоматичне виявлення відмов і перемикання на резерв,
- забезпечення цілісності й узгодженості даних,

- ізоляція збоїв та обмеження їхнього впливу,
- безперервний моніторинг, аудит і звітність,
- гарантії безпеки доступу до ключів,
- підтримка оновлень без зупинки роботи,
- можливість географічного відновлення після катастрофічних відмов.

Виконання зазначених вимог є передумовою побудови надійної системи ліцензування, здатної функціонувати в умовах сучасних контейнеризованих середовищ, забезпечуючи високу доступність, мінімальний час простою та стабільну роботу критичних сервісів.

5.1.4 Метод забезпечення відмовостійкості та доступності серверів ліцензування з апаратними ключами в контейнеризованому середовищі

Метод забезпечення відмовостійкості серверів ліцензування ґрунтується на необхідності адаптації традиційних підходів до роботи з апаратними ключами в умовах сучасних контейнеризованих і хмарних середовищ. Головна проблема полягає у тому, що фізичний апаратний ключ, будучи матеріальним носієм ліцензії, не може бути безпосередньо масштабований або дубльований як програмний ресурс. Тому такий метод має забезпечити логічне розширення доступності такого ключа за рахунок розподілу обчислювальних навантажень, організації керованого доступу до нього та використання механізмів автоматичного відновлення у разі збоїв.

Сутність методу забезпечення відмовостійкості серверів ліцензування полягає у поєднанні програмно-апаратного резервування із засобами оркестрації контейнерів. При цьому, основна ідея – це відокремити апаратний ресурс (ключ) від програмних компонентів, які його використовують, і надати до нього доступ через спеціалізований сервіс-шлюз. Цей сервіс працює як єдина точка взаємодії між контейнерами, що потребують ліцензії, та фізичним ключем, забезпечуючи контроль черги запитів, автентифікацію клієнтів, перевірку стану пристрою та автоматичне перемикання у разі збою.

На рис. 5 представлено реалізацію вище описаного методу із використанням трирівневої архітектури.

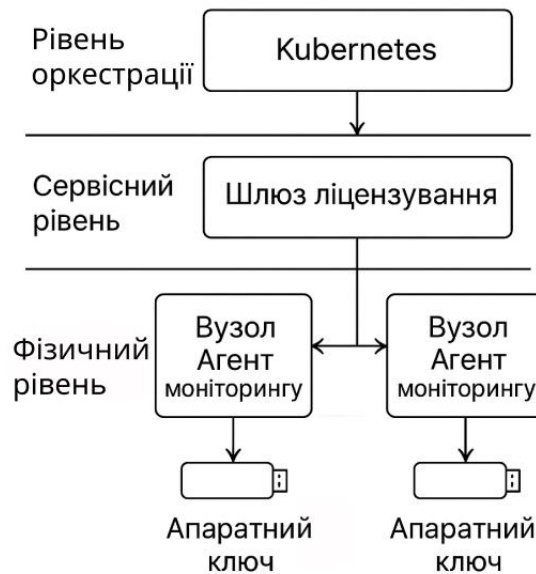


Рисунок 5. Методу доступу до апаратного ключа на базі трирівневої архітектури [авторська розробка]

Перший рівень – фізичний, до складу якого входять вузли з під’єднаними апаратними ключами. На цьому рівні реалізуються функції апаратного моніторингу, виявлення несправностей та відновлення роботи USB-портів. Для цього використовується агент спостереження, який контролює стан ключів, виконує періодичне опитування, фіксує підключення та відключення, а також передає метрики у систему моніторингу.

Другий рівень – сервісний, який реалізує програмну логіку взаємодії контейнерів з апаратним ключем. У межах цього рівня створюється окремий контейнер-шлюз (License Gateway), який працює у режимі active-active або active-passive. Шлюз взаємодіє з фізичним ключем за допомогою драйвера або SDK від постачальника (наприклад, CodeMeter, Sentinel або FlexNet) і надає інтерфейс REST/gRPC для інших мікросервісів. У разі відмови основного вузла система автоматично обирає новий активний програмний вузол за допомогою механізму leader election, що мінімізує час простою.

Третій рівень – оркестраційний, який забезпечує керування контейнерами, моніторинг стану системи, автоматичне масштабування та балансування навантаження. Для реалізації цього рівня використовується ПЗ Kubernetes, що дозволяє розподіляти сервіси між вузлами, проводити оновлення без простоїв (rolling updates), а також реалізовувати політики доступності за допомогою таких інструментів, як PodDisruptionBudget, node affinity/anti-affinity та topology spread constraints.

Ключовим елементом методу є впровадження механізму динамічного виявлення та перепідключення ключів, який у разі фізичного від'єднання пристрою або втрати зв'язку ініціює повторне підключення без потреби зупинки контейнерів. Це досягається завдяки спеціальному драйверу-посереднику, який взаємодіє із системними службами операційної системи та перехоплює події USB.

Ще одним важливим компонентом є система моніторингу та виявлення помилок у системі, що інтегрується з Prometheus або Grafana. Вона відстежує метрики доступності ключа, затримку запитів, кількість активних ліцензій, частоту збоїв і тривалість їхнього усунення. Зібрані дані дозволяють оцінювати фактичний рівень доступності сервісу (SLA, SLO) та своєчасно реагувати на потенційні відмови [125].

У методі доступу до апаратного ключа на базі трирівневої архітектури також реалізується механізм резервного доступу до нього. Це стає можливим завдяки створенню двох вузлів – основного і резервного, між якими налаштовано реплікацію метаданих ліцензій і синхронізацію станів. У разі відмови основного вузла система автоматично переведе навантаження на резервний за допомогою протоколів Keeralived або VRRP, що дозволяє зберегти безперервність обслуговування клієнтів.

Для підвищення безпеки метод передбачає використання взаємної автентифікації (mTLS) між контейнерами та шлюзом, контролю доступу (RBAC) на рівні кластеру та керування секретами через системи Vault або KMS. Таким чином забезпечується захист як переданих даних, так і апаратних ресурсів від несанкціонованого доступу (рис. 6).

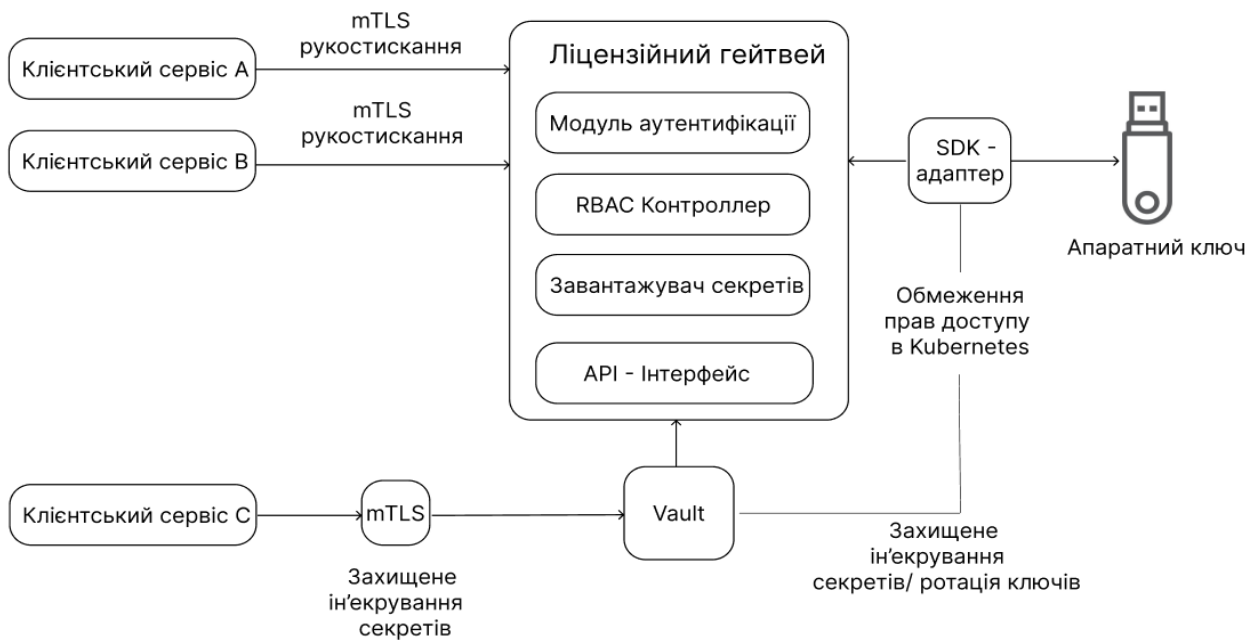


Рисунок 6. Запропонована схема захищеної комунікації
між контейнерами та сервісом-шлюзом [авторська розробка]

Метод доступу до апаратного ключа на базі трирівневої архітектури поєднує переваги апаратного захисту з можливостями контейнерної оркестрації, що дозволяє досягти високого рівня відмовостійкості, гнучкості й масштабованості систем ліцензування. Його впровадження дає змогу зменшити час простою ліцензійних серверів, мінімізувати ризики втрати доступу до апаратних ключів і підвищити ефективність управління ліцензійною інфраструктурою у сучасних корпоративних середовищах.

5.1.5 Апаратна частина ключа в контейнеризованому середовищі

Проектування апаратної частини апаратного ключа є одним із ключових етапів створення надійної системи ліцензування, оскільки саме на цьому рівні формується фізичний носій криптографічної інформації та механізм її безпечної обробки. Апаратний ключ виконує функції зберігання секретних параметрів, виконання криптографічних операцій і забезпечення автентичності, виступаючи центральною ланкою між програмним забезпеченням та захищеною ліцензійною логікою.

Апаратною основою ключа доцільно обрати мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 (рис. 7), який поєднує високу обчислювальну продуктивність, доступність та широкий набір інтерфейсів, необхідних для реалізації кастомного USB-пристрою.

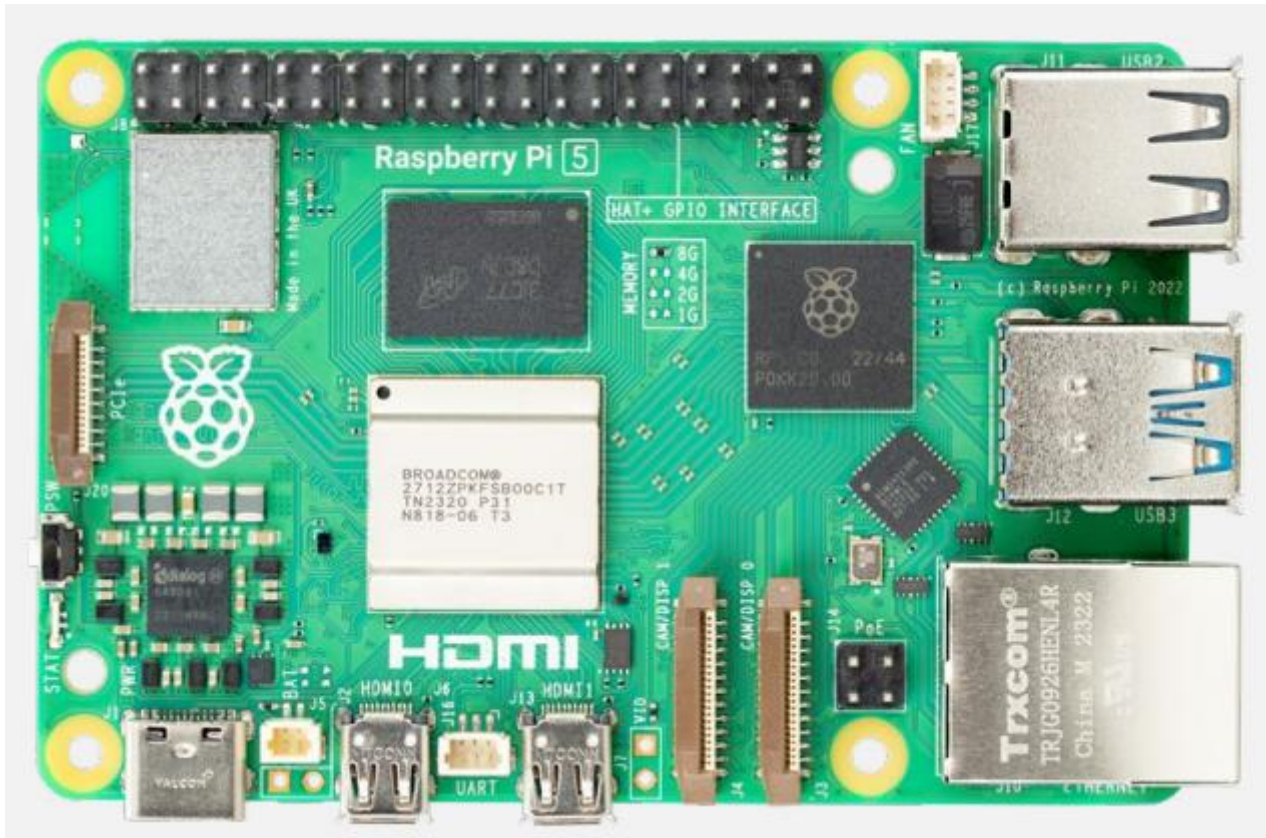


Рисунок 7. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 [126]

Пристрій оснащений портами USB та Ethernet, що розширює можливості його інтеграції в інфраструктуру. Порт USB використовується для підключення GPS-модуля, який забезпечує визначення координат у процесі роботи, тоді як інтерфейс Ethernet слугує для підключення апаратного ключа до серверної мережі. Це дозволяє програмному забезпеченню, встановленому на мікроконтролері, отримувати власну IP-адресу та забезпечувати стабільну взаємодію з іншими компонентами системи.

Для розміщення апаратного ключа на основі Raspberry Pi 5 із підключеним GPS-модулем NEO-8M та інтерфейсом Ethernet використовується спеціалізований промисловий корпус GEEKOM IT 13 Mini PC (рис 8).



Рисунок 8. Промисловий корпус GEEKOM IT 13 Mini PC для оболонки апаратного ключа [127]

Такий корпус забезпечує захист пристрою від механічних впливів, електромагнітних завад та несанкціонованого фізичного доступу, що є критично важливим у контексті розробки засобів апаратної безпеки. Алюмінієві моделі корпусів також виконують функцію пасивного радіатора, відводячи тепло від високопродуктивного процесора Raspberry Pi 5 та забезпечуючи стабільність його роботи під час виконання криптографічних операцій.

Корпус повинен мати достатній внутрішній простір для розміщення самої плати Raspberry Pi 5, GPS-модуля NEO-8M та необхідних комунікаційних інтерфейсів. Наявність зовнішніх отворів під роз'єми Ethernet і USB забезпечує можливість прямої інтеграції апаратного ключа до серверної інфраструктури та підключення GPS-антени.

З огляду на те, що робота GPS-модуля потребує якісного прийому супутникового сигналу, конструкція корпусу передбачає використання зовнішньої SMA-антени або встановлення внутрішньої керамічної антени у разі

застосування пластикового корпусу з низьким рівнем екранування. Розміри такі: ширина – 12см, довжина – 11см та висота – 5см, та вага 0,652 кг.

Особливу увагу приділено теплотехнічним та інженерним характеристикам корпусу. Raspberry Pi 5 має високий тепловий пакет, тому корпус має забезпечувати можливість пасивного або комбінованого (пасивно-активного) охолодження. Алюмінієві промислові корпуси, такі як GEEKOM IT 13 Mini PC, дозволяють знизити температуру процесора на 10–20 °С, підвищуючи надійність роботи пристрою. У комплексі такі корпуси забезпечують оптимальні умови для стабільної роботи Ethernet-інтерфейсу, GPS-модуля та криптографічних алгоритмів, зберігаючи при цьому компактність і захищеність апаратного ключа в умовах реальної експлуатації [128].

Для підвищення рівня безпеки до структури апаратного ключа інтегрується GPS-модуль (рис. 9), який забезпечує постійний контроль фактичного місцезнаходження пристрою.



Рисунок 9. GPS модуль NEO-8M [129]

Як навігаційний компонент доцільно використати модуль NEO-8M, що характеризується високою точністю визначення координат та швидким отриманням сигналу від супутникових систем.

Застосування GPS-модуля дає змогу реалізувати механізми географічного прив'язування криптографічних операцій, виявляти несанкціоноване переміщення ключа та автоматично активувати захисні режими у разі виходу за визначений

геопериметр, що суттєво підвищує стійкість системи до фізичних атак. Хоча точність визначення координат модуля становить до двох метрів, з практичних міркувань програмної реалізації доцільно збільшити припустиму похибку до п'ятдесяти метрів. Такий підхід запобігає помилковим спрацюванням захисних механізмів у разі тимчасових збоїв супутникового сигналу та гарантує безперебійну роботу програмного забезпечення навіть за умов нестабільного GPS-покриття.

Структурна модель апаратного ключа (рис. 10) являє собою апаратно-програмний комплекс, що поєднує кілька функціональних модулів, інтегрованих у єдиний пристрій. Основою конструкції є міні-комп'ютер GEEKOM IT13 Mini PC, корпус якого забезпечує достатній внутрішній простір для розміщення плати Raspberry Pi 5, GPS-модуля NEO-8M, додаткових сенсорів та допоміжних комунікаційних інтерфейсів. Завдяки компактності та продуманій конструкції корпус дозволяє розмістити апаратні компоненти таким чином, щоб забезпечити захист від фізичного доступу, стабільне охолодження та можливість виведення зовнішніх інтерфейсів.

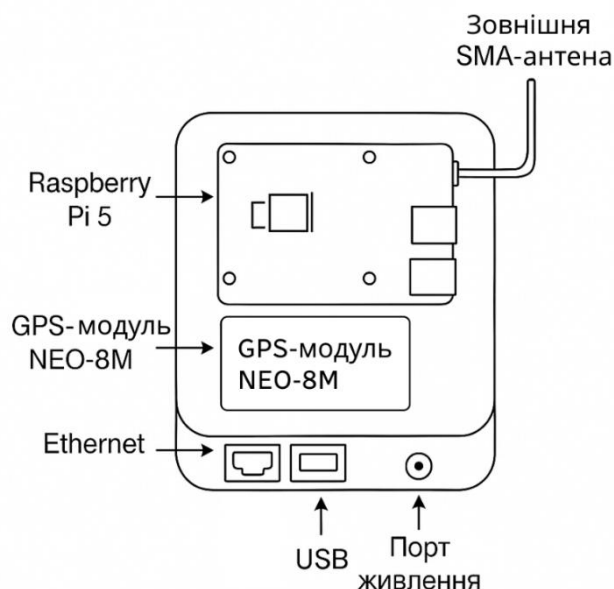


Рисунок 10. Структурна модель апаратного ключа [авторська розробка]

Розглянемо будову окремих модулів апаратного ключа.

У конструкцію апаратного ключа входить міні-комп'ютер Raspberry Pi 5, який виконує основну обчислювальну логіку: обробку криптографічних операцій, виконання ліцензійних алгоритмів, взаємодію з сервером через Ethernet та керування периферійними модулями. Плата під'єднується до внутрішнього живлення корпусу та має прямий доступ до мережевого інтерфейсу, що дозволяє мікрокомп'ютеру отримувати статичну або динамічну IP-адресу та працювати в клієнтсько-серверній інфраструктурі.

Другим ключовим елементом моделі є GPS-модуль NEO-8M, який відповідає за визначення географічних координат і контроль місцезнаходження апаратного ключа. Він з'єднується з Raspberry Pi 5 через USB або UART та може використовувати як внутрішню керамічну антену, так і зовнішню SMA-антену, використання якої забезпечує стабільний прийом сигналу всередині приміщень або в умовах значного екранування. GPS-модуль виконує функції захисту, включно з визначенням аномального переміщення, ініціюванням захисного режиму при зміні координат та виявленням втрати супутникового сигналу.

Корпус GEEKOM IT13 Mini PC використовується як зовнішній захисний контейнер, який поєднує компактність, міцність і достатній простір для встановлення обладнання. Він оснащений вентиляційними прорізами, монтажними отворами та можливістю фіксації додаткових компонентів. На корпус виводяться ключові інтерфейси:

- Ethernet – для підключення апаратного ключа до серверної мережі;
- USB – для інтеграції GPS-модуля та можливого обслуговування пристрою;
- SMA-роз'єм – для зовнішньої GPS-антени;
- порт живлення – для стабільної роботи усіх внутрішніх модулів.

Структурна модель також передбачає наявність внутрішньої схеми моніторингу, яка забезпечує контроль температури, живлення, працездатності модулів та стану GPS-сигналу.

Усі події передаються до серверної інфраструктури, що дозволяє системі ліцензування реагувати на будь-які відхилення у роботі апаратного ключа.

Захист апаратної частини реалізується шляхом використання комплексу інженерно-технічних та програмно-криптографічних заходів. Корпус апаратного ключа виготовляється з антивандальних матеріалів, а кристал мікросхеми додатково герметизується компаундом, що унеможлиблює доступ до внутрішніх елементів та суттєво ускладнює фізичний реверс-інжиніринг.

Окрім фізичного захисту, критично важливою є безпека прошивки мікроконтролера. Для цього застосовуються такі механізми:

- блокування інтерфейсів відлагодження (SWD/JTAG) після встановлення прошивки, що унеможлиблює її пряме зчитування;
- шифрування прошивки перед записом у пам'ять мікроконтролера, що робить недоступним її аналіз навіть у разі фізичного доступу до пам'яті;
- використання контрольних сум та цифрових підписів, які забезпечують верифікацію цілісності прошивки під час запуску.

Для запобігання витоку критичних даних і ключової логіки, у мікросхемі реалізовано механізм самознищення інформації при спробі несанкціонованого доступу. Такий механізм активується у випадках:

- виявлення доступу через заблокований SWD/JTAG інтерфейс;
- спроби зчитування пам'яті за допомогою сторонніх програматорів;
- аномальної поведінки живлення або тактової частоти, що може свідчити про використання атак типу fault-injection;
- багаторазового введення некоректного адміністративного пароля.

У разі активації механізму захисту мікроконтролер здійснює безповоротне очищення пам'яті, включно з криптографічними ключами, частиною логіки обчислень та службовими даними. Це робить неможливим відтворення алгоритмів, що зберігалися на апаратному ключі, та повністю нівелює спроби реверс-інжинірингу або фізичного копіювання пристрою. Використання таких багаторівневих заходів захисту забезпечує високий рівень стійкості апаратного ключа до фізичного злому, аналізу прошивки та крадіжки інтелектуальної власності.

Для запобігання фізичній підміні апаратного ключа застосовуються програмні механізми захисту. У випадку, коли ключ виконує лише бінарне повернення результату (true/false), що інтерпретується як авторизований або неавторизований стан, його функціональність може бути відносно легко емульована сторонніми засобами. Натомість розміщення на апаратному ключі критично важливих обчислювальних процедур, необхідних для коректного функціонування програмного забезпечення, робить підміну фактично неможливою. Відтворення таких алгоритмів вимагало б повного дублювання апаратної логіки, що є технічно вкрай складним та економічно недоцільним. У разі спроби фізичного втручання працює tamper-система, яка блокує пристрій або стирає секретні дані. Контролер може виконувати самотестування, перевірку CRC, контроль напруги та температури, що гарантує стабільну роботу навіть в умовах коливань живлення або температурних перепадів.

Окремим типом загроз є фізичне проникнення злоумисника до дата-центру з метою викрадення апаратного ключа або флеш-модуля, що містить критично важливі дані та логіку шифрування. У такому випадку система захисту переходить у режим підвищеної безпеки та активує низку захисних механізмів:

По-перше, апаратний ключ оснащений вбудованим GPS-модулем який постійно контролює своє місцезнаходження. У разі зміни координат, що не відповідає дозволені зонам експлуатації (геопериметру), або раптового зникнення живлення у захищеному середовищі, пристрій автоматично переходить у режим порушення безпеки. У цьому стані ключ змінює внутрішні параметри роботи та формує альтернативну криптографічну послідовність, відмінну від тієї, що використовувалася у штатному режимі. Внаслідок цього всі подальші операції шифрування та дешифрування стають некоректними для легітимної системи, що унеможлиблює відновлення первинної логіки обчислень навіть при фізичному доступі до пристрою.

По-друге, програмна інфраструктура, що взаємодіє з ключем, здійснює постійний моніторинг його стану. При втраті зв'язку з датчиком місцезнаходження або при фіксації аномальних координат система генерує

аварійні сповіщення для адміністраторів. Такі сповіщення надходять у реальному часі через системи моніторингу та журналювання (наприклад, Prometheus Alertmanager або SIEM-платформи), що дозволяє оперативно виявити факт викрадення.

По-третє, у разі підтвердження викрадення апаратного ключа спеціальний модуль безпеки на сервері ініціює ревокацію криптографічних матеріалів, що були пов'язані з цим ключем. Це включає генерацію нових ключів шифрування, перезапис конфігурації системи та блокування будь-яких операцій, пов'язаних із скомпрометованим пристроєм.

Таким чином, навіть у випадку фізичного доступу до дата-центру та викрадення флеш-модуля, зловмисник не отримує можливості зламати систему або відновити логіку її роботи. Завдяки поєднанню GPS-контролю, автоматичного переходу в захисний режим, механізмів алертингу та криптографічної ревокації забезпечується високий рівень стійкості до фізичних атак та захист від компрометації інтелектуальної власності.

У представленому методі особливу увагу приділено забезпеченню сумісності апаратного ключа з контейнеризованими середовищами. Апаратний ключ під'єднується до серверної інфраструктури через Ethernet-інтерфейс, отримуючи статичну або динамічну IP-адресу, що дозволяє використовувати його як повноцінний мережевий пристрій у кластері.

Після отримання IP-адреси ключ стає доступним для сервісів Kubernetes через внутрішню мережеву взаємодію, що значно підвищує його гнучкість і зменшує залежність від фізичного розміщення. Для інтеграції апаратного ключа у Kubernetes-кластер використовується механізм Device Plugin, який автоматично позначає вузли, що мають доступ до ключа, та направляє відповідні поди саме на ці вузли. Такий підхід забезпечує гарантований доступ сервісів до апаратного ключа незалежно від того, на якому фізичному обладнанні вони розгорнуті. Крім того, апаратний ключ може працювати як через локальний USB, так і через USB-over-IP, що дозволяє розміщувати пристрій окремо від вузлів кластера без втрати функціональності (рис. 11).

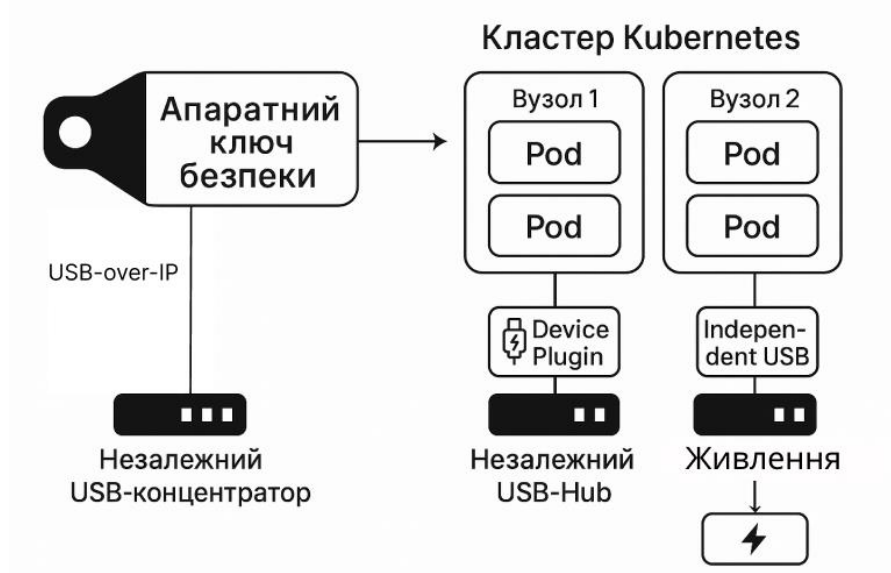


Рисунок 11. Інтеграція апаратного ключа з Kubernetes-кластерами засобами USB / USB-over-IP та механізм Device-Plugin [авторська розробка]

Для підвищення відмовостійкості інфраструктура доповнюється незалежними USB-хабами, резервованим живленням та можливістю гарячої заміни апаратного ключа без зупинки сервісів. Це забезпечує стабільну роботу системи навіть за умови часткових збоїв обладнання.

Розглянута апаратна архітектура на базі Raspberry Pi 5 забезпечує високу гнучкість, захищеність та сумісність із сучасними обчислювальними середовищами, дозволяючи реалізувати всі необхідні функції ліцензійного апаратного ключа та відповідати вимогам безпеки, автономності й надійності.

5.1.6 Програмна реалізація доступу до апаратного ключа

Розглянемо програмну модель доступу до апаратного ключа, що представлено на рис. 12, яка покликана ізолювати фізичну специфіку апаратного ключа від прикладних сервісів та забезпечити керований, спостережуваний і відмовостійкий доступ до ліцензійного механізму.



Рисунок 12. Програмна модель доступу до апаратного ключа [авторська розробка]

Основною концепцією є впровадження проміжного шару сервісу-шлюзу ліцензування, який інкапсулює взаємодію з вендорським SDK, реалізує політики керування чергою запитів, механізми ідемпотентності операцій та аудит доступу, а також надає стандартизований інтерфейс взаємодії (REST/gRPC) для всіх споживачів у кластері. Такий підхід гарантує, що прикладні мікросервіси ніколи не звертаються до апаратного ключа напряду та залишаються незалежними від його фізичного розміщення, типу драйвера, особливостей встановлення або змін у вендорській реалізації [130].

Додатковою перевагою такого підходу є можливість забезпечення рівномірного розподілу навантаження між кількома апаратними ключами, у випадку якщо інфраструктура містить декілька вузлів, кожен з яких має власний фізичний носій ліцензії. Шлюз ліцензування може виконувати балансування запитів, автоматичне перемикавання між ключами при відмовах, а також централізований моні-

торинг стану кожного пристрою. Це значно підвищує надійність роботи системи та мінімізує ризик простою сервісів у випадку збоїв на рівні окремого вузла.

Оскільки представлений метод забезпечує максимально захищене, кероване та масштабоване використання апаратного ключа, клієнтам, що впроваджують подібну систему захисту свого програмного забезпечення, рекомендовано застосовувати саме таку архітектуру. Вона дозволяє досягти високої ефективності використання ключа, мінімізувати вплив на бізнес-логіку при збоях апаратної частини, а також забезпечує централізоване адміністрування, швидке розширення інфраструктури та відповідність вимогам інформаційної безпеки. Логічна модель складається з трьох шарів (рис 13).

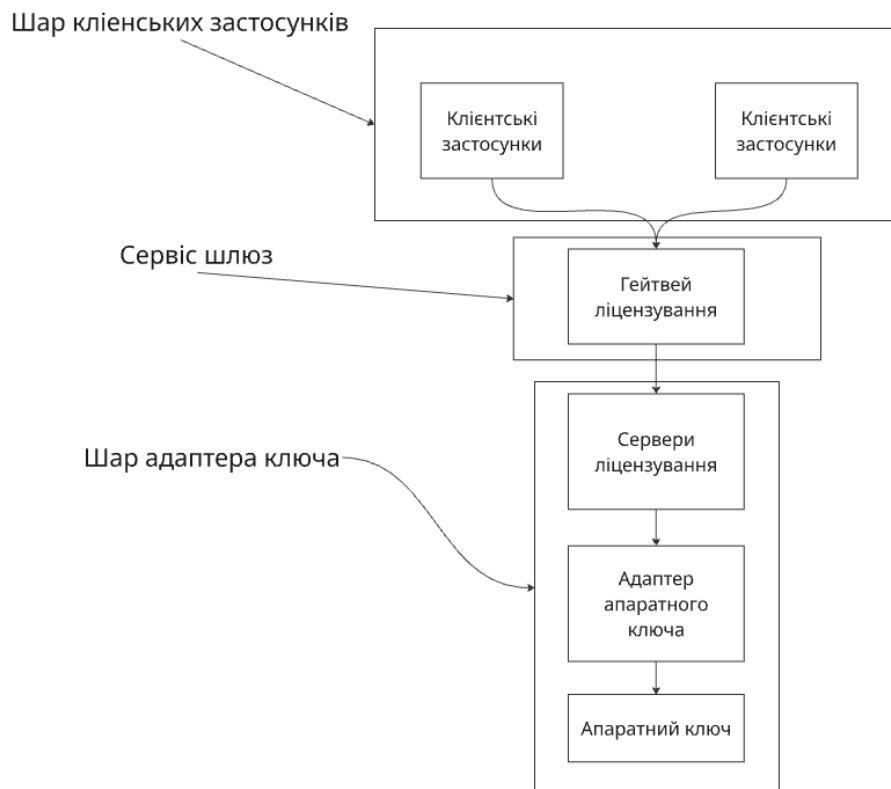


Рисунок 13. Логічна модель доступу до апаратного ключа [авторська розробка]

На периферії знаходиться шар клієнтських застосунків та мікросервісів бізнес-домену, що виконують запити на отримання або звільнення ліцензії в межах транзакції роботи користувача чи обчислювальної задачі.

У центрі розташовано сервіс-шлюз, який приймає запити, автентифікує клієнтів за допомогою взаємних сертифікатів, проводить авторизацію за ролями

та політиками, застосовує обмеження швидкості, формує чергу на доступ до ключа і гарантує коректне завершення життєвого циклу “checkout–use–return”.

У нижньому шарі функціонує адаптер до апаратного ключа, що інкапсулює вендорське SDK, керує сесіями, виконує challenge–response та проводить локальну самодіагностику стану пристрою і драйверів.

Щоб забезпечити високу доступність, сервіс-шлюз розгортається у кількох репліках, між якими реалізовано механізм вибору лідера. Лідер має ексклюзивний доступ до адаптера ключа, тоді як інші інстанси обробляють автентифікацію, черги та метрики, але перенаправляють критичні виклики до активного екземпляра через внутрішній RPC. Такий підхід дозволяє масштабувати фронт оброблення запитів і водночас уникати конкуренції за доступ до фізичного пристрою. Перемикання лідера відбувається автоматично за наявності ознак деградації (втрата heartbeat, збій SDK, зростання p95 часу `checkout()`), що мінімізує час простою.

Комунікація між компонентами будується на принципах нульової довіри. Усі виклики до шлюзу підписуються і шифруються (mTLS), сертифікати мають короткий строк дії та автоматично ротуються через механізм видавця сертифікатів у кластері.

Авторизація здійснюється на основі атрибутів запиту: типу продукту, редакції, кількості одночасних місць, контексту проєкту та дозволених дій. Політики конфігуруються декларативно і зберігаються у централізованому сховищі конфігурацій, що дає змогу виконувати зміну правил без перезапуску сервісів і без впливу на працюючі сесії. Стан системи розмежовується. Джерелом істини щодо кількості доступних ліцензій виступає сам апаратний ключ або вендорський демон; будь-які проміжні кеші слугують лише для телеметрії та оптимізації з'єднань.

Для уникнення подвійних списань кожна операція `checkout()` має ідемпотентний ідентифікатор, а у разі повторного виклику в межах тайм-вікна шлюз повертає поточний стан без додаткового споживання ліцензії. У випадках втрати зв'язку реалізується механізм автоматичного відновлення сесії: при

короткочасних збоїв застосовується повтор із експоненційною затримкою, при триваліших – примусове повернення “завислих” оренд після контрольного тайм-ауту з подальшим аудитом [131].

Спостережуваність закладається як невід’ємна властивість архітектури. Кожен виклик фіксується у журналах із кореляційним ідентифікатором, метрики експортуються у систему моніторингу та включають рівень успішності, затримку на різних етапах обробки, глибину черги, кількість активних сесій, частоту відмов SDK і події апаратного рівня (detach/attach, помилки шини). На основі цих показників визначаються SLI та SLO, формується error budget і налаштовуються попереджувальні сповіщення про вичерпання ліцензій, деградацію p95/p99 затримок і флапінг пристрою. Для розбору інцидентів передбачено знеособлений трейсинг запитів із мінімально необхідним набором полів.

З міркувань безпеки та керованості секрети (ключі шифрування, токени адміністрування, приватні сертифікати) зберігаються у зовнішньому сховищі секретів із журнальним доступом і політиками мінімальних привілеїв. Конфігурація під’єднання до вендорських сервісів, параметри тайм-аутів, обмеження на довжину сесії та профілі продуктивності постачаються через централізовані конфіг-джерела і підхоплюються під час виконання. Оновлення сервісів відбуваються за схемою без простоїв: для шлюзу застосовується стратегія поступового виведення з експлуатації, для адаптера – контрольована передача лідерства і від’єднання з коректним поверненням усіх активних оренд [132].

Особлива увага приділяється тестуванню стійкості. Архітектура враховує сценарії хаос-експериментів: раптове від’єднання USB, штучні затримки на мережевому шляху, збої у вендорському SDK, падіння лідера та відмови вузла. Для кожного сценарію визначено очікувану поведінку (непорушність інваріантів, гарантоване повернення ліцензії, межі допустимої деградації затримок) і порядок відновлення. Функціональні тести перевіряють коректність

бізнес-правил видачі, а навантажувальні оцінюють пікові `checkout rate` і стабільність під тривалим тиском з різними профілями запитів.

Взаємодія з прикладними командами спрощується за рахунок стабільного контракту API і офіційних SDK-обгортки, які інкапсулюють усі вимоги безпеки, генерацію ідемпотентних ключів, повтори з бюджетом і телеметрію.

Таким чином, розробники бізнес-функцій отримують прозорий сервіс ліцензування як платформенну можливість, не занурюючись у деталі роботи з фізичним пристроєм. У підсумку архітектура забезпечує керованість, відмовостійкість і масштабованість, дозволяючи експлуатувати апаратний ключ як надійний ресурс у контейнеризованому середовищі без компромісів щодо безпеки та доступності.

5.1.7 Метод підключення до апаратного ключа в кластерному середовищі

Проектування методу доступу до апаратного ключа в кластерному середовищі є одним із ключових етапів розроблення підходу до забезпечення відмовостійкості, адже саме від нього залежить стабільність і безперервність роботи всієї системи ліцензування. Основною метою створення методу є розподіл запитів на використання апаратного ключа між кількома контейнерами або вузлами без порушення цілісності даних, уникнення одночасного доступу до одного ресурсу, а також забезпечення автоматичного відновлення зв'язку у випадку збоїв.

У кластерному середовищі, де програмні сервіси розподілені між різними вузлами, апаратний ключ залишається фізично унікальним пристроєм. Це створює певну асиметрію: програмна інфраструктура може масштабуватись майже необмежено, тоді як апаратний ресурс є обмеженим і має підтримувати лише один активний канал взаємодії в певний момент часу. Для вирішення цього протиріччя було розроблено підхід до централізованого доступу з механізмом серіалізації запитів, який реалізує логіку “один активний доступ – багато клієнтів”.

Процес уведення апаратного ключа в експлуатацію починається ще на етапі його фізичної доставки до датацентру й завершується повноцінною інтеграцією в кластер та системи моніторингу.

Розглянемо поетапне виконання методу підключення до апаратного ключа в кластерному середовищі (рис. 14).



Рисунок 14. Етапи методу підключення до апаратного ключа в кластерному середовищі [авторська розробка]

Етап 1. Доставка та первинна перевірка. Апаратний ключ доставляється до датацентру в опломбованій упаковці. Адміністратор розпаковує пристрій, виконує візуальну перевірку цілісності корпусу, пломб та відсутності механічних пошкоджень. За потреби результати перевірки фіксуються в журналі приймання обладнання.

Етап 2. Підключення до інфраструктури живлення та мережі. Пристрій під'єднується до джерела живлення згідно з технічною документацією. Після цього апаратний ключ підключається до мережевої інфраструктури датацентру через порт Ethernet відповідного серверного сегмента (наприклад, захищеної VLAN з доступом лише до сервісів ліцензування).

Етап 3. Початкова ініціалізація та введення адміністративного пароля. Після увімкнення живлення апаратний ключ переходить у початковий режим ініціалізації, у якому вимагає введення адміністративного пароля. Адміністратор за допомогою консольного доступу (SSH, серійний порт або веб-інтерфейс керування) задає або змінює початковий пароль на унікальний, що відповідає політикам інформаційної безпеки організації. На цьому етапі також можуть створюватися додаткові облікові записи з обмеженими правами.

Етап 4. Налаштування мережевих параметрів та отримання IP-адреси. Далі виконується конфігурація мережі: пристрій може отримувати IP-адресу через DHCP або мати статичну адресу, зарезервовану в межах виділеного сегмента. Після присвоєння IP-адреси проводиться тестовий обмін пакетами (ping, перевірка доступу до службового порту) для підтвердження коректності мережевих налаштувань.

Етап 5. Реєстрація апаратного ключа в сервісі-шлюзі ліцензування. Отримана IP-адреса, ідентифікатор пристрою, серійний номер та інші атрибути вносяться в конфігурацію сервісу-шлюзу ліцензування. На цьому етапі ключ реєструється як окремий вузол у внутрішньому реєстрі ресурсів (наприклад, у конфігураційній базі або сховищі параметрів кластера), після чого шлюз отримує можливість здійснювати до нього контрольований доступ.

Етап 6. Інтеграція із системами моніторингу та виявлення помилок. Наступним кроком є підключення апаратного ключа до систем спостереження (моніторинг здоров'я сервісів, доступності, часу відповіді), а також налаштування правил сповіщень. Адміністратор конфігурує систему виявлення помилок на випадок втрати зв'язку з пристроєм, зміни його координат (згідно з GPS-модулем), повторних помилок автентифікації, некоректної роботи ліцензійного SDK тощо. Це забезпечує оперативне виявлення інцидентів безпеки та збоїв.

Етап 7. Інтеграція з кластером контейнеризації. На завершальному етапі апаратний ключ логічно “прив'язується” до кластерного середовища. У конфігурації Kubernetes або іншої системи оркестрації налаштовується сервіс

ліцензування (gateway), який знає про IP-адресу ключа, політики доступу до нього, таймаут та параметри повторних спроб. Для вузлів, на яких розгортається сервіс-шлюз, можуть бути задані спеціальні мітки (labels), node affinity або tolerations, якщо ключ фізично прив'язаний до конкретного сегмента мережі або вузла.

На цьому етапі програмне забезпечення може повноцінно використовувати можливості апаратного ключа у своїй роботі. Для цього мікросервіси надсилають запити на IP-адресу, яку було встановлено під час початкової конфігурації пристрою. Оскільки взаємодія здійснюється в межах локальної мережі датацентру, затримки при обміні даними є мінімальними, що забезпечує високу швидкість обробки операцій ліцензування. Проте, така конфігурація має суттєве обмеження: якщо програмний компонент, який взаємодіє з ключем, розгорнутий на одному фізичному сервері з пристроєм, то його відмова призведе до втрати доступності всієї системи ліцензування. Це суперечить вимогам до відмовостійкості, тому наступним етапом є розгортання повноцінного кластерного середовища.

Архітектурно метод доступу до апаратного ключа ґрунтується на концепції лідер–репліка, згідно з якою лише один вузол (лідер) у будь-який момент часу має ексклюзивний доступ до апаратного ключа (рис. 15). Усі інші вузли кластера перебувають у пасивному режимі та виконують роль реплік, готових перебрати функціональність лідера у разі його недоступності. Такий підхід розв'язує проблему єдиного фізичного ресурсу – апаратного ключа – забезпечуючи водночас масштабованість і високу доступність програмної інфраструктури.

Визначення активного вузла здійснюється за допомогою механізму leader election, що реалізується засобами Kubernetes через використання 'ConfigMap', 'Lease API' або спеціалізованих контролерів.

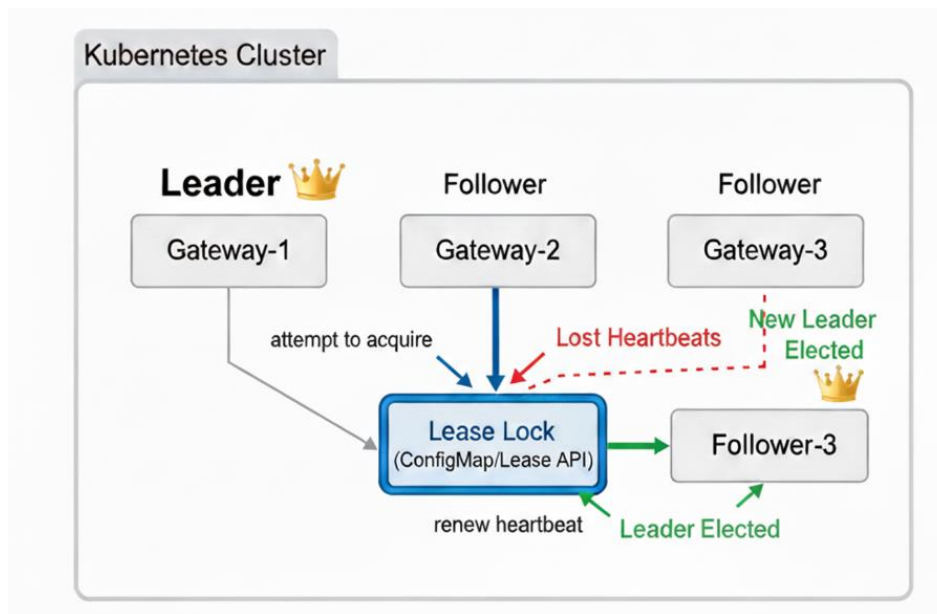


Рисунок 15. Реалізація концепції лідер – репліка для доступу до апаратного ключа [авторська розробка]

Після обрання лідера всі запити до апаратного ключа спрямовуються виключно до цього вузла через внутрішній сервіс-шлюз, що відповідає за серіалізацію запитів, контроль доступу та взаємодію з вендорським SDK. У разі збою лідера Kubernetes автоматично ініціює процедуру переобрання, і новий вузол миттєво перебирає роль активного. Це забезпечує безперервність роботи та мінімізує ризик простою ліцензійної системи навіть за умов часткових відмов інфраструктури.

Коли користувач або інший мікросервіс надсилає запит на отримання ліцензії, запит надходить у чергу шлюзу доступу до ключа. Кожному запиту присвоюється унікальний ідентифікатор та часовий штамп. Алгоритм перевіряє стан ключа, доступність лідера та відсутність активних транзакцій. Якщо ключ вільний, шлюз ініціює операцію `'checkout()'` через SDK виробника апаратного ключа, отримує токен доступу та передає його запитувачу. Токен має обмежений термін дії, після чого виконується автоматичне `'return()'` або подовження сесії при продовженні роботи користувача.

Для уникнення колізій у черзі запитів застосовується стратегія ідемпотентності (рис. 16): повторні запити з тим самим ідентифікатором не породжують нових сесій. Це виключає дублювання ліцензій і гарантує, що навіть при мережевих затримках або повторних викликах клієнт отримає один і той самий результат.

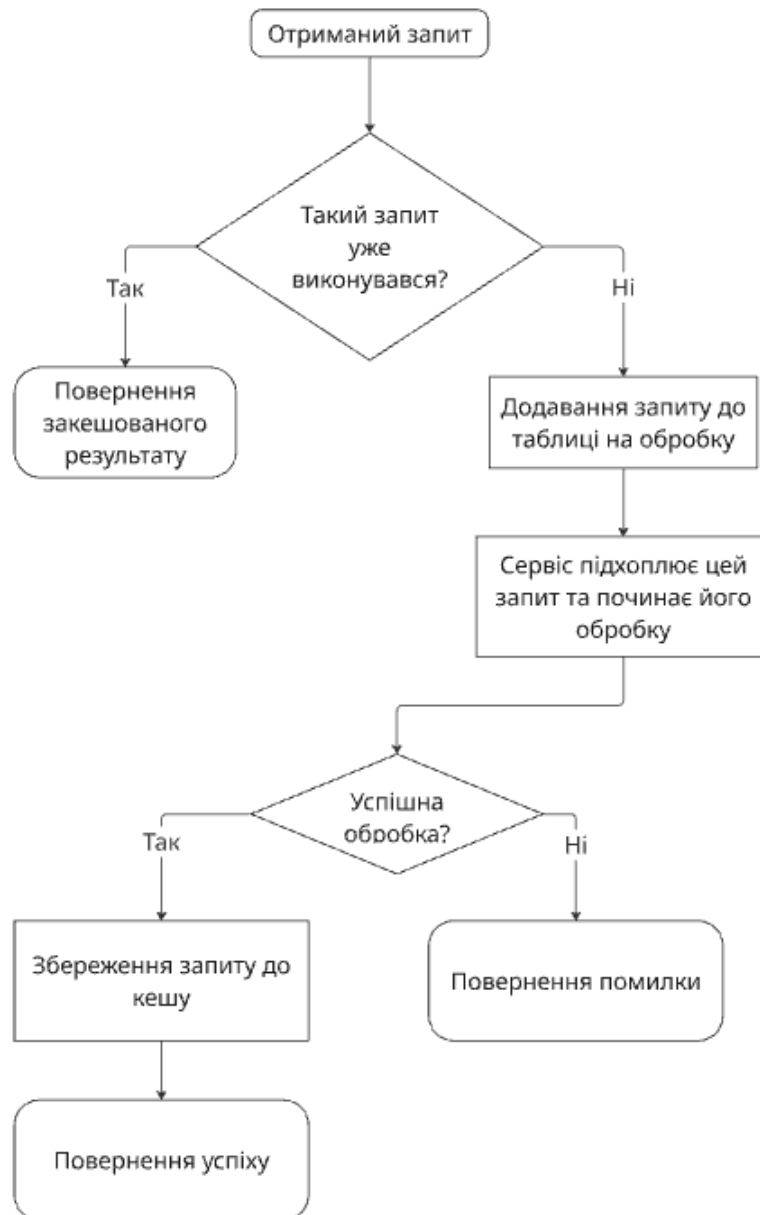


Рисунок 16. Граф-схема досягнення ідемпотентності запитів [авторська розробка]

У разі виникнення збоїв передбачено кілька сценаріїв відновлення. Якщо втрачається з'єднання між ліцензійним шлюзом і апаратним ключем, активна сесія переходить у режим очікування з періодичними спробами

перепідключення. Якщо впродовж певного тайм-ауту зв'язок не відновлюється, система ініціює процедуру failover: призначається новий лідер, а попередній вузол від'єднується від ключа через механізм fencing, що унеможлиблює одночасний доступ із двох джерел. Новий лідер відновлює роботу сервісу без втрати даних, виконуючи повторну автентифікацію та синхронізацію стану з попередніми сесіями.

Додатково метод реалізує автоматичне балансування навантаження на рівні клієнтів (рис. 17).

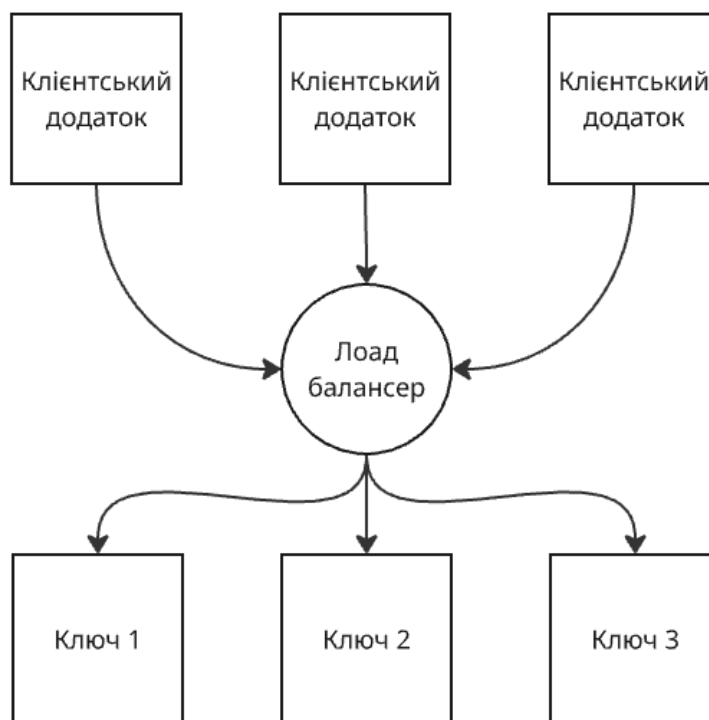


Рисунок 17. Схема балансування навантаження на рівні клієнтів [авторська розробка]

Якщо система має кілька незалежних ключів або мережевих шлюзів, запити рівномірно розподіляються між ними з урахуванням поточної кількості активних сесій і часу відгуку. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів і уникнути перевантаження одного вузла.

Важливою складовою методу є захист від несанкціонованого доступу. Кожна транзакція супроводжується обов'язковою автентифікацією клієнта через

протокол mTLS, а обмін даними з ключем виконується за зашифрованим каналом. Усі дії користувачів і системних процесів журналюються, що забезпечує повний аудит використання ліцензій і допомагає виявляти аномальну активність.

Таким чином, запропонований метод забезпечує:

- контрольований одночасний доступ до апаратного ключа без порушення цілісності даних;
- автоматичне відновлення після збоїв або втрати вузла-лідера;
- динамічне балансування навантаження в розподіленому середовищі;
- криптографічно захищену комунікацію;
- ідемпотентність операцій та аудит усіх транзакцій.

Поєднання цих характеристик дозволяє ефективно інтегрувати апаратний ключ у кластерну контейнеризовану архітектуру, забезпечуючи безперервність роботи системи ліцензування та підвищуючи її надійність і масштабованість.

Розглянутий метод дозволяє значно підвищити рівень відмовостійкості, мінімізувати час простою та забезпечити стабільну роботу ліцензійних серверів навіть у випадку часткових збоїв інфраструктури.

Крім того, створена модель є універсальною та може бути адаптована для різних типів апаратних ключів і корпоративних середовищ, що робить її практично цінною для впровадження в сучасних системах ліцензування.

SECTION 6. CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.6.1

6.1 Modernization of an existing industrial building

Historical urban development models in Ukraine were largely shaped by the industrialization processes of the twentieth century, which presupposed the territorial relocation of large-scale production clusters to the periphery of settlements. This spatial principle was not accidental: it made it possible not only to minimize the environmental impact on residential quarters and reduce the risks associated with technogenic pressures, but also to optimize logistical connections related to transportation, raw material deliveries, and shipment of finished products. At the same time, peripheral placement created conditions for the unobstructed expansion of industrial capacities in the event of economic growth. As a result, entire industrial zones were formed with autonomous transport infrastructure, independent engineering systems, organized production areas, and a clearly defined functional structure that existed in relative isolation from the residential part of the city. However, dynamic socio-economic transformations, the economic restructuring that followed independence, and later deindustrialization processes contributed to the gradual downsizing or complete shutdown of many industrial enterprises. This led to the emergence of a significant number of inactive industrial territories that ceased to perform their strategic role in the local economy.

Over recent decades, Ukrainian cities have experienced intensive growth, incorporating formerly peripheral districts that are now situated within active urbanization zones and have become fully integrated elements of the urban fabric. Industrial sites once designed at a substantial distance from residential development gradually merged with the expanding urban structure as city boundaries naturally widened. A large portion of these areas lost their primary function and transformed into neglected zones characterized by disrupted spatial organization, fragmented building patterns, and significant physical and moral deterioration of structures. They often

contain derelict industrial buildings, irregular infrastructure remnants, and vast vacant plots.

At the same time, contemporary urban planning trends indicate that these very territories hold substantial potential for urban development. Abandoned industrial sites are increasingly viewed as unique resources for establishing new functions—residential, commercial, cultural, educational, recreational, or mixed-use. Their revitalization has become one of the most effective tools for restructuring the urban environment, enabling the creation of strategically important urban clusters: innovation parks, research and educational centers, creative districts, cultural complexes, and multifunctional spaces capable of supporting a wide range of urban processes. Such transformations foster social integration, economic growth, the development of small and medium-sized enterprises, and the formation of a new urban identity for local communities. In this context, the redevelopment of industrial areas is perceived not merely as a simple change of functional designation but as a systemic rethinking of the architectural and planning structure of the territory, including the creation of new pedestrian routes, public open spaces, landscaped areas, and human-centered environments.

A particularly important component of modern revitalization approaches is the rational use of existing resources. A significant part of the engineering and utility networks built in industrial zones was designed with substantial reserve capacity to meet the demands of large-scale production. This includes water supply systems, sewer networks, electrical grids, heat distribution lines, gas pipelines, freight transport nodes, industrial access roads, and rail branches. After the closure of industrial operations, this powerful engineering framework becomes effectively liberated, creating unique preconditions for placing new facilities without the need for large-scale upgrades or excessive infrastructural burdens. In many cases, these networks remain technically suitable for modernization, which significantly simplifies the integration of new functions into the urban fabric and minimizes additional transportation and engineering loads.

Territories of idle factories and plants open up broad prospects for their transformation into multifunctional, integrated complexes (so-called brownfields). Instead of monotonous production zones, dynamic centers with various functions may appear:

- social infrastructure: children's and youth creative centers, educational hubs;
- culture and art: modern exhibition galleries, art spaces, theater studios, industrial heritage museums;
- business and innovation: office centers, coworking spaces;
- housing: loft apartments and other comfortable housing, harmoniously integrated into the historical context;
- sports and recreation: sports complexes, skate parks and extreme sports grounds, recreation areas.

The implementation of such scenarios of adaptive reuse and comprehensive renovation not only improves the quality of life of citizens, but also stimulates domestic tourism (due to unique architecture and cultural content) and, importantly, attracts private investors, contributing to the overall economic growth of the region.

The main architectural and urban planning aspects and challenges in the revitalization of industrial areas are a complex task and include:

- preservation of Historical Identity. A key aspect is to preserve the authentic character of industrial architecture. Old workshops, factory pipes, railway tracks - all this is part of the cultural heritage of the city. It is necessary to develop methods that allow integrating these industrial artifacts into a new functional scheme, emphasizing the contrast between the austere past and modern content. This can be achieved through the preservation of load-bearing structures, facades and the use of industrial elements in interior design and landscaping;
- ecological sanitation. One of the greatest technical challenges is the decontamination and ecological remediation of soils and groundwater that may be contaminated with heavy metals, petroleum products, or chemicals resulting from years of industrial activity. This requires complex engineering solutions and significant

financial investments, but is a prerequisite for creating a safe residential or recreational environment;

- creation of a new spatial planning structure. It is necessary to rethink the existing planning structure of the industrial zone. Usually it is focused on technological processes, rather than on a human-centric organization of space. The task is to create an accessible, pedestrian, inclusive environment with a clear system of public spaces, green areas and effective transport logistics that integrates this area into the overall urban fabric. This includes the development of new highways, cycle paths and connections to public transport.

Revitalization of industrial areas is not just the reconstruction of buildings, but a complex urban development process that requires a multidisciplinary approach and is a key element in the formation of a healthy, sustainable and competitive modern city.

The article describes an example of changing the functional purpose of a production building through reconstruction.

It was necessary to develop structural solutions to change the existing high-rise single-story manufacturing space into a three-story office building with a roof terrace.

To achieve this goal, a detailed survey of the existing building was conducted.

The surveyed part of the building is for industrial purposes, with dimensions in plan of 17.5x18 m in axes 1-2, A-B.

The height to the bottom of the covering slabs is 7.8 ... 9.62 m. The height to the bottom of the covering trusses is 6.99 m. The height to the bottom of the floor in axes 2-4, A is 3.0 m.

Along axis 4, the building is adjacent to a frame administrative building, along axes 1 and B, there is a production part, which is structurally similar to the part of the building under investigation. The plan of the first floor of the part of the building being reconstructed is shown in Figure 1, and a section of the building is shown in Figure 2, and a photo of the existing facade of the building is shown in Figure 3 (all the drawings mentioned are the author's own designs and photos).

The rigidity of the building in both directions is provided by reinforced concrete columns clamped into the foundations, reinforced concrete roof trusses, wall panels, brick enclosing walls, and a horizontal disk of roof slabs.

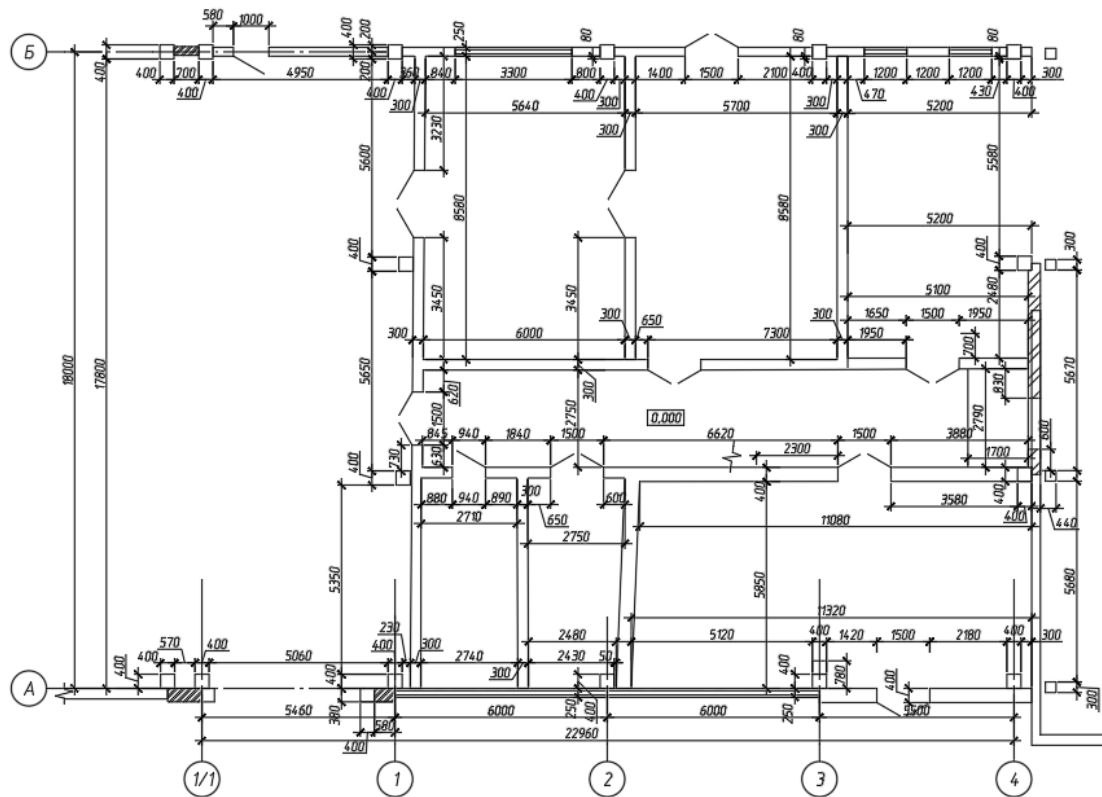


Figure 1. First floor plan [made by the authors]

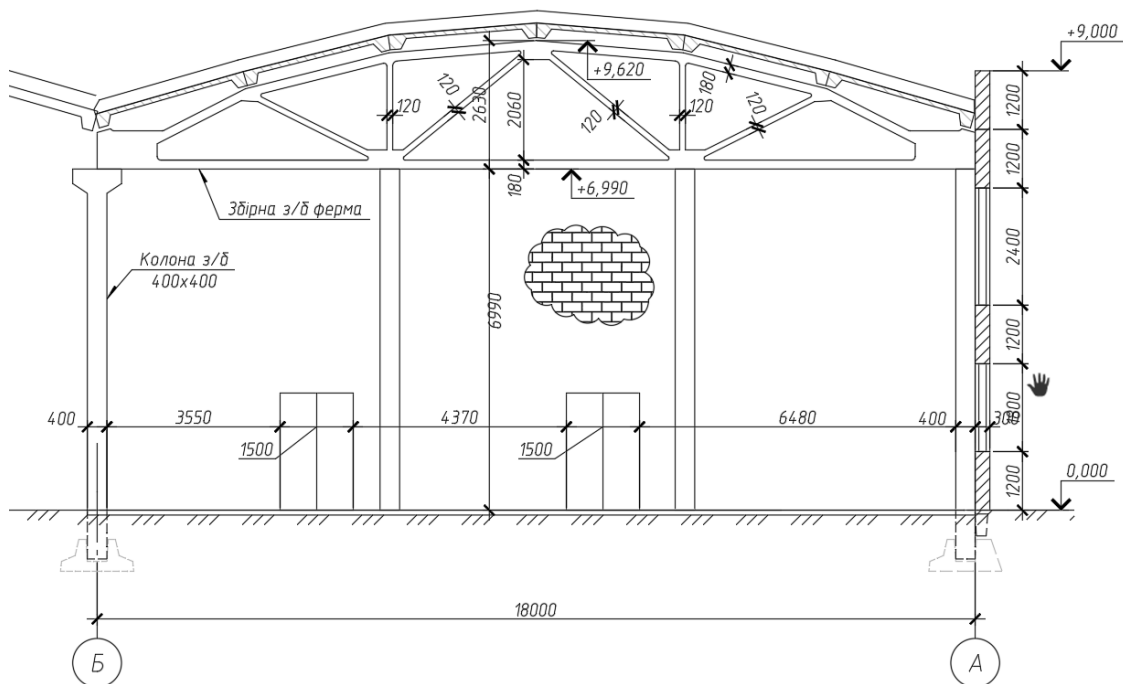


Figure 2. Section through the building [made by the authors]



Figure 3. Existing building facade before reconstruction [made by the authors]

During the inspection of the facility, photo-fixation of defects in structural elements was performed, as well as means for checking the geometric dimensions and condition of the building elements.

As a result of the inspection of the structure, the following was established:

- foundations for the frame columns - columnar reinforced concrete of the careful type;
- foundations for brick walls - prefabricated reinforced concrete foundation beams on columnar foundations;
- columns - prefabricated reinforced concrete;
- roof trusses - prefabricated reinforced concrete, length 18 m, height in the center 2.63 m;
- roof slabs - prefabricated reinforced concrete ribbed 3x6.0 m and 1.5x6.0 m ($h = 300 \text{ mm}$);

- external walls - prefabricated expanded clay concrete wall panels, made of ceramic bricks;

- internal walls - ceramic bricks;

- partitions - ceramic bricks;

- lintels - metal;

In general, the following were recorded in the internal and external volume of the building:

- damage to the protective layer of concrete of reinforced concrete columns with exposed reinforcement, corrosion of reinforcement;

- corrosion of embedded parts of columns;

- traces of sealing of covering slabs in places of passage of deflectors, fungal damage, unsealed seams between covering slabs

- fungal damage to walls;

- vertical cracks in brick walls;

- corrosion of embedded parts of wall panels;

- unsealed seams between wall panels;

- exposure of brickwork

- traces of sealing of covering slabs in places of passage of deflectors, fungal damage;

- traces of sealing of wall panels;

- cut out part of reinforcement of wall panel;

- vertical cracks in wall panels;

- knocked out through hole in monolithic beam with exposed reinforcement;

- crack in monolithic ceiling;

- exposed brickwork;

- corrosion of metal lintels;

- damage to the blind area.

According to the results of the survey, the following conclusions were made:

1. The structure under investigation is in satisfactory (2) condition.

2. To enable the reconstruction of the building, it is necessary to:

- implement a project to strengthen existing structures;
- strengthen or dismantle the wall that is in a state of emergency;
- clean the column reinforcement from corrosion, restore the protective layer of concrete;
- cover the embedded parts of columns and wall panels, metal lintels with anti-corrosion and clean them with metal brushes from corrosion products, paint;
- fill, clean and restore the destroyed seams between the wall panels;
- seal the seams between the ribbed panels of the coating;
- carry out finishing works;
- restore the blind area.

3. According to the results of engineering geological research and preliminary calculations, it is possible to reconstruct part of the production premises in axes A-B and 1-4 for administrative and domestic premises on two full floors with an attic floor in the space between reinforced concrete trusses.

To do this, it is necessary:

- to create an internal grid of columns (as an option 6x6 m);
- the foundations for the new columns should be made of small-diameter bored piles with an expanded lower end of the pile and support in the IGE 3 or IGE4 soil, according to geological surveys (see Appendix D);
- it is possible to use glass-type foundations for the new columns with their support in the IGE3 soil and the implementation of measures to ensure the integrity of the thixotropic soil structure during the work;
- it is recommended to use monolithic reinforced concrete floors as two new floors;
- the need to strengthen the foundations of the existing frame columns should be established by the working design, taking into account the possibility of dismantling heavy partition walls and replacing them with lighter ones.

A photo of the existing interior of the building is shown in Figure 4 (this is the author's photo of the authors of the article).



Figure 4. Photo of the existing interior of the building [made by the authors]

The reconstruction project involves a deep rethinking of part of the existing industrial building, originally formed as a single-storey volume with a significant floor height, which was characteristic of the production processes of past decades.

The spatial structure of this type of facility - with large spans, high light levels and simplified internal organization - creates a natural potential for further transformations, especially in cases where the functional purpose of the building changes.

The preliminary technical survey confirmed that the load-bearing structures have retained the necessary level of reliability, which allows for reconstruction measures and the integration of new elements without the risk of violating the overall structural stability of the facility. One of the key architectural and structural solutions was the justification of the possibility of transforming a large single-level production hall into a three-storey structure with new horizontal levels.

The high elevation of the existing roof and the absence of internal capital partitions provided sufficient spatial resources to form several independent floors with their own planning configurations. The modified designed plan is shown in Figure 5 (the drawing is the author's own work.).

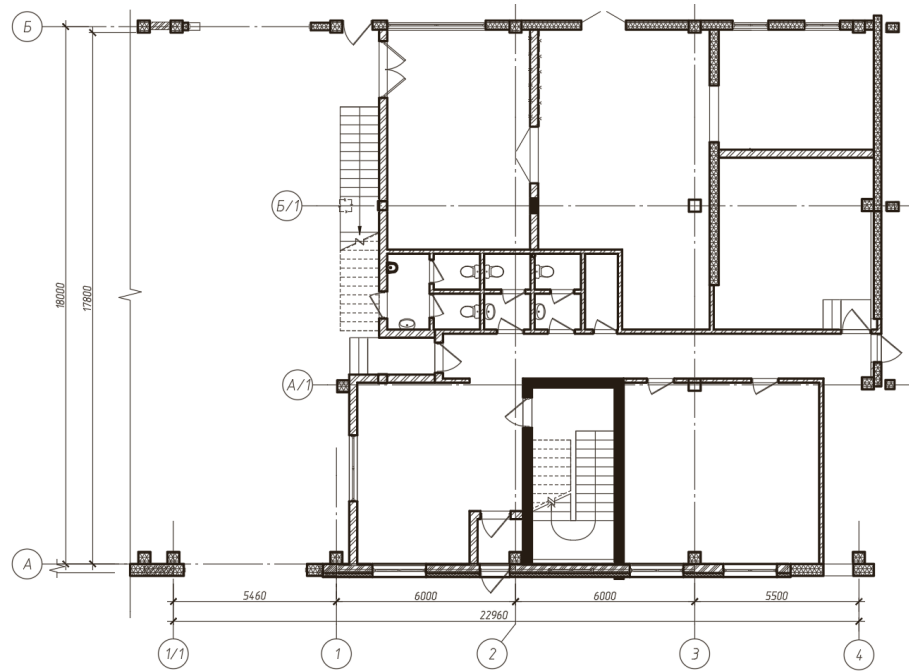


Figure 5. New building plan [made by the authors]

The project involves the installation of new interfloor ceilings, the geometry and location of which take into account the optimal distribution of loads on the existing frame and ensure stable operation of the structural scheme after its modernization. The integration of new structural elements is carried out in such a way as to preserve the maximum possible volume of the existing building, avoid its excessive dismantling and ensure the economic feasibility of the reconstruction.

The designed section of the building is shown in Figure 6 (the drawing is the author's own work.).

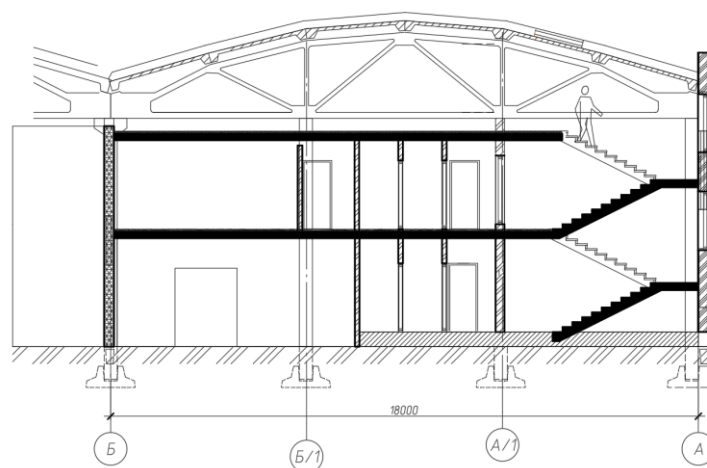


Figure 6. Projected section of the building [made by the authors]

The formation of the internal space of the future three-level structure is based on the principles of rational use of space, the creation of a logical spatial hierarchy and ensuring the architectural integrity of the object. The design proposal provides for clear functional zoning: the organization of the main premises on the middle and upper levels, and auxiliary or communicative zones on the lower, which allows for the effective use of every square meter of space. Particular attention is paid to the formation of the corridor system, the proportions of the premises, the interconnection of open and isolated areas, as well as ensuring the natural logic of movement between different parts of the building. The significant height parameters of the existing space allow for the implementation of various architectural scenarios: from the formation of full-fledged separate floors to the creation of partially open spatial compositions, inter-level visual connections and double light spaces in selected areas.

The reconstruction also involves adjusting the volumetric and spatial composition of the building. Given that the initial volume of the industrial building was focused on supporting technological processes, its plasticity was minimalist and utilitarian.

Figure 7 (this is the author's photo of the authors of the article) shows the result of dividing the internal space of the building into three levels after performing monolithic works on the arrangement of new columns and floors.floors.floors.



Figure 7. Implementation of division into three parts of the internal space [made by the authors]

The new function, which involves administrative and domestic use, requires a different character of the architectural environment - with increased attention to the proportions of the facades, western groups, natural lighting and harmonization of the exterior of the building with the surroundings. The project involves rethinking the facade structure by arranging the openings, restoring or replacing window systems, as well as adjusting the plasticity of the external walls to form a more expressive and modern architectural image..

Figure 8 (this is the author's photo of the authors of the article) shows the modified facade of the building (at the time of taking the photo, the facade decoration had not yet been completed).



Figure 8. Changed building façade [made by the authors]

In the structural aspect, an important part of the work is the analysis of the interaction of new and old elements. Since the original building was created for production needs, its structures had a significant margin of safety, which today allows the integration of additional floors and local reinforcements without increased risks. The project provides for minimal intervention in vertical load-bearing elements, with an emphasis on local reinforcement in places of concentration of vertical and horizontal loads. This approach allows preserving the structural authenticity of the building, while ensuring its compliance with modern requirements for reliability and durability.

Also, Figure 8 shows that during the works, access to the roof of the building was organized, where a large terrace with the possibility of arranging a recreation area was designed. A photo of the roof at the location of the terrace is shown in Figure 9 (this is the author's photo of the authors of the article).



Figure 9. Roof at the terrace location [made by the authors]

Reconstruction of part of an industrial building for a new administrative and residential function is a complex architectural and structural process that includes the adaptation of a single-level large-space volume to the format of a full-fledged three-

level structure. Thanks to the high initial structural quality of the building and competent design solutions, it was possible to form a modern, functionally rich and spatially balanced architectural object that meets the current requirements of adaptability and effective use of existing construction resources.

The analysis justifies the possibility of changing the functional purpose of the production workshop to a full-fledged office complex using the spatial reserves of the building, improved structural schemes and preserving part of its architectural heritage. The implementation of such reconstruction approaches contributes to:

- optimizing the use of urban areas;
- saving resources and infrastructure costs;
- forming new centers of business activity;
- increasing the architectural and spatial attractiveness of the city;
- preserving the historically formed industrial environment..

The given example of reconstruction confirms that the reconstruction of existing industrial enterprises is a strategically important process for the development of cities, and professionally executed constructive and architectural solutions allow the creation of high-quality, functionally flexible and architecturally expressive objects based on existing industrial development.

SECTION 7. CYBERSECURITY AND INFORMATION PROTECTION

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.7.1

7.1 Когнітивне моделювання сценаріїв для прогнозування кіберризиків

Сучасний ландшафт кібербезпеки характеризується зростанням інтенсивності та глобальним розширенням кіберзагроз. Цифрова трансформація, зокрема, розгортання фізичних пристроїв Інтернет речей, хмарні рішення, віддалена робота, значно розширила периметр атаки. Складні фінансовані деякими державами хакер-групи, інноваційне застосування штучного інтелекту для прискорення злочинної діяльності та часті важковиявлені експлойти «нульового дня» ускладнюють протистояння, підривають ефективність традиційних механізмів захисту інформаційної системи. При цьому, слід зауважити, крім технологічних проблем у сфері кібербезпеки, залишається найбільш експлуатованим вектором компрометації людський фактор (соціальна інженерія, недостатня кібергігієна, інсайдерська діяльність). Середні світові витрати на витік даних перевищили 4,88 мільйонів доларів США у 2024 році, цей показник збільшиться до 23 трильйонів доларів США у 2027 році [143]. Крім фінансових збитків, компанії несуть репутаційні, втрачаючи довіру клієнтів. Для подолання цих викликів усім установам та урядам критично важливо перейти від простого реагування на інциденти до проактивної стратегії з метою прогнозування та завчасної побудови захисту для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності інформації.

За результатами Міжнародного аналітичного дослідження довіри до цифрових технологій 2025 [144] для бізнесу кібербезпека є пріоритетним завданням, однак лише 2% організацій впровадили заходи забезпечення кіберстійкості на усіх рівнях. Існують проблеми з кількісною оцінкою кіберризиків: надійність і достовірність результатів такої оцінки непокоїть 47% опитаних респондентів, а невизначеність оцінки – 39% [144].

Вище перераховані методологічні та емпіричні обмеження, недостатня гнучкість традиційних підходів вимагає удосконалення системи управління кіберризиками на основі впровадження математичних методів для якісного та кількісного підходу в оцінці цих ризиків з метою виявлення можливих інцидентів до їх прояву.

7.1.1 Понятійний апарат дослідження

7.1.1.1 Кіберризик

Аналіз наукових джерел дозволив визначити, що системний розгляд даної дефініції є актуальним та важливим в контексті управління ризиками та забезпечення кібербезпеки на всіх рівнях [145-151].

Вважають, що кіберризик – ризик, який виникає внаслідок використання інформаційно-комунікаційних технологій та загрожує конфіденційності, доступності та цілісності даних чи послуг [145].

У дослідженні [146] автором було проаналізовано 200 статей (з 2000 до 2028 року) з метою сформуванню онтологічну метамодель концепції кіберризиків. Як з'ясувалося лише 20 з них мають оригінальне визначення даного поняття, інші – опосередковано застосовують. На думку науковця, дане поняття включає знання двох областей: реальна сфера, яка містить організацію та її активи, та абстрактна сфера, яка охоплює такі поняття, як ризик, уразливість, ймовірність, загроза. Запропоноване дослідником визначення кіберризиків висвітлює найважливіші його особливості:

- кіберризик знаходиться в області операційних ризиків;
- об'єкти, які зазначають втрат, спричинених кіберризиками, – це інформаційні активи, ресурси ІКТ, технологічні активи;
- кіберризик може виникати як в окремому комп'ютерному пристрої, так і у взаємопов'язаних ІТ-системах;
- потенційний вплив кіберризиків є триєдиним і охоплює: пошкодження активів (включаючи зобов'язання перед третіми особами та втрату прибутку), порушення операційної діяльності, шкода репутації.

Пізніше, застосовуючи дану методологію, науковці [147] підтвердили, що запропоноване автором визначення кіберризиків залишається актуальним. При цьому автори проаналізували 474 праці з 2019 до 2021 року.

Слід відзначити дослідження [148], результати якого були визначені на основі 13805 публікацій, у яких одним з ключових слів є кіберризик, з 2004 до 2024 року. Їх визначення кіберризиків відповідає попереднім твердженням: кіберризик поєднує ймовірність несприятливих подій та їхні наслідки з урахуванням організаційних цілей і невизначеностей, у кіберпросторі виникає внаслідок навмисних чи ненавмисних кіберзагроз, виходячи за рамки технічних недоліків і охоплюючи ширші суспільні, економічні та психологічні виміри.

Автори дослідження [149] пропонують поняття «ризик інформаційної безпеки» – це числова (словесна) функція, яка описує ймовірність втілення загроз інформаційної безпеки (ІБ) та величини збитку від їх реалізації внаслідок використання цими загрозами уразливостей активів з метою нанесення шкоди організації. Поняття «ризик ІБ» є комбінованим, який поєднує в собі інші ключові поняття: активи, уразливості, загрози, збиток.

Ми згодні з автором [150], що кіберризик слід розглядати як правову категорію. Проте в законодавстві України відсутнє визначення даного поняття. Зустрічається лише в Постановах Національного банку України. Так, в інструкції від 05.04.2024 №38 стверджується, що «кіберризик – це ризик реалізації кіберзагроз щодо інформаційних ресурсів та/або інформаційної інфраструктури, а також наслідків таких подій» [151].

Вважаємо наступне визначення, представлене у дослідженні [150], вичерпно характеризує всі особливості поняття «кіберризик» та охоплює усі дотичні сфери, надаючи комплексне та цілісне розуміння цього явища. «Кіберризик – існуюча ймовірність настання негативних наслідків для суб'єктів кібербезпеки, національної безпеки, суспільства та держави, що виникає внаслідок наявності потенційних кіберзагроз та/або уразливостей в інформаційних, комунікаційних та інформаційно-комунікаційних системах, а також недоліків у їх захисті, що можуть призвести до порушення

конфіденційності, цілісності, доступності інформаційних ресурсів, порушення сталого та надійного функціонування зазначених систем, завдання шкоди законним інтересам фізичних та юридичних осіб, майну, критичній інфраструктурі» [150].

Таким чином, кіберризик може мати природне походження або, частіше, техногенне, яке включає людський фактор, кіберзлочинність, кібервійну та кібертероризм. Його унікальність як ризикової категорії полягає у високому ступені взаємозалежності систем; існуванні потенційних подій з екстремальними наслідками; методологічними невизначеностями, пов'язаними з доступністю та якістю даних, які необхідні для моделювання; адекватністю самих підходів до моделювання; постійною динамікою технологічного ландшафту [145].

7.1.1.2 Сценарний підхід в кібербезпеці

Проактивна стратегія організацій у сфері кіберзахисту передбачає перехід від реагування на інциденти до їх прогнозування. Сценарний підхід є тією методологією, яка базується на розробці та аналізі ймовірних, але відмінних один від одного, деталізованих варіантів розвитку подій (сценаріїв) у майбутньому. Він допомагає візуалізувати загрози; ідентифікувати уразливості; розробити ефективні заходи захисту; провести навчання персоналу; оцінити готовність до інцидентів; прогнозувати наслідки [152].

Кіберсценарій – це структурований наратив, який досліджує потенційне майбутнє, поєднуючи різні фактори кіберризиків, такі як уразливості, суб'єкти та об'єкти загроз та вплив на бізнес. Сценарії не є прогнозами, це правдоподібні наративи про можливі події, які використовуються організаціями для концептуалізації загроз, підготовки до різноманітних результатів та пошуку відповідей на питання: «Що, якщо?» [153].

У дослідженні [154] автори запропонували автоматизовану структуру для симуляцій кіберінцидентів та детального профілювання атак, розширюючи прогнозування через інтеграцію структурованих/неструктурованих журналів, і пропонуючи нову методологію інтеграції застарілих систем із сучасними

платформами розвідки загроз для оптимізації проактивного управління безпекою.

Практичні навчання вимагають чітких сценаріїв атак та відповідних стратегій захисту. Так вважають дослідники [155] і пропонують свої розробки в середовищі системи промислового управління.

Науковці у роботі [156] пропонують структуровану операційну основу для навчання кібербезпеці космічних систем, створюючи реалістичні, технічно відтворювані сценарії атак (включаючи компрометацію наземного сегмента, DDoS-атаки та захоплення прошивки), що дозволяє оцінювати стратегії виявлення і реагування з урахуванням обмежень супутникового зв'язку.

Аналіз сценаріїв може допомогти установам зрозуміти потенційні ризики, як вони можуть передаватися, куди потрібно робити інвестиції та як найкраще реагувати на порушення системи [157]. Відправною точкою для створення сценаріїв є ретельна оцінка ризиків за допомогою експертної оцінки. Зазвичай будується декілька сценаріїв:

- оптимістичний – найкращий можливий сценарій;
- песимістичний – найгірший можливий сценарій;
- найбільш ймовірний (реалістичний) – сценарій, який має найбільші шанси на реалізацію.

Приклади застосування сценарного підходу можна побачити в роботах [152, 157].

Кіберризик можна визначити як функцію: $R = \{s_i, p_i, x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, де R – ризики; s_i – опис небажаного сценарію; p_i – ймовірність цього сценарію; x_i – міра наслідків або збитків, спричинених сценарієм, що стався; та n – кількість можливих сценаріїв, які можуть завдати шкоди системі [158].

Існує декілька типів сценарного підходу в кібербезпеці. Вони поділяються залежно від мети, об'єкта тестування, глибини симуляції (таблиця 1).

Таблиця 1. Типи сценарного підходу в кібербезпеці

Тип сценарію		Опис сценарію	Фокус
1. Тестування на проникнення (Penetration Testing)	Black-Box (Чорний ящик)	Attacker не має жодної попередньої інформації про систему. Сценарій імітує зовнішнього зловмисника.	Виявлення зовнішніх уразливостей, налаштувань мережі та вебзастосовувань.
	White-Box (Білий ящик)	Attacker має повний доступ до вихідного коду, архітектури та конфігурацій. Сценарій імітує інсайдера або розробника.	Глибокий аудит коду та конфігурацій, пошук логічних помилок.
	Grey-Box (Сірий ящик)	Attacker має обмежену інформацію (наприклад, облікові дані користувача). Сценарій імітує внутрішнього користувача з низькими привілеями, що намагається підвищити їх.	Перевірка контролю доступу та сегментації мережі.
2. Командні навчання	Red Team (Червона команда)	Імітує дії реального зловмисника, використовуючи найновіші тактики, техніки та процедури (TTP).	Досягнення конкретної бізнес-цілі (наприклад, крадіжка даних клієнтів)
	Blue Team (Синя команда)	Команда внутрішньої безпеки, яка повинна виявити, стримати та відновити систему після атаки Red Team.	Перевірка часу реагування та ефективність процесів.
	Purple Team (Фіолетова команда)	Об'єднує Red та Blue команди для постійного зворотного зв'язку	Навчальний— атака виконується, і Blue Team спостерігає, як спрацьовують їхні засоби захисту.

Продовження таблиці 1.

3. Соціальна інженерія	Фішинг (Phishing) / Спірфішинг (Spear Phishing)	Сценарій імітує розсилку електронних листів для виманювання облікових даних або встановлення шкідливого програмного забезпечення.	Перевірка людського фактору, який є найслабшою ланкою в ланцюгу безпеки.
	Вішинг (Vishing)	Сценарій імітує телефонні дзвінки, спрямовані на обман співробітників з метою отримання конфіденційної інформації.	
	Фізичне проникнення	Сценарій імітує спробу несанкціонованого фізичного доступу до офісу, серверної кімнати або закритої зони.	
4. Моделювання загроз (Threat Modeling)	DREAD або STRIDE (Фреймворки, що використовуються для структурування сценаріїв загроз для програмного забезпечення.)	Сценарій може бути: «Якщо користувач зможе підробити (Spoofing) свою ідентифікацію, які дані будуть скомпрометовані?»	Систематична ідентифікація ризиків на основі дизайну системи
5. Реагування на інциденти та відновлення (BDR/IR)	Витік даних (Data Breach Scenario)	Перевірка повного процесу — від виявлення до повідомлення регуляторів і громадськості.	Перевірка, що відбувається після успішної атаки або катастрофи.
	Викуп (Ransomware Scenario)	Перевірка процедури відновлення бізнесу з резервних копій, комунікації з кризовим менеджментом та ізоляції скомпрометованих систем.	

Незважаючи на свою поширеність, сценарний підхід у кібербезпеці має обмеження, включаючи суб'єктивність та складність прогнозування через залежність від експертної думки, а також значні матеріальні та трудові витрати, що вимагає його комбінування з іншими методами для мінімізації недоліків.

7.1.1.3 Когнітивне моделювання в кібербезпеці

Сценарії в кібербезпеці можна розробляти за допомогою когнітивного моделювання. «Когнітивне моделювання — це моделювання процесів людського мислення в обчислювальній моделі, яка є поєднанням різних дисциплін. Воно є важливим, оскільки дає знання про процеси мозку, такі як сприйняття, пам'ять та прийняття рішень; отже, його використовують для оцінки та розуміння поведінки людей у різних ситуаціях» [159]. У науковій роботі [160] був здійснений аналіз типів когнітивного моделювання та можливості його застосування в кібербезпеці.

1. Символічне моделювання (на основі правил) створює моделі, що імітують людське мислення та когнітивні функції, використовуючи чітко визначені правила та символи («Що, якщо»).

2. Моделювання на основі мереж (нейронні мережі) застосовує штучні нейронні мережі — об'єднані вузли (нейрони), які можуть навчатися та адаптуватися до нової інформації. Цей метод дозволяє моделювати процеси навчання та розпізнавання образів.

3. Баєсові моделі (ймовірнісне моделювання) використовує теорію ймовірностей для моделювання процесів прийняття рішень та прогнозування на основі апріорних знань.

4. Моделювання на основі агентів (симуляційне) створює віртуальне середовище, в якому автономні гравці (агенти) взаємодіють між собою та з оточенням, що дозволяє симулювати різні поведінкові дії та їхній колективний вплив.

Існують і гібридні моделі, які об'єднують вище перераховані. До таких моделей відносять нечіткі когнітивні карти (НKK). НKK — математична модель,

представлена у вигляді зваженого орієнтованого графа. Вузли графа – концепти (ключові фактори), зважені дуги – зв'язки між концептами з напрямом впливу та вагою в межах від -1 до $+1$.

Нагадаємо побудову нечіткої когнітивної карти [152].

Крок 1. Ідентифікація складної ситуації, проблеми.

- 1.1 Формулювання завдання і цілей дослідження;
- 1.2 Збір аналітичних даних з проблеми;
- 1.3 Окреслення основних ознак проблемної ситуації;
- 1.4 Виділення факторів впливу, основних об'єктивних законів суспільства;
- 1.5 Визначення можливих вимог, умов, обмежень у даній ситуації;
- 1.6 Виділення основних суб'єктів, пов'язаних з ситуацією, та чинників, на які можуть впливати дані суб'єкти.

Крок 2. Побудова когнітивної карти.

- 1.1 Робота експертів по виділенню факторів, що характеризують проблемну ситуацію;
- 1.2 Групування факторів на блоках та представлення показників для аналізу процесу у даній ситуації;
- 1.3 Визначення зав'язків між факторами: позитивний «+» чи негативний «-», ступінь впливу від -1 до $+1$ або сильно, середньо, слабо;
- 1.4 Побудова орієнтованого зваженого графа.

Крок 3. Моделювання та перевірка адекватності моделі.

- 3.1 Визначення початкових умов у даній ситуації;
- 3.2 Задання цільових напрямів (збільшення, зменшення) і сили напряду;
- 3.3 Вибір заходів для впливу на ситуацію;
- 3.4 Окреслення індикаторів, що характеризують розвиток ситуації;
- 3.5 Порівняння результатів з минулими даними

Крок 4. Динамічний аналіз ситуації: генерація сценаріїв типу «якщо..., то...».

НKK — це гібридна, причинно-наслідкова модель, яка поєднує структурну наочність із гнучкістю нечіткої логіки, що робить її високоефективним

інструментом когнітивного моделювання для кібербезпеки, що доведено у дослідженнях [152, 161-163].

7.1.1.4 Взаємозв'язок понять «кіберризик», «сценарний підхід», «когнітивне моделювання»

Взаємозв'язок між цими поняттями є циклічним та синергетичним, оскільки вони всі слугують одній меті: ефективному управлінню кіберризиками (таблиця 2).

Кіберризик є об'єктом управління, який необхідно оцінити та мінімізувати.

Сценарний підхід є методологічною рамкою для виявлення та деталізації того, як саме цей ризик може бути реалізований.

Когнітивне моделювання є інструментом для аналізу та візуалізації складної структури сценаріїв, допомагаючи зрозуміти, які фактори є найбільш критичними та як вони взаємодіють.

Таблиця 2. Порівняння ролей сценарного підходу та когнітивного моделювання в управлінні кіберризиком

Етап управління ризиком	Роль сценарного підходу	Роль когнітивного моделювання
Ідентифікація ризику	Визначає конкретні шляхи (сценарії) реалізації кіберризiku	Допомагає виявити приховані або неочевидні взаємозв'язки між факторами в межах сценарію
Оцінка ризику	Надає вхідні дані (наслідки сценарію) для кількісної або якісної оцінки кіберризiku.	Використовується для прогнозування динаміки та оцінки ймовірності розвитку подій за певним сценарієм, а також сили впливу факторів на кінцевий результат.
Обробка ризику	Тестує ефективність заходів захисту та планів реагування в умовах імітації (навчання на сценаріях).	Дозволяє експериментувати для даного випадку із різними стратегіями реагування (зміна ваги факторів) для вибору оптимального рішення.

Таким чином, когнітивне моделювання, застосоване до сценарного підходу, дозволяє не просто описати, а зрозуміти та кількісно оцінити складні, багатофакторні кіберризики, підвищуючи обґрунтованість рішень у сфері кібербезпеки.

Використання когнітивних сценаріїв є потужним інструментом для команд SOC (Security Operations Center) та CERT (Computer Emergency Response Team), що дозволяє значно підвищити ефективність реагування на кіберінциденти, особливо ті, що пов'язані з людським фактором. Ця інтеграція реалізується на кількох взаємопов'язаних рівнях.

По-перше, когнітивні моделі застосовуються для пріоритезації інцидентів. Завдяки оцінці впливу різних факторів на успішність атаки, таких як поєднання високої довіри користувача та складності атаки, моделі допомагають виокремити події з найбільшим потенціалом ескалації.

По-друге, впровадження передбачає формування автоматизованих когнітивних профілів користувачів і типових моделей поведінки. На основі когнітивних карт SOC/CERT можуть створювати поведінкові карти ризиків, ідентифікуючи, наприклад, співробітників, більш вразливих до соціальної інженерії. Це дає змогу генерувати сценарії, що показують, як низька обізнаність чи висока довіра можуть вплинути на можливість компрометації, і таким чином формувати персоналізований підхід до управління ризиками.

Третій рівень — це застосування когнітивних сценаріїв для сценарного прогнозування. SOC та CERT використовують результати симуляцій для побудови «Що, якщо» моделей, які тестують стратегії реагування на різні тактики зловмисників. У випадку фішингової кампанії модель допомагає оцінити, як зміна інтенсивності чи складності атак вплине на користувачів, дозволяючи вибудовувати стратегії випереджувального реагування, а не лише постфактумної реакції.

Особливо важливою є підтримка прийняття рішень у реальному часі. На основі когнітивної карти можна налаштувати автоматичні тригери, які попереджатимуть аналітиків SOC про можливу ескалацію інциденту ще до того,

як технічна компрометація стане очевидною. Наприклад, виявлення поведінки, типової для користувача з високою ймовірністю довіри до підозрілих листів, може автоматично підвищити критичність інциденту. Такі ранні індикатори значно прискорюють реакцію та мінімізують наслідки.

Крім того, когнітивні сценарії інтегруються в навчальні програми та тренінги для SOC/CERT. Результати моделювання дають змогу адаптувати навчання під реалістичні сценарії, що враховують не лише технічні прояви, але й реальну поведінку людей та типові тактики зловмисників. Це робить тренувальні симуляції значно ефективнішими, цілеспрямовано працюючи з людським фактором.

У результаті, таке комплексне впровадження створює багаторівневу систему оцінки ризиків, де технічні індикатори доповнюються когнітивними сигналами. Реакція системи ґрунтується на поведінкових паттернах, підтверджених моделюванням. Це дає SOC та CERT можливість оперативніше виявляти загрози, точніше прогнозувати розвиток інцидентів та ефективніше управляти ризиками, пов'язаними як з фішинговими, так і з іншими соціально-інженерними загрозами.

7.1.2 Практична реалізація формування сценаріїв кіберінцидентів на основі когнітивних моделей

Практична реалізація формування сценаріїв кіберінцидентів на основі когнітивних моделей у цій роботі була здійснена з застосуванням нечітких когнітивних карт (НKK) для моделювання сценарію використання організаціями слабких паролів.

1. Визначаємо концепти:

- C1. Складність пароля. Рівень довжини, різноманітності символів та його унікальності;
- C2. Повторне використання паролів. Використання одного пароля для багатьох сервісів;

- C3. Обізнаність користувачів щодо безпеки паролів. Знання принципів створення безпечних паролів та наслідків компрометації;
- C4. Використання менеджерів паролів. Впровадження інструментів для генерації й зберігання паролів;
- C5. Ймовірність компрометації облікових даних. Ймовірність зламу пароля, його перебору або витоку;
- C6. Успішність атаки типу Brute Force. Ефективність атаки, спрямованої на підбір або перевірку паролів;
- C7. Рівень доступу зломисника після компрометації. Наскільки критичний доступ може отримати цей зломисник;
- C8. Захист облікових даних. MFA, моніторинг, блокування підбору;
- C9. Ризик масштабного інциденту. Ланцюгова компрометація, доступ до критичних систем;
- C10. Політика паролів в організації. Регламенти, наприклад, мінімальна довжина, заборона повторень, періодична зміна пароля тощо.

2. Визначимо значення ваг для нашої НКК:

- C3→C1, вага +0,7 (сильний позитивний вплив), адже чим вища обізнаність, тим складніші паролі створює користувач;
- C3→C2, вага -0,6 (помірний негативний вплив), адже обізнаний користувач рідше повторює вже створений пароль;
- C4→C1, вага +0,9 (сильний позитивний вплив), адже менеджери паролів генерують складніші паролі;
- C4→C2, вага -0,8 (сильний негативний вплив), адже менеджери паролів усувають проблему повторного використання, бо зберігають унікальні паролі;
- C10→C1, вага +0,8 (сильний позитивний вплив), адже політика паролів компанії на пряму формує вимоги до складності паролів;
- C10→C2, вага -0,7 (сильний негативний вплив), адже політика паролів може забороняти повторне використання паролів;

C1→C5, вага -0,7 (сильний негативний вплив), адже чим складніший пароль, тим менша ймовірність його компрометації;

C1→C6, вага -0,6 (помірний негативний вплив), адже сильні паролі складніше підібрати, що знижує успішність атаки Brute Force;

C5→C7, вага +0,9 (сильний позитивний вплив), адже компрометація часто дає значний рівень доступу;

C7→C9, вага +0,9 (сильний позитивний вплив), адже якщо злоумисник отримав високий доступ, то високий ризик масштабу інциденту;

C8→C5, вага -0,8 (сильний негативний вплив), адже MFA та інші засоби знижують ймовірність успішної компрометації;

C3→C4, вага +0,5 (помірний позитивний вплив), адже обізнані користувачі частіше встановлюють менеджери паролів;

C10→C8, вага +0,5 (помірний позитивний вплив), адже політика безпеки часто включає обов'язкове використання MFA.

3. Будуємо матрицю зв'язків ваг (таблиця 3).

Таблиця 3. Матриця зв'язків ваг

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	0	0	0	0	-0,7	-0,6	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3	0,7	-0,6	0	0,5	0	0	0	0	0	0
C4	0,9	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0
C6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0
C8	0	0	0	0	-0,8	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	0,8	-0,7	0	0	0	0	0	0,5	0	0

Задано попередні дані: $C(0) = [C1 = 0,4; C2 = 0,7; C3 = 0,4; C4 = 0,3; C5 = 0,6; C6 = 0,5; C7 = 0,6; C8 = 0,4; C9 = 0,5; C10 = 0,5]$. У сценаріях нижче будуть змінюватись компоненти, які розглядаються, а інші залишатись базовими.

4. Створюємо за заданими параметрами НКК (рис. 1):

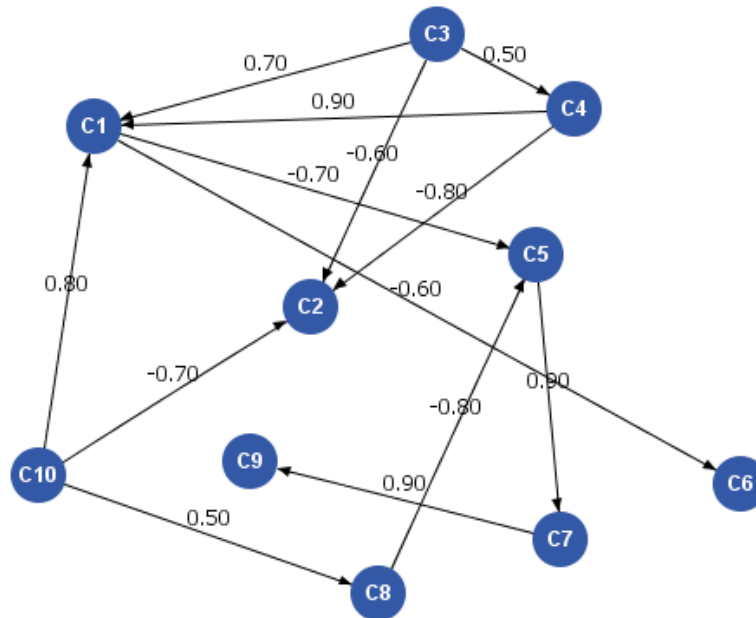


Рисунок 1. Нечітка когнітивна карта (початкова)[авторська розробка]

У роботі представлені розрахунки для ключових концептів, що формують траєкторію « $C3 \rightarrow C1/C2 \rightarrow C5 \rightarrow C6 \rightarrow C7 \rightarrow C9$ ». Ця траєкторія дозволяє відобразити як обізнаність користувачів впливає на складність паролю та його повторне використання, як ці фактори впливають на ймовірність компрометації, і як успішний злам паролю може призвести до критичного доступу та масштабного інциденту.

5. Для моделювання і проведення симуляцій було використано програму FCM Expert. FCM Expert – це спеціалізоване програмне забезпечення призначене для створення та симуляцій нечітких когнітивних карт [164].

Запускаємо симуляцію на початковому етапі, не змінюючи нічого, отримуємо значення (рис. 2 та рис. 3):

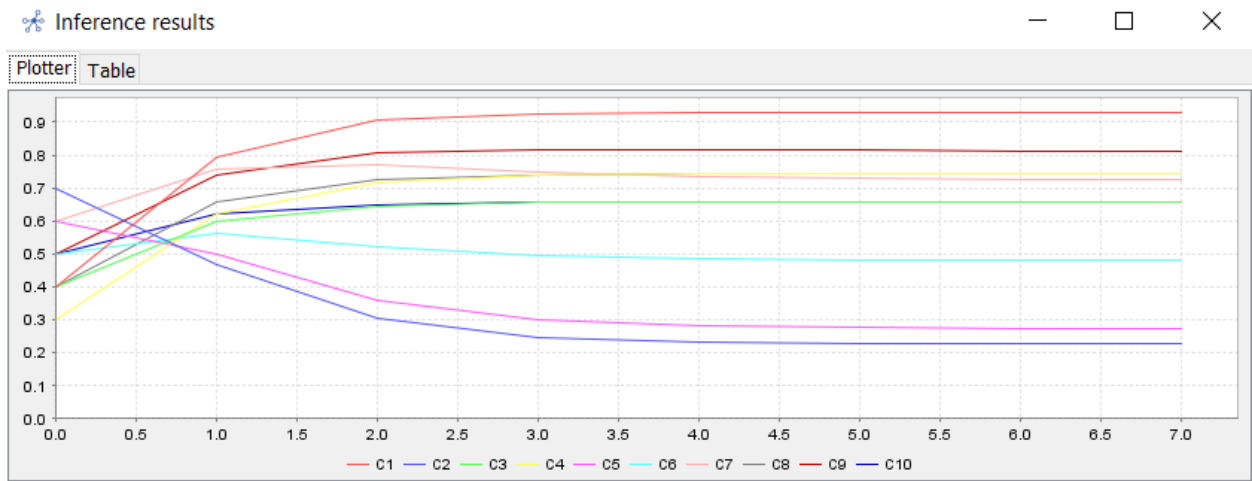


Рисунок 2. Початкова симуляція (графічне представлення)
[авторська розробка]

Inference results

Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0	0.4	0.7	0.4	0.3	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5
1	0.7941	0.4675	0.5987	0.6225	0.5	0.5646	0.7577	0.657	0.7389	0.6225
2	0.9065	0.3046	0.6454	0.7154	0.3586	0.522	0.7699	0.7248	0.8055	0.6508
3	0.9257	0.2478	0.656	0.7385	0.2982	0.4945	0.7489	0.7408	0.8173	0.6572
4	0.9293	0.2321	0.6584	0.7439	0.2804	0.4848	0.7344	0.7445	0.8163	0.6586
5	0.93	0.2281	0.6589	0.7452	0.2757	0.4818	0.7285	0.7453	0.8142	0.659
6	0.9302	0.2271	0.659	0.7455	0.2746	0.481	0.7264	0.7455	0.813	0.659
7	0.9302	0.2269	0.659	0.7455	0.2743	0.4807	0.7258	0.7456	0.8126	0.659

Рисунок 3. Початкова симуляція [авторська розробка]

У першій базовій симуляції, де параметри ще не змінювались, простежується, природня динаміка ланцюжка. При незмінних вхідних умовах обізнаність користувачів (C3) поступово підтягує складність паролів (C1) та знижує повторне використання (C2), що вже на початкових етапах веде до стабільного невеликого зменшення компрометації. Відповідно, зниження компрометація (C5) впливає на рівень успішності атаки типу Brute Force (C6) і на те, який доступ може отримати зловмисник після зламу (C7). У кінцевому підсумку, це має відбиток на показнику ризику масштабного інциденту (C9).

Для першого досліджуваного сценарію ми змінюємо концепт C3 (обізнаність користувачів щодо безпеки паролів), для того, щоб дослідити, як знання впливають на створення паролів і на подальшу безпеку їх використання. C3 стає з 0,9.

Результати симуляції зображені на рис. 4 та рис. 5.

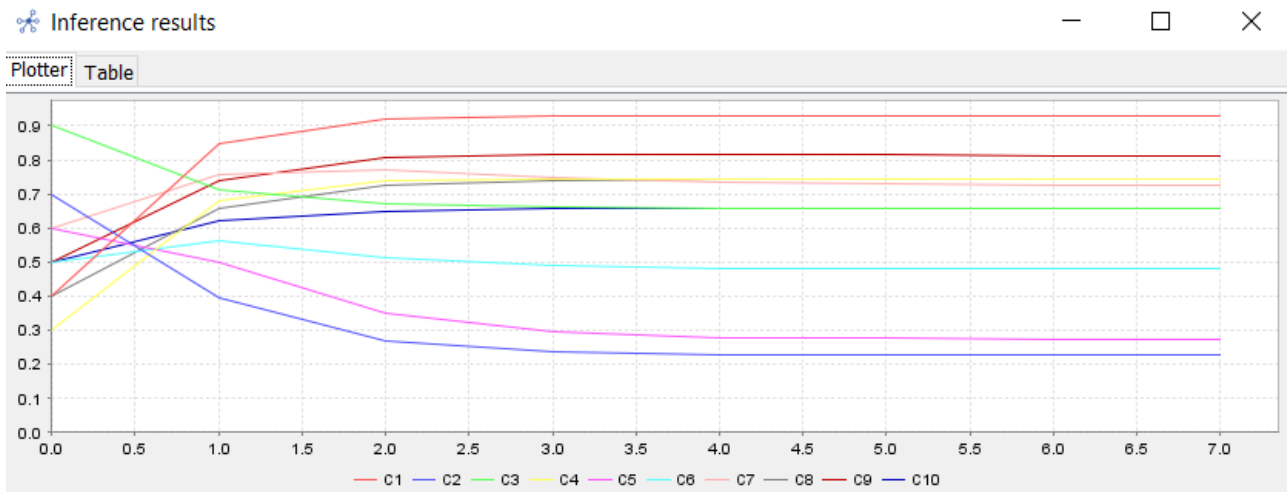


Рисунок 4. Друга симуляція (графічне представлення) [авторська розробка]

Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0	0.4	0.7	0.9	0.3	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5
1	0.8455	0.3941	0.7109	0.6792	0.5	0.5646	0.7577	0.657	0.7389	0.6225
2	0.9207	0.2667	0.6706	0.7378	0.3504	0.5143	0.7699	0.7248	0.8055	0.6508
3	0.9292	0.2348	0.6616	0.7452	0.2944	0.4905	0.7475	0.7408	0.8173	0.6572
4	0.9301	0.2282	0.6596	0.7457	0.2792	0.4832	0.7335	0.7445	0.8161	0.6586
5	0.9302	0.227	0.6592	0.7457	0.2754	0.4813	0.728	0.7453	0.814	0.659
6	0.9302	0.2268	0.6591	0.7456	0.2745	0.4808	0.7263	0.7455	0.8129	0.659
7	0.9302	0.2268	0.6591	0.7456	0.2743	0.4807	0.7258	0.7456	0.8125	0.659

Рисунок. 5. Друга симуляція [авторська розробка]

Порівняння цієї симуляції з першою показує, як різке підвищення обізнаності користувачів змінює поведінку системи. З результатів видно, що C1 (складність паролів) зростає значно швидше та досягає вищих значень уже на першому кроці, а C2 (повторне використання паролів) навпаки знижується. Це очікуваний результат, адже підвищення обізнаності безпосередньо стимулює створення складніших паролів та зменшує повторне використання, що наочно було доведено результатами симуляції. Окрім цього, концепт C5 (ймовірність компрометації) у другій симуляції спадає до нижчого рівня, ніж у першій. Це також впливає і на C6 (успішність Brute Force атаки), який зменшується, на C7 (рівень доступу зломисника після зламу) та не кардинально, але на C9 (ризик масштабного інциденту). Ці концепти стабілізуються на нижчих показниках

порівняно з першою симуляцією, що демонструє зниження загального ризику для системи.

У підсумку, підвищення концепту С3 привело систему до більш захищеного стану та забезпечило нижчу ймовірність масштабного інциденту, ніж у базовій симуляції без зміни параметрів.

У наступному сценарії залишаємо вже введені зміни, але також додаємо зміну концепту С8 (захист облікових даних). $C8 = 0.8$, результати симуляції зображені на рис. 6 та рис. 7.

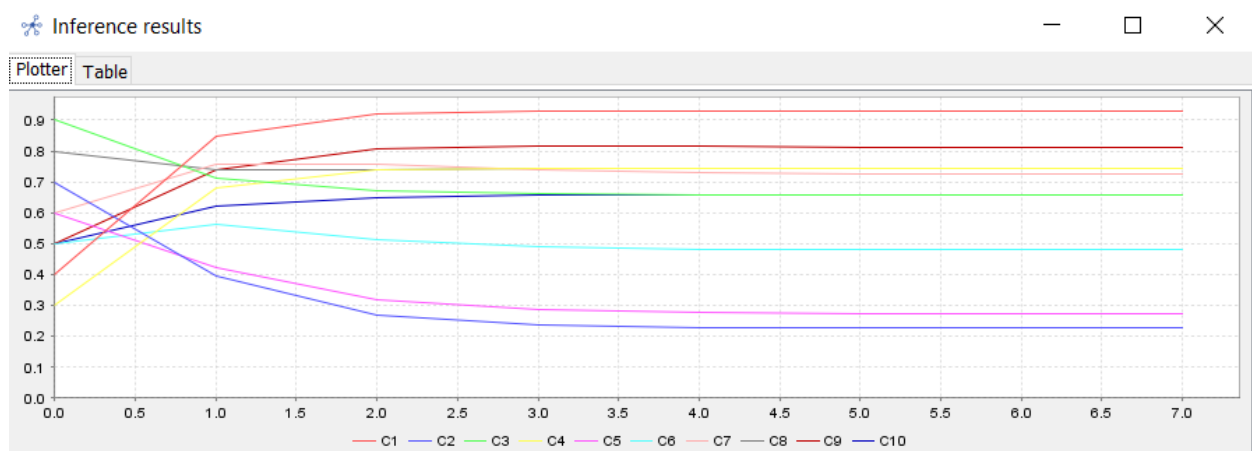


Рисунок 6. Третя симуляція (графічне представлення) [авторська розробка]

Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0	0.4	0.7	0.9	0.3	0.6	0.5	0.6	0.8	0.5	0.5
1	0.8455	0.3941	0.7109	0.6792	0.4207	0.5646	0.7577	0.7408	0.7389	0.6225
2	0.9207	0.2667	0.6706	0.7378	0.3178	0.5143	0.757	0.7412	0.8055	0.6508
3	0.9292	0.2348	0.6616	0.7452	0.285	0.4905	0.7394	0.7439	0.8156	0.6572
4	0.9301	0.2282	0.6596	0.7457	0.2768	0.4832	0.7303	0.7451	0.8147	0.6586
5	0.9302	0.227	0.6592	0.7457	0.2748	0.4813	0.727	0.7454	0.8134	0.659
6	0.9302	0.2268	0.6591	0.7456	0.2743	0.4808	0.726	0.7455	0.8127	0.659
7	0.9302	0.2268	0.6591	0.7456	0.2742	0.4807	0.7257	0.7456	0.8125	0.659

Рисунок 7. Третя симуляція [авторська розробка]

З наведених результатів прослідковується вплив посиленних механізмів захисту на загальну динаміку моделі. Порівняно з попередньою симуляцією, де підвищували лише концепт С3, і першою, де параметри були базовими, зміна С3 та С8 призводять до найбільш помітного зниження С5, що є очікуваним, адже MFA та інші засоби безпеки безпосередньо знижують доступ, навіть, у випадку

слабкого паролю. У результаті також зменшились і значення C7 та C9, хоча зміни тут менш різкі, бо вони залежать не лише від C8, а й від компрометації, що знижується поступово. Усі інші компоненти демонструють майже ідентичну поведінку до другої симуляції, що вказує на те, що посилення тільки захисту не змінює поведінку користувачів (наприклад, складність паролю, повторне його використання тощо), але впливає на кінцеві ризики.

Загалом третя симуляція показує, що навіть при високих значеннях C2 (повторне використання) та недостатньо високої складності паролів, сильні механізми захисту можуть стримувати розвиток атаки й знижувати критичні наслідки.

Таким чином, нечітка когнітивна карта дозволяє швидко проводити аналіз типу "Що, якщо" шляхом модифікації початкових умов; зміна значення лише одного концепту генерує нові сценарії розвитку подій і водночас демонструє ефективність застосованих захисних заходів.

Варто відзначити, що існуючі моделі прогнозування кіберризиків переважно використовують історичні дані, проте їхня валідність та прогностична спроможність ставляться під сумнів в умовах експоненційно швидкого розвитку та перманентної трансформації загрозливого кіберландшафту [146, с.6]. Створення надійних сценаріїв кіберризиків вимагає поєднання людського досвіду та штучного інтелекту, однак прийняття рішення залишається за людиною.

SECTION 8. INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.8.1

8.1 Using neuro-headsets to diagnose genetic diseases

A neuroheadset (Fig. 1) is a portable device that records brain activity or related physiological signals for the analysis of cognitive state, emotional reactions, neuromuscular activity or for interaction with digital systems (brain-computer interfaces). It usually consists of sensors (electrodes or optical sensors), a transmitting module and software that processes signals in real time. Such devices are used in medicine, rehabilitation, sports training, psychophysiological monitoring, game interfaces and research.



Fig. 1 External view of the neuroheadset [165]

The most common are EEG neuroheadsets [166-177], which record the electrical activity of the cerebral cortex using dry or gel electrodes; they are both consumer (4–16 channels) and professional (32–256 channels). Optical neuroheadsets fNIRS use near-infrared radiation to measure changes in cerebral blood flow and assess cognitive load in real time. A separate group is EMG and EOG headsets, which record peripheral neurosignals - muscle activity or eye movements, and are used in combined control systems or for users with motor disorders. Invasive neuroheadsets are also used in medical and research centers, which read impulses directly from the cerebral cortex through implanted electrodes; they provide the highest accuracy, but require surgical intervention. In recent years, hybrid neuroheadsets have been rapidly spreading, combining EEG, fNIRS, EMG, and other sensors to improve signal reliability. Commercial and gaming BCI headsets are focused on interaction with digital content,

meditation, concentration training and use in VR/AR environments. All these types form a modern spectrum of technologies that are gradually moving from experimental devices to tools for practical medicine and everyday use.

The global neuroheadset market in 2024–2025 is showing stable growth within 12–15% annually, which is associated with the development of BCI, neurotraining and remote medicine. According to open analytical reviews, the total volume of the global neurotechnology market in 2024 is estimated at 17–19 billion dollars, and the segment of portable neuroheadsets is about 1.5–2 billion dollars with a forecast of growth to 5 billion by 2030. EEG devices have the largest share (over 55%), while fNIRS and hybrid systems are growing the fastest (20–25% annually). Key manufacturers - Emotiv, NeuroSky, OpenBCI, NextMind (Snap), g.tec, Bitbrain, Muse - actively expand product lines, adding multi-channel systems and AI algorithms. The consumer segment (gaming, meditation, fitness) covers over 40% of sales, but the medical direction is growing most dynamically - neurorehabilitation, monitoring of cognitive disorders, diagnostics of neurodegenerative and genetic diseases.

Over the past decade, biomedical engineering has undergone a significant technological shift associated with the development of portable sensor devices, in particular neuroheadsets [165-169], capable of recording electrical, magnetic and optical brain activity. Until now, such systems have been mostly associated with brain-computer interfaces, cognitive function studies, rehabilitation of patients after strokes or neuromarketing. However, the gradual complication of sensor architecture, increasing the accuracy of biosignal registration and integration of deep learning algorithms have opened up the possibility of using neuroheadsets in areas that were previously considered exclusively the prerogative of laboratory genetic methods. One such area is the early diagnosis of genetic diseases, in which the analysis of brain activity can reveal characteristic patterns associated with mutations, disorders of neuronal myelination, changes in synaptic transmission and deficiency of neurotransmitters.

Traditionally, genetic diagnostics is based on molecular approaches - DNA sequencing, the study of chromosomal aberrations, the search for mutations, the

analysis of parental genomes or biochemical markers. These approaches are highly accurate, but they do not answer the question of how exactly a genetic defect manifests itself in the functioning of the nervous system at the level of electrophysiology. That is why neuro-headsets are gradually being integrated as an auxiliary tool for clarifying the clinical picture, monitoring the dynamics of the disease and searching for phenotypic markers that are difficult to observe by other methods. The emergence of highly sensitive dry electrodes and optical sensors has made it possible to regularly monitor brain activity without the need to use bulky laboratory equipment.

Among the genetic conditions that can exhibit specific patterns of brain activity, Down syndrome, Rett syndrome, fragile X syndrome, phenylketonuria, and some variants of epileptic encephalopathies are most often considered. Many of these disorders are accompanied by changes in the formation of the cortex, impaired neuronal plasticity, and reduced levels of certain enzymes, which directly affect electrical processes in the brain. Therefore, neuroheadsets can serve as an additional tool for identifying functional biomarkers that reflect the genetic defect not as a molecular phenomenon, but as a consequence of its systemic action.

Current consumer and clinical neuroheadset models vary in sensitivity, but they all rely on several traditional methods: electroencephalography (EEG), functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), portable magnetoencephalography, and combined approaches where electrical signals are supplemented with data from motion sensors, oculography, or cardiac activity. The use of multimodal systems reduces error and allows for clearer markers. For example, generalized slow waves are characteristic of Rett syndrome. and a pronounced decrease in alpha rhythm, which can be detected even by small-channel devices. In fragile X syndrome, typical changes are manifested in the form of increased theta activity and asynchrony between the hemispheres, which is also recorded by portable EEG.

Special attention is paid to early diagnostic technologies in newborns. Not all genetic diseases manifest themselves immediately after birth, and some of them can be detected only by indirect signs - sleep disorders, frequent myoclonus, deviations in sensory reactivity. Portable neuro-headsets for infants, which use soft electrodes and

low-intensity optical sensing, practically do not cause discomfort and can be used for long-term monitoring at home. The use of algorithms for analyzing rhythm variability, assessing channel synchronization, spectral density and nonlinear characteristics allows detecting abnormal neural patterns associated with genetic disorders of metabolism, myelin sheath or synaptic transmission.

A powerful direction is the use of neuro-headsets in combination with machine learning. Neural networks trained on large samples of biosignals are able to notice complex and subtle changes that a human expert cannot assess without high-precision equipment. For example, deep convolutional networks detect atypical ratios of alpha and theta rhythms, asymmetry of temporal patterns, or imbalances in neuronal ensembles that are inherent in certain genetic mutations. In some experiments, classification accuracy reached 85–92%, which is a significant indicator for non-invasive methods. Although this level does not yet allow replacing molecular tests, it enhances comprehensive screening and significantly accelerates the start of therapy.

In practice, neuro-headsets are valuable for dynamic monitoring of patients in whom genetic disorders affect cognitive development. Doctors can record changes in the response to sensory stimuli, assess the stability of attention, the speed of formation of neural responses and patterns of brain excitation. For example, in children with phenylketonuria, impaired metabolism of phenylalanine causes changes in the structure of white matter, which is reflected on the EEG as an increase in slow waves. Regular measurements using neuro-headsets allow us to assess how effective dietary therapy is and whether there is an improvement in neurophysiological indicators.

In addition to diagnosis, certain types of genetic diseases can manifest themselves in the form of specific patterns of emotional regulation, sleep disorders, or stress reactions. Neuroheadsets that simultaneously record EEG and cardiac variability allow you to capture complex correlations between the central and autonomic nervous systems. Some chromosomal abnormalities are characterized by sleep phase disorders, shifts in REM periods, and a decrease in the depth of the delta phase. Such features can help doctors differentiate genetic pathologies from purely behavioral or psychoemotional conditions.

Research in the field of digital medicine shows that neuro-headsets can serve as an important tool for early diagnosis, when identifying risk patterns is carried out even before the appearance of external symptoms. This is especially important for conditions that develop gradually: neurodegenerative disorders, mitochondrial diseases, hereditary epilepsies. In such cases, early detection of characteristic changes can help to start therapy at a preclinical stage, when the brain structure has not yet suffered significant damage.

A separate direction has been the use of portable neuro-headsets in studies of behavioral phenotypes associated with genetic mutations. Many genetic conditions have hidden, mild manifestations that are not always monitored by doctors. Some mutations affect the regulation of emotions, the speed of neural adaptation, and the formation of motor circuits. Neuro-headsets help collect quantitative data that allow us to assess how pronounced certain features are compared to normative values. This approach provides more objective diagnostics and helps to justify the need for genetic counseling.

The effectiveness of neuro-headsets depends on the precise modeling of test protocols. For each genetic disease, special cognitive tasks, sensory stimuli or motor responses can be created that evoke a characteristic neural response. For example, in fragile X syndrome, adaptation to repetitive sound stimuli is impaired - this can be detected by changes in the amplitude of sound-evoked potentials. In Down syndrome, changes in the speed of sensory integration are typical, which are also recorded on the EEG. Thus, the neurophysiological profile can act as a marker of the genetic condition.

Modern neuro-headsets also allow for the analysis of nonlinear characteristics of signals: entropy, fractal indices, mutual information, correlation dimensions. Such parameters are especially valuable, since many genetic diseases cause dysfunctions of neural networks at the level of organization, which is not always manifested in the classical spectrum of rhythms. For example, disorders associated with myelin disruption can cause chaotic changes in the duration of neural impulses and asymmetries between channels. Nonlinear analysis allows for the detection of such changes before they become noticeable at the behavioral level.

Engineering innovations in the creation of neuro-headsets contribute to improving the quality of diagnostics. Thanks to flexible electrodes with nanostructured surfaces, it has become possible to record even weak potentials without using gel or paste. New generation optical sensors provide greater accuracy in the analysis of blood supply to the brain, which is important for studies of metabolic disorders associated with genetic changes. Multi-channel systems are now equipped with real-time processors, which allows for primary signal processing directly on the device, reducing the amount of data transmitted to the cloud.

An important factor in development is the availability of portable devices, thanks to which neurophysiological studies can be conducted in schools, rehabilitation centers, behavioral genetics laboratories, as well as at home. Comfortable neuroheadsets for the user allow for long-term data collection, which significantly expands the possibilities of creating predictive models. For example, for some genetic syndromes it is important to assess how brain activity changes during the day or during fatigue. Long-term monitoring helps to detect functional fluctuations that cannot be recorded with a single examination in the clinic.

A particularly promising direction is the integration of neuro-headsets with personalized biomedical platforms, in which genetic data, metabolic test results, and neurophysiological indicators are analyzed in a complex. This approach allows the creation of digital phenotypes, which are detailed individual profiles that reflect the interaction of genotype and neural dynamics. In the future, such profiles may help predict the risks of developing diseases, assess the effectiveness of therapy, and develop personalized recommendations for each patient.

Given the rapid development of technologies, the emergence of hybrid neuroheadsets based on a combination of EEG, ECG modeling, optical sensors and micronavigation systems capable of recording spatial characteristics of brain activity is expected in the coming years. This will allow obtaining even more accurate data on the operation of neural networks and identifying specific patterns associated with rare genetic mutations.

EEG (electroencephalography) is a non-invasive method of recording the electrical activity of the brain, which measures fluctuations in electrical potentials that occur in cortical neurons.

EEG can be recorded using a neuroheadset, since most modern portable systems are built on the principle of electroencephalography and contain dry or gel electrodes that record the electrical activity of the cerebral cortex. Such devices usually have fewer channels than clinical equipment, but they are able to qualitatively record the main rhythms - delta, theta, alpha, beta and gamma, as well as track spectrum changes associated with attention, stress, cognitive loads or certain neurophysiological abnormalities. Neuroheadsets allow for long-term home monitoring, are used in BCI systems, neurotraining, rehabilitation and preliminary diagnosis of certain disorders. The limitation is lower accuracy and spatial resolution due to a smaller number of electrodes and sensitivity to artifacts, however, for most applied tasks, including general screening, training, research, and assessment of functional brain states, a portable neuroheadset provides a sufficient level of information and is an effective alternative to stationary EEG systems.

Table 1. Characteristic EEG frequencies in genetic diseases

Genetic disease	Characteristic frequency changes in EEG	Typical reasons for changes
Rett syndrome (MECP2)	• Delta 1–3 Hz ↑ • Theta 4–6 Hz ↑ • Alpha 8–10 Hz ↓ • Periodic slow waves	Impaired synaptic plasticity and cortical integration
Down syndrome (Trisomy 21)	• Slow waves 2–6 Hz ↑ • Alpha 8–12 Hz ↓ • Late sensory responses 3–7 Hz	Delayed myelination, impaired neural integration
Fragile X syndrome (FMR1)	• Theta 4–8 Hz ↑ • Delta 1–3 Hz ↑ • Beta 13–20 Hz ↓ • Hemispheric asymmetry	Disturbances in GABAergic transmission and neuronal homeostasis
Phenylketonuria (PKU)	• Delta/theta 1–7 Hz ↑ • Alpha 8–12 Hz ↓ • Decrease in alpha peak frequency	Phenylalanine neurotoxicity, white matter degeneration

Continuation table 1

MELAS/MERRF (mitochondrial)	• Delta 1–4 Hz ↑ • Episodes of high-frequency rhythms 20–30 Hz • Alpha disorganization	Neuronal energy deficiency, damage to the cortex and subcortex
Tuberous sclerosis (TSC1/TSC2)	• Local delta 0.5–4 Hz ↑ • Slow background 5–8 Hz • Theta synchronization	Cortical tubers, developmental disorders of neural tissue
Duchenne/Becker Dystrophy	• Theta 5–7 Hz ↑ • Beta 13–20 Hz ↓ • Alpha variable	Dystrophin deficiency in the CNS, changes in subcortical structures
Dravet (SCN1A mutation)	• Theta 4–7 Hz ↑ • Delta 1–3 Hz in drowsiness • High-frequency spikes 30–80 Hz	Sodium channel dysfunction, epileptic hyperexcitability
CDKL5- encephalopathy	• Deep delta 0.5–2 Hz ↑ • Theta 4–6 Hz ↑ • Rhythm disorganization	Impaired formation of cortical networks in infants
Lennox–Gastaut (often genetic in nature)	• Slow spikes 1–2.5 Hz • Hypersynchronous beta 20–30 Hz	Severe diffuse cortical disorders, polygenic mutations
Wilson's disease (ATP7B)	• Slowed alpha rhythm 6–8 Hz • Theta 5–7 Hz ↑ • Discoordination of hemispheres	Basal ganglia damage due to copper accumulation
Lysosomal diseases (GM1, Niemann– Pick)	• Delta 1–3 Hz ↑ • High frequencies 10–30 Hz ↓ • Slow recovery after stimulus	Neurodegeneration due to enzyme defects

An increase in delta activity in the range of 1–3 Hz indicates the dominance of the slowest brain oscillations, which in a healthy adult appear mainly during deep sleep. When such waves are recorded in a state of wakefulness, this indicates a slowdown in neural transmission, insufficient maturity of cortical networks or their functional disorders. An increase in the theta rhythm of 4–6 Hz usually means a decrease in the level of cortical activation and the predominance of immature or insufficiently organized neural networks, since theta waves are characteristic of childhood, drowsiness and transitional states between wakefulness and sleep. Together with delta, increased theta activity indicates a reduced ability of the cortex to effectively integrate information and maintain sustained attention. A decrease in the power of the alpha

rhythm of 8–10 Hz, which is normally the leading background rhythm of the brain during a calm state with closed eyes, means a violation of synchronization between neuronal populations and a deterioration in the functional organization of the cortex. This condition is observed in various genetic and metabolic abnormalities that affect neuronal plasticity and interhemispheric communication. The presence of periodic slow waves, which are regularly repeated in the range of 1–4 Hz, indicates generalized cortical dysfunction, reduced speed of interneuronal communication and possible structural or metabolic damage to brain tissue. The combination of these signs reflects a slowed, poorly organized brain function and is characteristic of a number of genetic, neurometabolic and neurodegenerative disorders.

Neuroheadsets are actively used in the study and monitoring of genetic diseases, as they allow non-invasive recording of brain activity and detection of characteristic disorders of the cortical networks. For example, in Rett syndrome, neuroheadsets record a pronounced increase in slow waves, a decrease in alpha rhythm, and uneven synchronization between hemispheres, which makes it possible to detect deterioration even before the appearance of external symptoms. In children with Down syndrome, portable EEG helps to assess the delay in sensory response and the level of cortical maturity, which is important for planning early development programs. In phenylketonuria, such devices allow you to regularly monitor changes in brain activity at home and observe how the body responds to diet therapy - a decrease in slow waves on the EEG is often a sign of improved metabolism. In patients with fragile X syndrome, neuroheadsets are able to detect excessive theta activity and impaired brain synchronization during attention tests, which helps to more accurately assess the degree of cognitive impairment. In mitochondrial diseases such as MELAS or MERRF, portable EEG records episodes of sharp slowing of brain activity, which allows for long-term monitoring and determination of the frequency of crisis states. In the case of tuberous sclerosis, neuroheadsets help to localize areas of excessive slow activity associated with cortical tubers, which is useful for rehabilitation programs. In Wilson's disease, changes in theta and alpha rhythms recorded by the neuroheadset may indicate early damage to subcortical structures, even before the onset of severe symptoms. In

combination with cognitive tests, neuroheadsets allow to assess how brain activity changes during task performance, forming an individual neurophysiological profile of a person with genetic disorders. In addition, they are used for remote monitoring, when parents can record EEG at home and transmit data to a doctor, which is especially important for children with rare pathologies. In scientific research, neuroheadsets are used to create digital phenotypes - large databases of brain activity for specific mutations, which helps to discover new biomarkers and develop personalized medicine. Collectively, these examples demonstrate that portable neuroheadsets are already a valuable tool for understanding and controlling genetic diseases and continue to play an important role in modern neuromedicine.

The prospects for further development of neuro-headsets for the diagnosis of genetic diseases are associated with the complex evolution of sensor technologies, signal processing algorithms and digital medical platforms. In the coming years, a significant expansion of the functionality of portable systems is expected, which will allow them to be used not only as a tool for primary monitoring, but also as part of full-fledged clinical protocols.

The use of neuro-headsets for analyzing pathological fluctuations of brain activity encompasses a much wider spectrum of indicators than basic frequency characteristics. At the current stage, clinical research focuses on microstate phenomena, phase synchronization, cross-frequency interactions (CFC), spectro-temporal shifts, and local perturbations that may be sensitive to the mutational profile of specific genes.

In patients with myelination disorders typical of many rare genetic syndromes, a decrease in alpha-rhythm coherence between parietal and occipital regions is observed. This phenomenon is explained by the dispersion of impulse conduction velocity in demyelinated axons. In response to simple cognitive stimuli, extended latencies of P1, N1, and P300 potentials are also recorded, indicating slowed sensory integration. Even low-channel neuro-headsets are capable of detecting such changes when recognition algorithms operate with high temporal resolution.

Cross-frequency correlations are of particular importance, as they are frequently disrupted in cases of mutations affecting synaptic transmission. For example, patients

with SCN2A or CACNA1A mutations demonstrate abnormal interaction between gamma oscillations (30–80 Hz) and theta rhythms — a phenomenon that may be informative for early prediction of epileptic crises. New-generation neuro-headsets can already detect these patterns through increased sampling rates.

Expanding the functionality of portable systems allows their use in various clinical scenarios. Screening protocols are applied for the primary assessment of newborns and young children. Here, the ability to perform continuous long-term recording is essential, as it enables the detection of spontaneous myoclonic episodes or sleep abnormalities. Studies show that in the case of metabolic genetic disorders, the first deviations in EEG may appear precisely during transitions between sleep phases.

Monitoring disease progression is crucial for conditions such as phenylketonuria, MELAS, tuberous sclerosis, or Wilson disease. Regular measurements reveal changes in spectral power or interhemispheric synchronization in response to dietary therapy, medication protocols, or cognitive rehabilitation. Portable neuro-headsets make it possible to create individualized dynamic curves of a patient's neurophysiological state — something that was previously achievable only in laboratory settings.

Assessment of therapeutic effectiveness is also important. For example, when L-DOPA is administered to patients with dystonia or certain neurometabolic disorders, it is possible to evaluate the reduction of pathological theta activity. During physiotherapy or cognitive-behavioral treatment, neuro-headsets enable detection of restored alpha-rhythm stability and improved brain reactivity to sensory stimuli.

The development of artificial neural networks drives a transition from classical spectral analysis to complex computational models. Among the most effective approaches are:

- deep convolutional neural networks (CNN) for recognizing spatial-frequency spectrum maps;
- recurrent networks (LSTM, GRU) for identifying temporal dependencies;
- graph neural networks (GNN) for modeling inter-channel synchrony;
- autoencoders and variational autoencoders for detecting latent patterns unobservable through classical analysis.

Recent studies demonstrate that combining deep CNN architectures with GNNs enables classification accuracy of 90–94% in tasks involving recognition of rare genetic pathologies based on EEG profiles. These results pave the way for fully automated screening platforms that can operate in primary-care clinical settings.

Special attention is paid to developing models capable of functioning on small datasets, since many genetic syndromes are rare. Transfer-learning techniques are applied in such cases: a neural network pretrained on general EEG data is fine-tuned on a small cohort of patients with a specific disorder. This significantly improves accuracy while minimizing the number of real clinical recordings required.

In the coming years, multifunctional systems combining the following are expected to appear:

- high-frequency EEG electrodes with nanostructured coating;
- hybrid optoelectrical modules with high sensitivity to changes in cerebral blood flow;
- micro-inertial sensors for analyzing subtle head micro-movements and coordination;
- graphene and polymer electrodes providing high conductivity and low impedance;
- edge processors for local signal processing and reduced dependence on cloud systems.

The combination of different sensing channels will enable the construction of three-dimensional models of brain activity in real time. Integrated with sLORETA methods and neural inverse modeling, such systems will bring portable neuro-headsets closer to the capabilities of laboratory-grade neurophysiology.

A technically challenging yet highly promising task is the creation of completely wireless systems with autonomous energy support — for example, using nanogenerators that convert micromovements or body heat into electrical energy. This will allow long-term monitoring for patients with severe genetic pathologies without interruption.

The expanding capabilities of neuro-headsets in diagnosing genetic disorders raise important ethical questions. Specifically, the storage of large biosignal databases requires specialized confidentiality protocols; EEG pattern analysis may reveal abnormalities even before a genetic diagnosis is confirmed, necessitating a careful approach when informing families; autonomous systems must comply with international safety standards, including IEEE as well as FDA/EMA medical regulations.

A particularly important aspect is avoiding misinterpretation, since EEG is a functional rather than a genetic test. Therefore, the results obtained using neuro-headsets should be applied only as part of a comprehensive model, and not as a standalone diagnostic tool.

One of the prospects is the creation of high-precision hybrid neuro-headsets that will combine EEG, fNIRS, EOG, EMG, micro-accelerometers and optical sensors. Combining such channels will provide more reliable identification of specific neurophysiological patterns characteristic of genetic mutations, as well as reduce the influence of motion artifacts and environmental noise.

Such systems can become the basis for remote clinical monitoring, when patients with rare genetic syndromes are under constant observation of doctors without the need to frequently visit medical institutions.

A promising direction is the development of machine learning algorithms capable of analyzing large arrays of biosignals and forming individual digital phenotypes. The growth of databases of EEG patterns in various genetic disorders will allow the creation of prediction models that can identify disease risks even before clinical manifestation.

Of particular importance will be the use of deep neural networks capable of recognizing complex nonlinear dependencies that often accompany mutations associated with neuronal myelination or disruption of synaptic activity.

Another promising direction is the development of neuro-headsets for use in young children, including newborns. The use of soft electrodes, sensors with low-intensity optical radiation and flexible materials makes long-term monitoring possible without discomfort for the child. This opens the way to the creation of programs for

early diagnosis of hereditary disorders of metabolism, myelination and development of neural networks at stages when traditional methods are still ineffective.

Technologies based on the integration of bioelectrical, optical and behavioral data into single multi-structural models have significant potential. Combining information on brain activity, sleep characteristics, motor responses, emotional responses and metabolic indicators can provide a deeper understanding of how a particular genetic defect affects the functioning of the nervous system. This will contribute to more accurate patient stratification and selection of personalized treatments.

In the long term, neuro-headsets could become part of comprehensive biomedical platforms that integrate genetic data, biochemical markers, and neurophysiological profiles of each patient, allowing for dynamic models of disease progression and prediction of the body's response to therapeutic interventions.

In general, the prospects for the development of neuro-sets in the diagnosis of genetic diseases indicate the possibility of forming a new level of personalized medicine, where monitoring of brain activity will become an integral part of clinical practice, and timely detection of pathological changes will be the basis for effective treatment and improving the quality of life of patients.

8.2 Сукупність математичних моделей управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) є невід'ємною складовою всіх сфер суспільної діяльності людства та застосовуються для вирішення широкого кола завдань від розважальних до суто специфічних [178-180].

Основними завданнями, які вирішуються ІСППР є [180-182]:

- вирішення різноманітних обчислювальних завдань в інтересах широкого кола споживачів незалежно від сфери їх застосування;
- зберігання результатів обчислень і також проміжних результатів для потреб користувачів;
- підтримка прийняття рішень, особами які їх приймають;
- забезпечують передумови до інтелектуального прийняття рішень.

Тенденції розвитку сучасних ІСППР спрямовані на вирішення наступних завдань [181-185]:

- підвищення оперативності обробки різнотипних даних та їх достовірності;
- підвищення точності моделювання процесу їх функціонування;
- підтримання балансу між оперативністю та достовірністю процесом вирішення розрахункових завдань та ін.

Разом з тим, наявні наукові підходи до синтезу та функціонування ІСППР мають недостатню точність та збіжність. Зазначене пов'язане з наступними причинами [178-186]:

- суттєва роль людського фактору в процесі первинного налаштування ІСППР;
- велика кількість неоднорідних джерел інформації, які підлягають аналізу та подальшій обробці при функціонуванні ІСППР;
- ІСППР функціонують в умовах невизначеності, що спричиняє затримку на їх обробку;

– наявність великої кількості дестабілізуючих факторів, що впливають на функціонування ІСППР та ін.

Це й спонукає до впровадження різноманітних стратегій для покращення ефективності функціонування ІСППР при вирішенні розрахункових завдань. Один з таких варіантів є удосконалення існуючих (розробка нових) математичних моделей функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Проведення аналізу праць [186-223] показав що спільними недоліками вищезазначених досліджень є:

– моделювання кожного підходу здійснюється лише на окремому рівні функціонування ІСППР;

– при комплексному підході розглядаються як правило дві складові функціонування ІСППР. Зазначене не дозволяє оцінити в повній мірі вплив управляючих рішень на подальше їх функціонування;

– перелічені вище моделі, що є складовими частинами наведених вище підходів, забезпечують слабку інтеграцію одна в одну, що не дозволяє їх об'єднати між собою для спільного функціонування;

– наведені вище моделі використовують різний математичний апарат, що не вимагає відповідних математичних перетворень, які в свою чергу підвищують обчислювальну складність та знижують точність моделювання та ін.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Проблема, яка вирішується в дослідженні, є підвищення точності моделювання процесу функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Предметом дослідження є процес функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за допомогою сукупності математичних моделей їх функціонування. Гіпотезою дослідження є можливість підвищення оперативності та точності функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за рахунок розроблення сукупності моделей їх функціонування.

8.2.1 Концептуальна модель координації у інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

У ІСППР координатор виступає особою, що приймає рішення (ОПР), воно редукує складне завдання на серію часткових завдань, видає вихідні дані для експертів та збирає результати рішення. Недолік існуючих ІСППР у цьому, що координація у яких виконується одноразово, наприкінці розв'язання завдання, коли ОПР, виконавши агрегацію результатів рішення часткових завдань в єдине рішення, робить висновок про його придатність. При незадовільній оцінці інтегрованого результату можливості вирішити завдання знову може бути. Тому актуальною є розробка ІСППР, в яких координація йде по ходу вирішення складного завдання.

На основі моделі ІСППР [183], а також моделі складного завдання з координацією побудуємо модель ІСППР із координацією:

$$DSS = \langle PRT, prt^{dm}, R^{dm} \rangle, \quad (1)$$

де $PRT = \{prt_q \mid q = 1, \dots, N_{prt}\}$ – множина моделей експертів; prt^{dm} – модель ОПР; $R^{dm} = \{r^{dm\ q} \mid q = 1, \dots, N_{prt}\}$ – відносини між ОПР та експертами, наприклад, відносини обміну інформацією. Кожен експерт працює суворо у своїй галузі знань $S_{prtq} \in S$, де S – множина всіх галузей знань необхідних для вирішення складного завдання, і не займається ніякими частковими завданнями крім своєї, $S_q \cap S_w = \emptyset$, при $q, w = 1, \dots, N_{prt}; q \neq w$. Ґрунтуючись на міркуваннях з [182] та враховуючи, що у реальних завданнях часткові завдання вирішуються експертами поетапно, модель експерта можна висловити:

$$prt_q = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, MET_{prtq}, S_{prtq}, In_{prtq}, \Delta t \rangle, \quad (2)$$

де B_{prof} – продукційна база професійних знань; B_{theor} – продукційна база теоретичних знань; B_{prec} – основа прецедентів (досвід); B_{facts} – основа фактів; MET_{prtq} – множина методів міркувань; S_{prtq} – опис галузі знань експерта, наприклад, у математиці опис математичної мови, основних понять, операцій;

In_{prtq} – інтерпретатор, який забезпечує виконання послідовності правил для вирішення задачі на основі фактів та правил, що зберігається в базах даних та знань; Δt – період видачі експертами проміжних рішень.

Модель ОНР може бути побудована за аналогією з (2):

$$prt^{dm} = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, B_{ext}, MET_{prtdm}, S_{prtdm}, In_{prtdm}, E, T \rangle, \quad (3)$$

де B_{ext} – продукційна база знань про те, як виконувати редукцію, агрегацію, порівняння та координацію; E – множина координуючих процесів; T – час вирішення складного завдання. Вираз (3) у порівнянні з (2) має суттєві відмінності. Продукційна база знань B_{ext} про те, як ОНР керує вирішенням складного завдання. Ці знання від інших експертів. Множина E описує, як ОНР може координувати роботу експертів. У даній роботі моделі ОНР не враховуються: B_{prof} – база професійних знань; B_{theor} – основа теоретичних знань; B_{prec} – основа прецедентів (досвід).

Розглянемо, як функціонує ІСППР відповідно до (1). Нехай перед ОНР поставлено завдання prb^u , що редукується ним на часткові завдання $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$. У традиційних ІСППР, описаних, наприклад, в [179], кожен експерт $prt_q, q = 1, \dots, N_{prt}$, отримавши своє часткове завдання $prt_j^h, j = 1, \dots, N_h$, знаходить її рішення, використовуючи свої професійні B_{prof} та теоретичні знання B_{theor} . Після закінчення процесу рішення він видає результат $sol^h_j \in SOL_j^h$, де SOL_j^h – множина результатів вирішення завдання prt_j^h , що можна записати у вигляді відповідності ψ_4 :

$$\psi_4 : DAT^h \otimes B^U \rightarrow SOL^h, \quad B^U = B_{prof} \cup B_{theor}. \quad (4)$$

Елементи відповідності ψ_4 – кортежі $(\{dat_\sigma^h\}, \{b_\beta^u\}, sol_\gamma^h)$, при $\sigma = 1, \dots, N_{dath}$; $\beta = 1, \dots, N_b$; $\gamma = 1, \dots, N_{sh}$, де перша компонента – двокомпонентний вектор, що складається з переліку вихідних даних $\{dat_\sigma^h\}, dat_\sigma^h \in DAT^h$ і переліку використовуваних експертом $\{b_\beta^u\}, b_\beta^u \in B^U$ (професійних знань – продукційних правил; теоретичних знань – аналітичних залежностей), а друга – результат

$sol_{\gamma}^u \in SOL^h$ вирішення завдання prb^h . Відповідність ψ_4 не є функцією (не може бути записана аналітично або обчислена чисельними методами), оскільки знання експерта та результати вирішення завдання-елемента можуть представлятися природною мовою. Воно неоднозначно, оскільки при неповному наборі вихідних даних, експерт може запропонувати кілька варіантів результатів, сюр'єктивно, тому що кожне рішення завдання prb^h відповідає хоча б одному елементу з $DAT^h \otimes B^U$ і не ін'юктивно, так як не кожному елементу $DAT^h \otimes B^U$ відповідає рішення завдання prb^h .

Кількість етапів, на які експерти розбивають процес вирішення часткових завдань, позначимо N_{sol} , а sol_l^h – результат вирішення часткового завдання на l -му етапі, $l = 1, \dots, N_{sol}$. На етап приділяється інтервал часу Δt , оскільки в практичних завданнях загальний час T на вирішення складного завдання prb^u , суворо обмежений, а час Δt постійний, кількість етапів визначається за формулою:

$$N_{sol} = T / \Delta t. \quad (5)$$

Слід зазначити, що в процесі вирішення часткового завдання prb^h , через координуючі впливи ОПР вихідні дані DAT^h в (4) можуть бути модифіковані – введена додаткова інформація або замінена застаріла інформація на нову. Нехай DAT_l^h вихідні дані для l -го етапу, $l = 1, \dots, N_{sol}$. Тоді DAT_1^h – вихідні дані, отримані від ОПР, причому $DAT_1^h = DAT^h$, а DAT_l^h , $l = 2, \dots, N_{sol}$ – вихідні дані наступних етапів. Індекс l означає номер етапу, на якому використовуються вихідні дані. Визначимо DAT_{l+1}^h – вихідні дані $l+1$ -го етапу, отримані після координуючих впливів ОПР щодо зміни даних l -го етапу.

Схема послідовності етапів роботи експерта з пошуку рішення часткового завдання π^h може бути описана таким чином:

$$DAT_l^h \otimes B^U \otimes \{sol_1^h\} \otimes \dots \otimes \{sol_{l-1}^h\} \Rightarrow \{sol_l^h\}, \quad l = 1, \dots, N_{sol}. \quad (6)$$

Вихідні дані DAT_l^h , $l = 1, \dots, N_{sol}$ на кожному етапі доповнюються координуючими впливами $e^\alpha \in E$, виданими ОПР експерту, які воно визначає на основі інтегрованого результату вирішення завдання prb^u на $l-1$ -му етапі. У

випадку ОПР може дати кілька координуючих впливів кожному експерту. Вважатимемо, що експерту видається один координуючий вплив одного типу. Визначимо відповідність ψ_5 :

$$\psi_5 \{sol_l^u\} \otimes B_{ext} \rightarrow E, \quad l=1, \dots, N_{sol}-1. \quad (7)$$

Максимальне значення l дорівнює $N_{sol}-1$, тому що після N_{sol} етапу вже неможливо використовувати координацію, оскільки отримано кінцевий результат; sol_l^u – інтегрований результат вирішення завдання prb^u на l -му етапі; $E = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N_e}\}$ – множина векторів виду $(e_1^1, \dots, e_{N_{prt}}^6)$, кожен компонент якого – координуюча дія для експерта, $e_q^\alpha \in E$, $q=1, \dots, N_{prt}$.

Оскільки знання про інтеграцію входять до складу B_{ext} ОПР (3), інтегрований результат sol_l^u вирішення складного завдання prb^u можна записати наступним чином:

$$\{sol_l^{h1}\} \otimes \dots \otimes \{sol_l^{hN_h}\} \otimes B_{ext} \rightarrow \{sol_l^u\}, \quad (8)$$

де $sol_l^{h1}, \dots, sol_l^{hN_h}$ – вирішення часткових завдань $prt_1^h, \dots, prt_{N_h}^h$ відповідно.

Елементи відповідності ψ_5 – кортежі $((sol_l^u, \{b_{ext}^\mu\}), \varepsilon_p)$, при $l=1, \dots, N_{sol}$, $\mu=1, \dots, \mu_{N_\mu}$, $p=1, \dots, N_e$ де перша компонента – двокомпонентний вектор, що складається з інтегрованого результату sol_l^u вирішення завдання prb^u на l -му етапі та переліку використаних ОПР знань про те, як виконувати порівняння, а $e \in E$ для експерта.

На N_{sol} -ом етапі ($l = N_{sol}$) вектор координуючих впливів $(e_1^1, \dots, e_{N_{prt}}^6)$, $\alpha = 6$, тобто ОПР не видає координуючих впливів експертам, а лише агрегує (здійснює інтеграцію рішень завдань prt^h в єдине, інтегроване рішення sol_l^u складного завдання prb^u) результати їх роботи. Якщо отриманий інтегрований результат sol_l^u не влаштовує ОПР, воно має переглянути вихідні дані завдання prb^u , тобто змінити DAT_l^h для всіх prt^h або змінити перелік своїх знань B_{ext} і знань експертів B_{prof} (моделі (4) і (3)), а після цього ініціювати повторну роботу ІСППР. Відповідність ψ_5 не є функцією (не може бути записана аналітично та

обчислено), оскільки знання ОПР та інтегрований результат вирішення завдання prb^u можуть бути представлені природною мовою. Воно однозначне, оскільки кожному експерту призначається конкретний координуючий вплив e_q^a і тому відповідність ψ_5 однозначно визначає лише один вектор $e \in E$. Воно сюр'єктивно, тому що кожному вектору $e \in E$ відповідає хоча б один елемент $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$ і не ін'єктивно, тому що не кожному елементу $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$ відповідає вектору $e \in E$.

Аналіз даної моделі ІСППР з координацією дозволяє зробити такий висновок. При вирішення складного завдання запропонована ІСППР, на відміну традиційних, навіть за неправильно розпочатому експертами в процесі вирішення часткових завдань prb^h з допомогою самоорганізації, вираженої в координації вирішення часткових завдань ОПР, прагнучиме ідеальному процесу вирішення складного завдання, що підвищує ефективність знаходження прийняттого результату вирішення складного завдання prb^u . При цьому помилки вирішення складного завдання будуть виявлені та виправлені до отримання результату вирішення складного завдання prb^u . Раніше для цього було потрібне її повторне рішення.

8.2.2 Математична модель функціональної гібридної ІСППР з координацією

У [182] наведена наступна концептуальна модель ІСППР, з використанням автоматного підходу [184-186], призначеної для вирішення складного завдання prb^u :

$$\begin{aligned} res_A^u &= R_1^{res\ met}(res_A^u, met^u) \circ R_1^{res\ pr}(res_A^u, pr^{ui}) \circ R_1^{res\ pr}(res_A^u, pr^{uo}) \circ \\ &\circ R_1^{res\ st}(res_A^u, st^u) \circ R_1^{st\ st}(st^u(t), st^u(t+1)) \circ R_1^{pr\ st}(pr^{ui}(t), st^u(t+1)) \circ \\ &\circ R_1^{st\ pr}(st^{up}(t), pr^{uo}(t)) \circ R_1^{res\ res}(RES^e, RES^e) \circ R_1^{pr\ pr}(pr^{ui}, PR^{ei}) \circ \\ &\circ R_2^{pr\ st}(PR^{eo}, pr^{uo}), \end{aligned} \quad (9)$$

де t – модельний час, $t \in \square$; $\circ$ – знак конкатенації; res_A^u – агрегат-ІСППР як ресурс вирішення неоднорідного завдання; met^u – інтегрований метод вирішення неоднорідного завдання; pr^{ui} – вихідні дані DAT^u [182] вирішення складного завдання prb^u , що передаються на вхід одного або декількох елементів res^e , побудованих за схемою (9) відповідно до декомпозиції prb^u завдання prb^u ; pr^{uo} – вихід одного або декількох елементів res^e , побудованих за схемою (9) відповідно до prb^u , що є метою GL^u вирішення завдання prb^u ; $st^u(t)$ – стан ІСППР в момент часу t ; RES^e – непорожня множина, складена з елементів res^e , побудованих відповідно до схеми (9); PR^{ei} , PR^{eo} – множина властивостей «вхід» та «вихід» елементів із RES^e відповідно; $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ – відносини функціонування ІСППР; $R_1^{res\ res}$ – відносини інтеграції [182] елементів; $R_1^{pr\ pr}$ – відносини між входами ІСППР та входами елементів; $R_2^{pr\ pr}$ – відносини між виходами елементів та виходами ІСППР. Елемент res^e моделює рішення однорідного часткового завдання або виконує допоміжні операції, будується відповідно до автономного методу met^e і має властивості $PR^e \subseteq PR$, найбільш важливі з яких – «вхід» pr^{ei} , «вихід» pr^{eo} і «стан» st^e .

Концептуальна модель елемента ІСППР:

$$\begin{aligned} res^e = & R_1^{res\ met}(res^e, met^e) \circ R_1^{res\ pr}(res^e, pr^{ei}) \circ R_1^{res\ pr}(res^e, pr^{eo}) \circ \\ & \circ R_1^{res\ st}(res^e, st^e) \circ R_1^{st\ st}(st^e(t), st^e(t+1)) \circ R_1^{pr\ st}(pr^{ei}(t), st^e(t+1)) \circ \\ & \circ R_1^{st\ pr}(st^e(t), pr^{eo}(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

де $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ – відносини «стан - стан», «вхід - стан», «стан - вихід», відповідно. Серед множини $MET^e = \{met_y^e \mid y = 1, \dots, N_{met}\}$ автономних методів виділятимемо met_1^e – аналітичні обчислення, met_2^e – нейрообчислення, met_3^e – нечіткі обчислення, met_4^e – міркування з урахуванням досвіду; met_5^e – еволюційні обчислення, met_6^e – статистичні обчислення, met_7^e – логічні міркування. Якщо між елементом res^e і автономним методом met_y^e встановлено відношення $R_1^{res\ met}(res^e, met_y^e)$, будемо позначати елемент $res^{e\ y}$. Відносини $R_1^{pr\ pr}$, $R_2^{pr\ pr}$ (10)

задаються на множинах змінних DAT^u , GL^u і множинах змінних DAT^h , GL^h часткових завдань, що входять до складу складного завдання.

У [182] наводиться три можливі випадки:

- 1) множина змінних для prb^u збігається з множиною змінних для prb^h , тобто $DAT^u = DAT^h$, $GL^u = GL^h$;
- 2) множина змінних для prb^h – підмножина відповідної множини prb^u , тобто $DAT^h \subset DAT^u$, $GL^h \subset GL^u$;
- 3) множина змінних підмножини відповідної множини prb^h , тобто $DAT^u \subset DAT^h$, $GL^u \subset GL^h$.

Оскільки для моделювання використано автоматичний підхід, стан автомата впливає лише вхідний сигнал. Вихідний сигнал залежить від стану автомата у попередній момент автоматного часу та вхідного сигналу.

Розширення моделі (9), (10) виконано виходячи з наступних міркувань. У процесі координації контролюються проміжні стани рішення часткових завдань [190]. У прийнятих позначеннях (9), (10) під цими станами розуміються стани (результати вирішення) функціональних елементів res^e , що імітують рішення часткових завдань prb^h . З аналізу цих станів у ході координації змінюються властивості «вхід» pr^{ei} одного чи кількох елементів res^e . Для врахування цього факту введемо в концептуальну модель ІСППР (9), (10) трійку $R_1^{st\ pr}(st^u(t), pr^{ui}(t+1))$. Іншими словами, на підставі стану ІСППР $st^u(t)$ в момент часу t змінюються вихідні дані $pr^{ui}(t+1)$ для ІСППР, але вже в момент часу $t+1$, тобто для наступної ітерації. Багато $R_1^{st\ pr}$ встановлює відносини між станом $st^u(t)$ гібриду res_A^u (9) на даний момент модельного часу t і станом входів одного або декількох елементів res^e на наступному кроці. Щоб зробити необхідну зміну входів pr^{ei} одного або кількох функціональних елементів res^e в (10) введемо трійку $R_1^{st\ act}(st^u, act^{ek})$, де $ACT^{ek} = \{act_1^{ek\ \alpha}, \dots, act_{N_{pr}}^{ek\ \alpha}\}$ – множина понять, що позначають координуючі дії, яке тотожно множині координуючих дій E , де α – тип координуючого впливу, $\alpha = 1, \dots, 6$.

Модифікована концептуальна модель для ІСППР з координацією:

$$res_A^u = res_A^u \circ R_1^{st\ pr} (st^u(t), pr^{ui}(t+1)), \quad (11)$$

а модифікована модель елемента ІСППР:

$$res^e = res^e \circ R_1^{st\ act} (st^u, act^{ek}) \quad (12)$$

Відносини $R_1^{st\ pr}$ і $R_1^{st\ act}$ не задаються заздалегідь, як і $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ фіксуються в ході роботи ІСППР і є результатом рішення k -завдання prb^k .

Розглянемо приклад ІСППР з трьох елементів $res_1^{e\ 1}$, $res_2^{e\ 6}$, $res_3^{e\ 7}$ для вирішення часткових завдань, які будемо називати функціональними [182], і одного координуючого (технологічного) елемента $res_k^{e\ 7}$ для вирішення k -завдання, що визначає порядок взаємодії функціональних елементів. На вхід ІСППР подаються вихідні дані DAT^u , розділені між функціональними елементами згідно з декомпозицією $prb^u \in PRB^u$ вирішення складного завдання prb^u . На виході маємо результати роботи функціональних елементів $res_1^{e\ 1}$, $res_2^{e\ 6}$, $res_3^{e\ 7}$, інтегрованих у загальне рішення SOL^u складного завдання prb^u .

У кожен момент часу t_l фіксується (опитується) стану всіх $res_q^{e\ y}$. Після цього $res_k^{e\ 7}$ на підставі стану $st^u(t_l)$ ІСППР видає координуючу дію $act_q^{ek\ \alpha} \in ACT^{ek}$ для кожного елемента $res_q^{e\ y}$. У процесі обробки технологічним елементом $res_k^{e\ 7}$ стану $st^u(t_l)$ ІСППР, тобто рішення k -завдання prb^k змінюється стан $st^{e\ k}$ технологічного елемента $res_k^{e\ 7}$. Причому час τ' , що відводиться на таку обробку, не повинен перевищувати періоду, через який проводиться фіксація стану ІСППР:

$$\tau' \leq T / N_{sol}, \quad (13)$$

де T – час, відведений на вирішення складного завдання prb^u ; N_{sol} – загальна кількість етапів. Переходи між станами функціональних елементів ІСППР відбуваються стрибкоподібно, оскільки між моментами часу t_l цей стан $res_q^{e\ y}$ не змінюється. Нижче представлена концептуальна модель роботи ІСППР, побудованої за (12), (13):

$$\begin{aligned}
 st^{e\ k}(t_0') &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_0) \\ st^{e\ 2}(t_0) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_1) \\ st^{e\ 2}(t_1) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_0') \rightarrow st^{e\ k}(t_1') \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_1) \\ st^{e\ 2}(t_1) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_2) \\ st^{e\ 2}(t_2) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_1') \rightarrow st^{e\ k}(t_2') \Rightarrow \dots \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_{p-1}) \\ st^{e\ 2}(t_{p-1}) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_p) \\ st^{e\ 2}(t_p) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_{p-1}') \rightarrow st^{e\ k}(t_p'),
 \end{aligned} \tag{14}$$

де « $\Rightarrow$ » позначають відносини $R^{st\ st}$, які пов'язують стани з різних підпросторів і задають перехід з одного однорідного простору в інші при функціонуванні ІСППР; « $\rightarrow$ » – перехід між станами всередині відповідного підпростору. Переходи « $\Rightarrow$ » з підпростору технологічного елемента $res_q^{e\ 7}$ моделюють видачу координуючих дій від ОПР до експертів. А сукупність переходів « $\Rightarrow$ » та « $\rightarrow$ » дозволяє змодельовати та простежити процес самоорганізації у процесі роботи ІСППР. У (14) фігурні дужки позначають початок та завершення паралельної роботи функціональних елементів. З моделі видно, що після кожної фіксації « $\} \Rightarrow$ » станів, функціональних елементів $res_q^{e\ y}$ відбувається передача управління технологічному елементу $res_q^{e\ 7}$, а після зміни ним свого стану відбувається передача управління групі функціональних елементів ІСППР. Ця модель споріднена з концептуальною моделлю [182]:

$$\left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t) \rightarrow st^{e\ 1}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{e\ 1}(t+n) \\ st^{e\ 2}(t) \rightarrow st^{e\ 2}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{e\ 2}(t+n) \end{matrix} \right\}. \tag{15}$$

В основі моделі (14) покладена ідея про те, що те саме однорідне завдання може вирішуватися паралельно різними функціональними елементами ІСППР. Відносини інтеграції елементів виникають як внутрішні невербальні образи в пам'яті користувача, який може порівнювати динаміку моделювання складного завдання з різних точок зору, що дозволяє побачити те, чого не дає моделювання з використанням однієї моделі. У моделі (13) розвинене інше припущення: включення до математичної моделі ІСППР моделі ОПР призводить до виникнення ефекту самоорганізації.

У цьому з'являється можливість взаємопов'язати результати роботи окремих функціональних елементів ІСППР у процесі синтезу вирішення складного

завдання, а чи не після, як у відомих моделях, що забезпечує релевантність ІСППР реальному процесу колективного засудження проблем.

8.2.3 Математичні моделі узгодженості в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

8.2.3.1 Концептуальна модель узгодженості в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

Під узгодженістю розуміється ступінь подібності цілей учасників ІСППР. Згідно [190], мета – стан речей, якого прагне досягти ОПР, що має для нього певну суб’єктивну цінність. У [180] мета – ідеальне передбачання результату діяльності, що виступає її регулятором, а в [184] – ситуація чи область ситуацій, яка має бути досягнута при функціонуванні системи за певний час. Узагальнюючи ці визначення, виділимо основні характеристики мети: представляє стан об’єкта управління, регулятор діяльності, має темпоральний характер (функція часу) та суб’єктивно корисна для ОПР. Схема концептуальних моделей мети може бути записана у вигляді:

$$\begin{aligned} pr^{gsu} &= R^{res\ st} (res^{ou}, st^{pou}) \circ R^{res\ pr} (res^{su}, pr^{csu}) \circ R^{res\ act} (res^{ou}, act^{dsu}), \\ act^{dsu} &= R^{act\ act} (ACT^{su}, ACT^{su}) \circ R^{act\ pr} (ACT^{su}, PR^t), \end{aligned} \quad (16)$$

де $R^{res\ st}$ – відносини «ресурс–стан», що ставлять у відповідність об’єкту управління його стан; $R^{res\ pr}$ – відносини «ресурс–властивість», що визначають суб’єктивну корисність стану об’єкта управління для експерта (суб’єкта управління); $R^{pr\ act}$ – відносини «властивість–дія», що ставлять у відповідність цільовому стану послідовність дій act^{dsu} ; ACT^{su} – множина можливих дій експерта; $R^{act\ act}$ – відносини «дія – дія», що визначають порядок дій $act^{dsu} \in ACT^{su}$ у послідовності act^{dsu} ; $R^{act\ pr}$ – відносини «дія – властивість» між діями з ACT^{su} та часом їх виконання PR^t . Стан st^{pou} об’єкта управління res^{ou} визначається значеннями властивостей останнього:

$$st^{pou} = R^{res\ pr} (res^{ou}, PR^{ou}) \circ R^{pr\ val} (PR^{ou}, VAL^{ou}),$$

де $R^{res\ pr}$ – відносини «ресурс – властивість», що задають множина властивостей об'єкту управління, а $R^{pr\ val}$ – відносини «властивість – значення», кожному з властивостей об'єкту управління ставлять у відповідність множина значень. Однією з властивостей у множині PR^{ou} може бути час, пов'язаний із функціонуванням об'єкту управління. При цьому мета експерта також стає динамічною та змінюється у часі.

Якщо властивості представлені різними змінними (наприклад, стохастичною та нечіткою лінгвістичною), оброблюваними різними методами, вибрати одне з рішень буде важко. Однак якщо властивості представлені змінними одного типу, можна задати метрику в двовимірному просторі векторів, що представляють допустимі стани об'єкта управління, і визначити відстань між st_1^{pou} і st_2^{pou} , а також st_2^{pou} і st^{pou} , після чого порівняти їх між собою. Щоб уникнути подібних ситуацій, виберемо один метод представлення всіх властивостей, що визначають стан об'єкта управління, а отже, і використовуваних при описі цілей ОПР та експертів. Аналіз показав, що цьому релевантний апарат теорії нечітких множин [187].

Функція приналежності $\mu^{gsu}(st^{pou})$ приймає значення на множині дійсних чисел в інтервалі [177, с. 1]. При цьому чим більше її значення, тим ближче стан об'єкта управління st^{pou} до мети експерта pr^{gsu} . Стан st^{pou} об'єкта управління описується набором його властивостей $PR^{ou} = \{pr_1^{ou}, ..., pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}\}$, представлених змінними одного з перерахованих у [182] класів, тобто:

$$\mu^{gsu}(st^{pou}) = \mu^{gsu}(pr_1^{ou}, ..., pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}) \quad (17)$$

Значення функції належності визначається підстановкою в (17) значень з множини VAL^{ou} властивостей об'єкту управління цього стану, тобто описується виразом $\mu^{gsu}(val_1^{ou}, ..., val_{N_{val}^{ou}}^{ou})$. Нечітка мета експерта може бути представлена одним із розглянутих у [184] методів побудови функцій належності нечітких множин. Вибір способу – за розробником ІСППР. Нижче для запису причинно-

наслідкових зв'язків між цілями та відносинами взаємодії експертів використовуються прямі методи [184] побудови нечіткої мети. Коли цілі експертів формалізовані, може бути виконано їхнє попарне порівняння та визначено ступінь близькості. Один із варіантів визначення ступеня близькості цілей експертів – розрахунок відстані Евкліда або Хеммінга між нечіткими множинами [181, 182]. Однак їх застосування до визначення ступеня подібності цілей експертів проблематичне: вони обчислюються лише за умови збіжності рядів або інтегралів, що використовуються в них. Інакше при $val_{\min}^{ou} = -\infty$ або $val_{\max}^{ou} = \infty$, де $val_{\min}^{ou}$ і $val_{\max}^{ou}$ – мінімальне та максимальне значення властивості pr^{ou} , що описує стан st^{pou} , відстань буде рівна нескінченності, навіть якщо одна множина включає інше. У цьому пропонується міра подібності нечітких цілей [183, 187, 189]:

$$s(A, B) = 0,5 \cdot \left(\frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_A^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} + \frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_B^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} \right). \quad (18)$$

Аналіз показує, що, на відміну від відстані Евкліда або Хеммінга, співвідношення (19) слід вважати мірою подібності нечітких множин, а не відстанню між ними, оскільки воно не задовольняє деяким з умов (а саме (18) і (18)), що пред'являються до функції відстані в математиці:

$$d(X, Y) \geq 0$$

$$d(X, Y) = d(Y, X)$$

$$d(X, Z) \leq d(X, Y) + d(Y, Z) \quad (19)$$

$$d(X, X) = 0. \quad (20)$$

Після визначення міри подібності цілей експертів можна визначити тип відносин з поміж них за рівнем узгодженості. Представимо його як нечітких множин на універсумі значень міри подібності цілей s (на множині дійсних чисел в інтервалі [177, с.1]). В роботі виділено три типи відносин за ступенем

узгодженості: конкуренція, нейтралітет та співробітництво. Що значення міри подібності цілей експертів (18), то тісніше взаємодія з-поміж них.

Таким чином, функція належності нечіткої множини «співпраця» повинна набувати максимального значення при $s=1$, а функція належності нечіткої множини «конкуренція» – при $s=0$. Максимум функції належності нечіткої множини «нейтралітет» має бути рівновіддалений від цих максимумів, тобто перебувати у точці $s=0,5$. Функції належності нечітких множин відносин конкуренції $\mu_{\text{конкуренція}}(s) =$, нейтралітету $\mu_{\text{нейтралітет}}(s) = \left(1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8\right)^{-1}$ та співпраці $\mu_{\text{співпраця}}(s) = \left(1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8\right)^{-1}$.

Представимо відношення між учасниками ІСППР за ступенем узгодженості лінгвістичної змінної cl – «тип відносини»:

$$cl = \langle \beta^{cl}, T^{cl}, U^{cl}, G^{cl}, M^{cl} \rangle, \quad (21)$$

де β^{cl} = «тип відносин» – найменування лінгвістичної змінної; $T^{cl} = \{\text{«конкуренція»}; \text{«нейтралітет»}; \text{«співпраця»}\}$ – множина імен лінгвістичних значень змінної (терм множина), що становлять найменування нечіткої змінної; $U^{cl} = [0;1]$ – область визначення (універсум) нечітких змінних, що входять до визначення лінгвістичної змінної; $G^{cl} = \emptyset$ – синтаксична процедура, що описує процес утворення з елементів множини T нових термів; $M^{cl} = \{\mu_{\text{конкуренція}}(s), \mu_{\text{нейтралітет}}(s), \mu_{\text{співпраця}}(s)\}$ – семантична процедура, що ставить у відповідність кожному терму множини T і термам, утвореним процедурою G , нечітка множина [183, 187, 189].

Значення лінгвістичної змінної cl (тип відносин) – терм із максимальним значенням функції власності. Для її обчислення потрібно визначити значення функції належності до кожної нечіткої множини, що становить відносини, і порівняти їх між собою. Нечітка множина з максимальним значенням функції власності відповідає типу відносин, встановленому між парою експертів. Можна визначити відображення «класифікатор відносин»

$rcl : (prt_i, prt_j) \rightarrow T^{cl}, ag_i, ag_j \in AG^*, i \neq j$, який кожній парі учасників ІСППР (prt_i, prt_j) ставить у відповідність один з термів t_k^{cl} , лінгвістичної змінної cl , тобто тип відношення. Відображення rcl визначається так:

$$rcl : (prt_i, prt_j) = \arg \max_{t_k^{cl} \in T^{cl}} \left(\mu_{t_k^{cl}} \left(s \left(pr_p^{gsu}, pr_q^{gsu} \right) \right) \right), \quad (22)$$

причому $r_1^{res\ pr} (prt_i, pr_p^{gsu}), r_1^{res\ pr} (prt_j, pr_q^{gsu}), i \neq j..$

Багато значень цього відображення формує матрицю **RCL** класифікації відносин між учасниками ІСППР. Рядки та стовпці матриці позначають учасників, а елементи $rcl_{ij} = rcl(prt_i, prt_j)$ – клас відносин між ними. Ця матриця використовується для ідентифікації ситуації колективного вирішення складного завдання.

Залежно від присутніх у ІСППР класів відносин виділимо три ситуації колективного рішення (мікрорівневої моделі ІСППР) завдання:

- 1) ситуація співпраці dss_{coop} , коли ІСППР складається із співробітників та нейтральних учасників і де немає відносин конкуренції;
- 2) ситуація нейтралітету dss_{neut} коли всі відносини в ІСППР нейтральні;
- 3) ситуація конкуренції dss_{comp} , коли в ІСППР є хоча б одна пара експертів із ставленням конкуренції.

У таких ІСППР можуть бути також нейтральні та співпраця учасників. За наявності учасників співробітництва вони розглядаються як єдиний уявний учасник; тоді всі учасники лише конкуруючі чи нейтральні.

Таким чином, процес самоорганізації на основі аналізу цілей можна розділити на дві частини: ідентифікація поточної ситуації колективного рішення (мікрорівневої моделі ІСППР) та вибір із множини можливих бажаної ситуації колективного рішення релевантною умовам поставленого завдання. З урахуванням цього, модель самоорганізації можна переписати так:

$$\begin{aligned} so^{goa} = & r_2^{res\ act} (dss, ACT^{sen}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{sen}, env) \circ R_1^{res\ res} (DSS, DSS) \circ \\ & \circ r_3^{res\ res} (dss, prt^{dm}) \circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ia}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ia}, dss_{cur}) \circ \\ & \circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ac}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ac}, DSS) \circ r_2^{act\ res} (act_{ac}, dss_{des}), \end{aligned} \quad (23)$$

де act_{ia} – дія ОПР «ідентифікація поточної ситуації колективного рішення»; act_{ac} – дія ОПР «вибір бажаної ситуації колективного рішення з множини можливих»; dss_{cur} – поточна ситуація колективного рішення (мікрорівнева модель ІСППР); dss_{des} – бажана ОПР ситуація колективного рішення з погляду параметрів завдання та її знань про ефективність тієї чи ситуації з множини DSS можливих у ІСППР; $r_2^{res\ act}$ – відношення «виконувати», що пов'язує суб'єкт та дію, яку він виконує; $r_1^{act\ res}$ – відношення «мати об'єктом», що зв'язує дію та її ресурс; $r_2^{act\ res}$ – відношення «мати результатом», що зв'язує дію та результат її виконання.

Перший етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *формалізація цілей експертів з урахуванням визначення нечіткої мети* (18).

Після того, як визначено нечіткі цілі всіх експертів, виконується наступний етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *попарне порівняння цілей та визначення їхнього ступеня узгодженості з використанням міри* (18). Далі визначається тип відносин між експертами за ступенем узгодженості з використанням лінгвістичної змінної cl «тип відносини» (23).

Завершальний етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *розпізнавання ситуації колективного рішення з використанням матриці CL'* . Залежно від присутніх у матриці CL' класів відносин виділяється три ситуації колективного вирішення завдання: співпраці dss_{coop} , нейтралітету dss_{neut} та конкуренції dss_{comp} . Після ідентифікації поточної ситуації колективного рішення ОПР вибирає act_{ac} (23) з множини можливих ситуацій колективного рішення, що відповідає умовам поставленого завдання. Залежно від параметрів завдання та своїх знань про ефективність тієї чи іншої ситуації колективного рішення ОПР може прагнути встановити одну з них, щоб підвищити ефективність роботи ІСППР, або намагатися змінити її, якщо обговорення заходить у глухий кут.

8.2.3.2 Модель гібридної інтелектуальної багатоагентної ІСППР із самоорганізацією на основі аналізу узгодженості цілей агентів

Під самоорганізацією ІСППР розуміється процес зміни архітектури ІСППР агентом, що імітує ОПР та входить до її складу, на основі аналізу взаємодії інших агентів з метою підвищення якості рішень. Модель гібридної інтелектуальної багатоагентної ІСППР із самоорганізацією на основі аналізу узгодженості цілей агентів описується наступним чином:

$$himas = (AG^*, env, INT^*, ORG, \{so, sl\}), \quad (24)$$

$$AG^* = \{ag_1, \dots, ag_n, ag^{dm}\}, \quad (25)$$

$$INT^* = \{prot, lang, ont, rcl\}, \quad (26)$$

$$ORG = ORG_{coop} \cup ORG_{neut} \cup ORG_{comp}, \quad ORG_{coop} \cap ORG_{neut} = \emptyset, \quad (27)$$

$$ORG_{coop} \cap ORG_{comp} = \emptyset, \quad ORG_{comp} \cap ORG_{neut} = \emptyset,$$

$$act_{himas} = \left(\bigcup_{ag \in AG^*} act_{ag} \right) \cup act_{ia} \cup act_{ac} \cup act_{col}, \quad (28)$$

$$act_{ag} = (MET_{ag}, IT_{ag}), ag \in AG^*, \quad \left| \bigcup_{ag \in AG^*} IT_{ag} \right| \geq 2, \quad (29)$$

$$ag = ag \vee himas, \quad (30)$$

де AG^* – множина агентів ІСППР, включаючи агента, що приймає рішення ag^{dm} ; n – число агентів-експертів у ІСППР; env – середовище, в якому знаходиться ІСППР; INT^* – множина елементів для структурування взаємодій між агентами; ORG – множина базових організаційних структур ІСППР, що відповідають конкретним функціям (ролям) агентів і встановилися відносинам між ними, що включає підмножини; ORG_{coop} , ORG_{neut} , ORG_{comp} – множина архітектур з співпрацюючими, нейтральними та конкуруючими агентами, відповідно; $prot$ – протокол взаємодії агентів, що визначає формат повідомлень, якими обмінюються агенти; $lang$ – мова обміну повідомленнями, що визначає лексику і синтаксис повідомлень, що передаються; ont – модель предметної області, на основі якої визначається семантика повідомлень, що передаються агентами; rcl

– класифікатор відносин між агентами ІСППР; act_{hmas} – функція ІСППР в цілому; act_{ag} – функція агента $ag \in AG^*$; act_{ia} – функція «аналіз взаємодій»; act_{ac} – функція «вибір архітектури»; MET_{ag} – множина методів вирішення завдання, які реалізує агент $ag \in AG^*$; IT_{ag} – множина інтелектуальних технологій, ІСППР [183], у межах яких реалізовано множина методів MET_{ag} .

Як було зазначено, з множини агентів ІСППР (24) виділяється один агент, який приймає рішення. Цей агент, крім іншого, організує взаємодії агентів у ІСППР, використовуючи дві функції (25):

- 1) act_{ia} – функцію «аналіз взаємодій»;
- 2) act_{ac} – функцію «вибір архітектури».

Функція аналіз взаємодії act_{ia} застосовується для моніторингу взаємодії агентів та ідентифікації архітектури ІСППР на основі аналізу узгодженості цілей агентів. За його результатами ОПР за допомогою функції «вибір архітектури» act_{ac} може встановити необхідність заміни типу відносин агентів та коригування їх цілей. Для цього ОПР повинен мати базу знань, що використовується функцією «вибір архітектури» act_{ac} і відображає залежність ефективності роботи ІСППР від узгодженості цілей агентів.

Зміна архітектури означає, що з деякого моменту ІСППР змінює алгоритм функціонування, виявляючи властивість самоорганізації і переходить на базову архітектуру іншого типу. Алгоритми цих функцій будуть детально розглянуті нижче. Багато INT^* доповнено ще одним елементом структурування взаємодій між агентами – класифікатором відносин rcl . Він аналізує нечіткі цілі pr^{gsu} агентів та оцінює ступінь їх узгодженості за допомогою міри $s(A,B)$ (18). Далі, використовуючи відображення (22), будує матрицю **RCL**, відносячи взаємини між агентами до одного з типів: конкуренція, нейтралітет та співробітництво. За цією матрицею визначається узгодженість агентів ІСППР та клас її базової архітектури. Множина базових архітектур ІСППР ORG ділиться за ступенем узгодженості на три попарно непересічні множини (27):

1) архітектура ІСППР із співпрацюючими агентами, яка складається лише з співпрацюючих та нейтральних агентів, і повністю відсутні відносини конкуренції ($ORG_{coop} \subseteq ORG$);

2) архітектура ІСППР з нейтральними агентами, де присутні лише нейтральні відносини ($ORG_{neut} \subseteq ORG$);

3) архітектура ІСППР з конкуруючими агентами, в якій є хоча б одна пара агентів із ставленням конкуренції.

У таких архітектурах ІСППР можуть бути також нейтральні та співпрацюючі агенти; за наявності співпраці агентів вони розглядаються як єдиний «суперагент», і тоді всі агенти стають тільки конкуруючими або нейтральними ($ORG_{comp} \subseteq ORG$).

У процесі роботи ІСППР може переходити від однієї базової архітектури до іншої, з метою підвищення якості рішень за рахунок встановлення між агентами відносин, релевантних умов вирішуваного завдання. Критерії якості рішення задаються розробником ІСППР на етапі її створення або її користувачем у процесі функціонування. Це, проте, значить поява зовнішнього джерела управління. Архітектура ІСППР із самоорганізацією може і повинна змінюватися, навіть якщо критерій якості залишається незмінним.

Відповідно (29) кожна функція агента представляється двокомпонентним кортежем (MET_{ag}, IT_{ag}). Як наслідок (29), у ІСППР має використовуватися не менше двох інтелектуальних технологій, щоб вона могла вважатися ІСППР та бути релевантною складним у моделюванні завдань. Крім того, (28) виділяються дві функції ОПР для управління взаємодією агентів ІСППР: act_{ia} – функція «аналіз взаємодій» і act_{ac} – функція «вибір архітектури». Розглянемо алгоритми цих функцій. Вихідна інформація функції «аналіз взаємодій» – мети агентів pr^{gsu} , де результат – тип базової архітектури ІСППР org за рівнем узгодженості взаємодії агентів як рядка тексту, тобто віднесення поточної архітектури ІСППР $org_i, i=1, \dots, N$, до одного з множин ORG_{coop} , ORG_{neut} або ORG_{comp} , а N – число базових архітектур ІСППР (кількість елементів множини ORG в (27)). В

результаті виконання функції «аналіз взаємодій» ідентифікується базова архітектура ІСППР, що дозволяє ОПР, за допомогою функції «вибір архітектури» f_{ac} визначити необхідність (або відсутність такої) її модифікації для покращення якості рішень. Таким чином, змінюється архітектура ІСППР на одну з множини ORG (29) і відбувається самоорганізація системи.

Після визначення типу архітектури ІСППР агент, який приймає рішення, за допомогою функції «вибір архітектури» act_{ac} може встановити необхідність заміни одного типу відносин агентів на інший та коригування їх цілей. Однак, очевидно, що для ухвалення рішення про заміну однієї архітектури ІСППР на іншу відомостей лише про поточний тип архітектури ІСППР недостатньо. Для такого рішення ОПР необхідна база знань у тому, який із типів архітектур ІСППР ефективніше у тих чи інших умовах, у тому чи іншого класу завдань.

В результаті аналізу методів побудови баз знань для реалізації функції «вибір архітектури» act_{ac} було обрано системи нечіткого висновку.

Вихідні дані функції «вибір архітектури» act_{ac} – умови завдання, що розв'язується. Результат – значення ступеня впевненості [194] у виборі кожної архітектури ІСППР, а також коригування бази знань ОПР. Модель нечіткого виведення АПР mod_{ac} можна сформулювати так:

$$mod_{ac} = \langle RUL, X, Y, F^{\mu}, F^{\gamma}, F^{sl}, I^{fsl} \rangle, \quad (31)$$

де RUL – база знань, як множина символічних правил rul_k , $k = 1, \dots, N_{RUL}$, що використовують як посилки та висновки нечіткі множини A_i^k , B_j^k , відповідно, причому такі, що $A_i^k \subseteq X_i$, $B_j^k \subseteq Y_j$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$; X , Y – множина вхідних та вихідних лінгвістичних змінних відповідно; $F^{\mu} = F_X^{\mu} \cup F_Y^{\mu}$ – множина функцій належності нечітких змінних вхідних та вихідних лінгвістичних змінних відповідно; F^{γ} – множина функцій дефазифікації; F^{sl} – множина функцій коригування параметрів функцій належності нечітких змінних із множини F^{μ} .

Інтерпретатор I^{fsl} визначається таким чином:

$$I^{fsl} = \{I^{fsl1}, I^{fsl2}, I^{fsl3}, I^{fsl4}, I^{fsl5}, I^{fsl6}, I^{fsl7}, I^{fsl8}, I^{fsl9}\},$$

де $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$ – процеси стандартної системи нечіткого виведення Мамдані [182]: I^{fsl1} – фазифікація, I^{fsl2} – агрегування, I^{fsl3} – активація, I^{fsl4} – акумуляція, I^{fsl5} – дефазифікації; I^{fsl6} – вибір архітектури; I^{fsl7} – рішення ІСППР; I^{fsl8} – Визначення помилки; I^{fsl9} – навчання. Процеси $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$ виконуються ітераційно:

$$I^{fsl1} \rightarrow I^{fsl2} \rightarrow I^{fsl3} \rightarrow I^{fsl4} \rightarrow I^{fsl5} \rightarrow I^{fsl6} \rightarrow I^{fsl7} \rightarrow I^{fsl8} \rightarrow I^{fsl9}. \quad (32)$$

Модель (31) – система нечіткого виведення Мамдані із самонавчанням. Процеси самонавчання $I^{fsl6}, \dots, I^{fsl9}$ дозволяють системі модифікувати знання предметної області, щоб, по-перше, скоригувати можливі помилки розробника щодо їх визначенні, а, по-друге, автоматично підтримувати базу знань у актуальному стані з часом і зміною умов завдання.

Крім того, завдяки застосуванню нечіткого виведення Мамдані зберігається прозорість бази знань для інтерпретації людиною на відміну від систем нечіткого виводу Такагі-Сугено або нейронечітких гібридів: ANFIS, GARIC, вентес змінні. Це узгоджується з підходом [178, 179], однак, у запропонованій системі навчання йде за алгоритмом зворотного розповсюдження помилки. Розглянемо зміст процесів $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$ (32).

Нечіткий висновок $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$ виконується з використанням системи Мамдані [178]. На її вхід подаються відомості (розмірність) про завдання, що вирішується у вигляді детермінованої змінної. Результат роботи системи – значення ступенів впевненості у виборі архітектури ІСППР у вигляді детермінованих змінних. У правилах нечіткої бази знань вхідна лінгвістична змінна – «розмірність ІСППР» sz , а вихідні – «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами» pcp , «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами» pnt і «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами» pcn .

Визначимо лінгвістичну змінну sz «розмірність ІСППР»:

$$sz = \langle \rho^{sz}, T^{sz}, U^{sz}, G^{sz}, M^{sz} \rangle,$$

де β^{sz} = «розмірність ІСППР» – найменування лінгвістичної змінної; $T^{sz} = \{\text{«мала»}; \text{«середня»}; \text{«велика»}\}$ – множина її значень (терм-множина), найменувань нечіткої змінної; $U^{sz} = [3; 100]$ – область визначення (універсум) нечітких змінних, що входять у визначення лінгвістичної змінної; $G^{sz} = \emptyset$ – синтаксична процедура, що описує процес утворення з елементів множини T^{sz} нових термів; $M^{sz} = \{\mu_{\text{мала}}^{sz}(u^{sz}), \mu_{\text{середня}}^{sz}(u^{sz}), \mu_{\text{велика}}^{sz}(u^{sz})\}$ – семантична процедура, що ставить у відповідність кожному терму множини T^{sz} , а також кожному новому терму, утвореному процедурою G^{sz} , осмислений зміст за допомогою формування відповідної нечіткої множини.

Функції належності нечітких множин з M^{sz} описуються виразами:

$$\mu_{\text{мала}}^{sz}(u^{sz}) = \left(1 + e^{-a_{sz1}(u_{sz} - c_{sz1})}\right)^{-1}, \text{ де } a_{sz1} = -0,375, c_{sz1} = 15,$$

$$\mu_{\text{середня}}^{sz}(u^{sz}) = e^{-\frac{(u_{sz} - c_{sz2})^2}{2\sigma_{sz2}^2}}, \text{ де } \sigma_{sz2} = 10, c_{sz2} = 30,$$

$$\mu_{\text{велика}}^{sz}(u^{sz}) = \left(1 + e^{-a_{sz3}(u_{sz} - c_{sz3})}\right)^{-1}, \text{ де } a_{sz3} = 0,375, c_{sz3} = 45,$$

де значення параметрів $a_{sz1}, c_{sz1}, \sigma_{sz2}, c_{sz2}, a_{sz3}, c_{sz3}$ задані приблизно і мають бути скориговані в ході самонавчання системи нечіткого виведення.

Визначимо лінгвістичні змінні pcp, pnt, pcn виразами:

$$pcp = \langle \beta^{pcp}, T^{pcp}, U^{pcp}, G^{pcp}, M^{pcp} \rangle,$$

$$pnt = \langle \beta^{pnt}, T^{pnt}, U^{pnt}, G^{pnt}, M^{pnt} \rangle,$$

$$pcn = \langle \beta^{pcn}, T^{pcn}, U^{pcn}, G^{pcn}, M^{pcn} \rangle,$$

де найменування лінгвістичних змінних β^{pcp} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами org_{coop} »; β^{pnt} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами org_{neut} »; β^{pcn} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами org_{conc} »; $T^{pcp} = T^{pnt} = T^{pcn} = \{\text{«низька»}; \text{«середня»}; \text{«висока»}\}$ – множини їх значень (терм-множина), кожне з яких – найменування нечіткої змінної; $U^{pcp} = U^{pnt} = U^{pcn} = [0; 1]$ – області визначення

(універсуми) нечітких змінних, що входять до визначення лінгвістичних змінних; $G^{pcp} = G^{pnt} = G^{pcn} = \emptyset$ – синтаксичні процедури, що описують процеси утворення з елементів множин $T^{pcp}, T^{pnt}, T^{pcn}$ нових термів; $M^{pcp} = \{ \mu_{мала}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{середня}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{велика}^{pcp}(u^{pcp}) \}$, $M^{pnt} = \{ \mu_{мала}^{pnt}(u^{pnt}), \mu_{середня}^{pnt}(u^{pnt}), \mu_{велика}^{pnt}(u^{pnt}) \}$, $M^{pcn} = \{ \mu_{мала}^{pcn}(u^{pcn}), \mu_{середня}^{pcn}(u^{pcn}), \mu_{велика}^{pcn}(u^{pcn}) \}$ – семантичні процедури, що ставлять у відповідність кожному терму множини $T^{pcp}, T^{pnt}, T^{pcn}$, а також кожному новому терму, утвореному процедурою $G^{pcp}, G^{pnt}, G^{pcn}$, осмислений зміст за допомогою формування відповідної нечіткої множини. Розглянуті лінгвістичні змінні зв'язуються множиною RUL правил системи нечіткого виведення Мамдані [178]. Правила мають вигляд: $ant_i \xrightarrow{rul_i} cns_i$, де ant_i – антецедент i -го правила rul_i , cns_i – консеквент i -го правила rul_i , $i = 1, \dots, N_{rul}$, де N_{rul} – число правил нечіткої бази знань агента, який приймає рішення.

Нечіткий висновок Мамдані із самонавчанням складається з етапів:

1) *фазифікація* I^{fsl1} для встановлення відповідності між значеннями $u^{sz} \in U^{sz}$ і значенням функції належності відповідного терма лінгвістичної змінної sz : для кожного терма $t^{sz} \in T^{sz}$ обчислюється значення $y_{tsz}^{fuz} = \mu_{tsz}^{sz}(u^{sz})$;

2) *агрегування* I^{fsl2} вироджується, оскільки використовується лише одна вхідна нечітка змінна. Ступінь істинності y_i^{agr} посилки ant_i правила rul_i відповідає значенню ступеня істинності y_{tsz}^{fuz} терма t_{sz} вхідний змінної з ant_i ;

3) *активація* I^{fsl3} – для кожного терма $t_{pcp} \in T_{pcp}$, $t_{pnt} \in T_{pnt}$, $t_{pcn} \in T_{pcn}$ вихідних лінгвістичних змінних pcp , pnt , pcn , що входить у висновок при ступеню при обчисленні cns_i правила rul_i , визначається функція методу min-активації:

$$\mu_{tpcp\ i}^{pcp}(u^{pcp}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpcp}^{pcp}(u^{pcp})) \quad , \quad \mu_{tpnt\ i}^{pnt}(u^{pnt}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpnt}^{pnt}(u^{pnt})) \quad ,$$

$$\mu_{tpcn\ i}^{pcn}(u^{pcn}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpcn}^{pcn}(u^{pcn}));$$

4) *аккумуляція* I^{fsl4} – для кожної вихідної лінгвістичної змінної визначаються підсумкові функції належності μ^{pcp} , μ^{pnt} , μ^{pcn} об'єднанням функцій належності термів $\mu_{tpcp\ i}^{pcp}$, $\mu_{tpnt\ i}^{pnt}$, $\mu_{tpcn\ i}^{pcn}$, активованих на попередньому кроці. Вид функцій

належності визначається за правилами: $\mu^{pcp}(u^{pcp}) = \max_i(\mu_{ipcp}^{pcp}(u^{pcp}))$,
 $\mu^{pnt}(u^{pnt}) = \max_i(\mu_{ipnt}^{pnt}(u^{pnt}))$, $\mu^{pcn}(u^{pcn}) = \max_i(\mu_{ipcn}^{pcn}(u^{pcn}))$;

5) дефазифікація I^{fsl5} . Результати дефазифікації змінних pcp , pnt , pcn – речові числа u^{pcp} , u^{pnt} , u^{pcn} відповідно, які виходять з використанням центроїдного методу дефазифікації:

$$u^{pcp} = \frac{\int_{U^{pcp}} u^{pcp} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}{\int_{U^{pcp}} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}, \quad u^{pnt} = \frac{\int_{U^{pnt}} u^{pnt} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}}{\int_{U^{pnt}} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}},$$

$$u^{pcn} = \frac{\int_{U^{pcn}} u^{pcn} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}}{\int_{U^{pcn}} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}}; \text{ or } u_{pcp} = \frac{\int_{U_{pcp}} u_{pcp} \mu_{pcp}(u_{pcp}) du_{pcp}}{\int_{U_{pcp}} \mu_{pcp}(u_{pcp}) du_{pcp}};$$

в результаті обчислюються чіткі значення вихідних лінгвістичних змінних: «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами» pcp , «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами» pnt і «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами» pcn – тобто для кожної архітектури ІСППР визначається значення впевненості у її виборі.

6) вибір архітектури I^{fsl6} . Ступені впевненості вибору архітектур з попереднього кроку нормалізуються, щоб їх сума дорівнювала одиниці: $u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn} = 1$ за правилами: $u^{pcp'} = u^{pcp} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$,
 $u^{pnt'} = u^{pnt} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$, $u^{pcn'} = u^{pcn} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$, та архітектура ІСППР org вибирається випадковим чином серед org_{coop} , org_{neut} , org_{conc} відповідно до нормалізованих значень ступенями $u^{pcp'}$, $u^{pnt'}$, $u^{pcn'}$, відповідно;

7) розв'язання складного завдання I^{fsl7} . Виконується моделювання роботи ІСППР методом пулу мозкового запису [190] з використанням обраної архітектури ІСППР; при цьому ОПР «спостерігає» за ходом вирішення складного завдання і фіксує наявність $syn=1$ або відсутність $syn=0$ прояви синергетичного ефекту, тобто чи отримала ІСППР більш якісне рішення, порівняно з рішеннями окремих експертів;

8) визначення абсолютної помилки нечіткого виведення I^{fsl8} . Виконується відповідно до виразу:

$$er = 0,5 \cdot \left((d^{pcp} - u^{pcp})^2 + (d^{pnt} - u^{pnt})^2 + (d^{pcn} - u^{pcn})^2 \right), \quad (33)$$

де er – абсолютна помилка нечіткого висновку;

d^{pcp} , d^{pnt} , d^{pcn} – бажані ОПР значення ступенів впевненості вибору архітектур u^{pcp} , u^{pnt} , u^{pcn} , тобто значення при яких ймовірність вибору архітектури, що викликає синергетичний ефект за даних умов завдання, була б вищою.

9) навчання I^{fsl9} системи нечіткого виведення. Тут коригуються параметри функцій приналежності вхідний sz та вихідних pcp , pnt , pcn лінгвістичних змінних; під час навчання використовується метод градієнтного узвозу зі змінним коефіцієнтом навчання [195]:

$$par(t+1) = par(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial par}, \quad (34)$$

де par – будь-який з параметрів функцій належності (a_{sz1} , c_{sz1} , σ_{sz2} , c_{sz2} , a_{sz3} , c_{sz3} , a_{pcp1} , c_{pcp1} , σ_{pcp2} , c_{pcp2} , a_{pcp3} , c_{pcp3} , a_{pnt1} , c_{pnt1} , σ_{pnt2} , c_{pnt2} , a_{pnt3} , c_{pnt3} , a_{pcn1} , c_{pcn1} , σ_{pcn2} , c_{pcn2} , a_{pcn3} , c_{pcn3}), що входять до визначення вхідних або вихідних лінгвістичних змінних; t – порядковий номер завдання, що вирішується (ітерація навчання системи нечіткого висновку); η – крок корекції, $0 < \eta < 1$, $\eta(t) = t^{-1}$; для параметрів par_{pcp} , par_{pnt} , par_{pcn} функції належності вихідних змінних pcp , pnt , pcn вираз (34) записується як:

$$par_{pcp}(t+1) = par_{pcp}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcp}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}} = par_{pcp}(t) + \eta (d^{pcp} - u^{pcp}) \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}},$$

$$par_{pnt}(t+1) = par_{pnt}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pnt}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}} = par_{pnt}(t) + \eta (d^{pnt} - u^{pnt}) \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}},$$

$$par_{pcn}(t+1) = par_{pcn}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcn}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}} = par_{pcn}(t) + \eta (d^{pcn} - u^{pcn}) \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}},$$

для параметрів par_{sz} функцій належності вхідної змінної sz вираз (34)

листується:

$$par_{sz}(t+1) = par_{sz}(t) + \eta \left((d^{pcp} - u^{pcp}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + \right. \\ \left. + (d^{pnt} - u^{pnt}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + (d^{pcn} - u^{pcn}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} \right); \quad (35)$$

після підстроювання параметрів функцій належності вхідний лінгвістичної змінної етап навчання та робота системи нечіткого виведення закінчується.

При вирішенні нового обчислювального завдання система нечіткого виведення починає роботу з першого етапу з новими значеннями всіх параметрів функцій власності.

Висновки

1. У дослідженні запропоновано математичні моделі управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Новизна запропонованих математичних моделей полягає у:

у комплексному описі процесі функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Зазначене дозволяє підвищити точність моделювання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для послідовних управлінських рішень;

описі як статичних так і динамічних процесів, які відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень;

здатності провести моделювання як окремо взятого процесу, що відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, так і комплексно проводити моделювання тих процесів, що в них відбуваються;

у встановленні концептуальних залежностей процесу функціонування інтелектуальних системи підтримки прийняття рішень. Це дозволяє описати взаємодію окремих моделей на всіх етапах вирішення розрахункових завдань;

описі процесів координації у гібридних інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, чим досягається підвищення достовірності прийняття управлінських рішень;

моделюванні процесів вирішення складних розрахункових завдань в

інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, за рахунок концептуального опису зазначеного процесу;

узгодженні процесів проведення розрахунків в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, чим досягається зменшення кількості обчислювальних ресурсів систем;

2. Запропоновані математичні моделі доцільно використовувати для вирішення завдання управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що характеризуються високим ступенем складності.

8.3 Математичні моделі управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) є невід’ємною складовою всіх сфер суспільної діяльності людства та застосовуються для вирішення широкого кола завдань від розважальних до суто специфічних [224-226].

Основними завданнями, які вирішуються ІСППР є [226-228]:

- вирішення різноманітних обчислювальних завдань в інтересах широкого кола споживачів незалежно від сфери їх застосування;
- зберігання результатів обчислень і також проміжних результатів для потреб користувачів;
- підтримка прийняття рішень, особами які їх приймають;
- забезпечують передумови до інтелектуального прийняття рішень.

Тенденції розвитку сучасних ІСППР спрямовані на вирішення наступних завдань [227-231]:

- підвищення оперативності обробки різнотипних даних та їх достовірності;
- підвищення точності моделювання процесу їх функціонування;
- підтримання балансу між оперативністю та достовірністю процесом вирішення розрахункових завдань та ін.

Разом з тим, наявні наукові підходи до синтезу та функціонування ІСППР мають недостатню точність та збіжність. Зазначене пов’язане з наступними причинами [224-232]:

- суттєва роль людського фактору в процесі первинного налаштування ІСППР;
- велика кількість неоднорідних джерел інформації, які підлягають аналізу та подальшій обробці при функціонуванні ІСППР;
- ІСППР функціонують в умовах невизначеності, що спричиняє затримку на їх обробку;

– наявність великої кількості дестабілізуючих факторів, що впливають на функціонування ІСППР та ін.

Це й спонукає до впровадження різноманітних стратегій для покращення ефективності функціонування ІСППР при вирішенні розрахункових завдань. Один з таких варіантів є удосконалення існуючих (розробка нових) математичних моделей функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Проведення аналізу праць [232-269] показав що спільними недоліками вищезазначених досліджень є:

– моделювання кожного підходу здійснюється лише на окремому рівні функціонування ІСППР;

– при комплексному підході розглядаються як правило дві складові функціонування ІСППР. Зазначене не дозволяє оцінити в повній мірі вплив управляючих рішень на подальше їх функціонування;

– перелічені вище моделі, що є складовими частинами наведених вище підходів, забезпечують слабку інтеграцію одна в одну, що не дозволяє їх об'єднати між собою для спільного функціонування;

– наведені вище моделі використовують різний математичний апарат, що не вимагає відповідних математичних перетворень, які в свою чергу підвищують обчислювальну складність та знижують точність моделювання та ін.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Проблема, яка вирішується в дослідженні, є підвищення точності моделювання процесу функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Предметом дослідження є процес функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за допомогою сукупності математичних моделей їх функціонування. Гіпотезою дослідження є можливість підвищення оперативності та точності функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за рахунок розроблення сукупності моделей їх функціонування.

У табл. 1 наведено склад гетерогенного модельного поля та методи представлення моделей.

Таблиця 1. Моделі, що входять у гетерогенне модельне поле.

Модель	Клас моделі та її характеристики	Реалізація
Штучні нейронні мережі	Штучна нейронна мережа (ШНМ) (пошук прихованих залежностей у статистичних даних та прогнозування виконання плану) – функціональний елемент res_1^{e2} . ШНМ із зі структурою, що еволюціонує. Передатна функція нейрона: сигмоїд. Кількість входів у ході експериментів варіювалася від 3 до 30, а виходів від 1 до 10. Кількість прихованих нейронів від 1 до 8. Передатна функція нейрона: сигмоїд. Навчання ШНМ – метод в роботі [225]. Середня помилка навчання – 9%. Навчальна послідовність – 60 тестових завдань.	Авторський алгоритм написаний мовою програмування Microsoft Visual Studio 2022. Загальний обсяг коду 250 рядків
Удосконалений ГА	Удосконалений ГА [242] для вирішення завдання оптимізації – функціональний елемент res_2^{e5} . Популяція з 100 хромосом. Еволюція: кросовер та мутації. Селекція: комбінація панміксії та ранжирування. Пристосованість (у %) – час пристосованість менше 50%, половина популяції знищується та генерується заново. Якщо десять поколінь пристосованість не змінюється, але більше 92%, тоді найкраща особина – рішення	Авторський алгоритм написаний мовою програмування Microsoft Visual Studio 2022. Реалізовано алгоритм візуалізації. Загальний обсяг коду 300 рядків
Нейро-нечіткі експертні системи	Продукційна модель знань для пошуку вирішального підграфа на графі І/АБО. Міркування у прямому напрямку. Розміри баз знань функціональних елементів – 6 – 48 продукцій, а елементу ІСППР – 15 продукцій. Основи фактів – до 15 фактів. Знання у експертів та ОПР витягувалися протокольним аналізом	Авторський алгоритм написаний мовою програмування Microsoft Visual Studio 2022. Використовується прямий висновок

8.3.1 Концептуальна модель інтелектуальних системи підтримки прийняття рішень

Концептуальна модель, це – модель предметної галузі перелік понять, властивостей та характеристик для опису цієї області, а також законів процесів, що у ній відбуваються [237, 238]. Концептуальна модель, з одного боку, обмежує предметну галузь як сукупність об'єктів, зв'язків і відносин між ними, процедур перетворення цих об'єктів під час вирішення завдань. З другого – вносить у моделювання суб'єктивні уявлення розробника в вигляді його знань і досвіду – концепцій.

Концептуальні моделі сутностей, наприклад завдань, ІСППР, будуватимемо на основі схеми концептуальних моделей [224], що містить 11 категорій концептів C , з яких використовуються наступні п'ять.

Визначення 1. Ресурс – поняття, що означає річ, що є у суб'єкта управління на вирішення завдань. Множину ресурсів позначимо $RES = C^{res} \subseteq C$.

Визначення 2. Властивість – все те, що не є межами цієї речі. Це те, що, характеризуючи речі, не утворює нових речей. Множину властивостей позначимо $PR = C^{pr} \subseteq C$.

Визначення 3. Дія – поняття, що означає відносини на ресурсах, як наслідок діяльності, вчинків та поведінки. Множину дій позначимо $ACT = C^{act} \subseteq C$.

Колективні ефекти в ІСППР наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Колективні ефекти в ІСППР

Ефект	Короткий опис	Позитивний вплив	Негативний вплив
Адаптація	Пристосування до зовнішнього середовища або його зміна для ефективної роботи ІСППР	Розширює коло завдань, які вирішуються ІСППР	Ускладнює аналіз роботи ІСППР
Бумеранг	При недовірі до інформації виникає зворотна думка, що міститься в ній	Недостовірна інформація не сприймається, або вважається завідомо хибною	Достовірна інформація від недостовірного джерела може бути розцінена як хибна

Продовження таблиці 2

Хвиля	Розповсюдження ідей в ІСППР, що відповідають інтересам членів	Колективне доопрацювання ідей	Тривала робота експертів над безперспективними ідеями
Гомеостаз	Підтримання важливих для системи параметрів вдаліні від граничних значень	Забезпечує тривалу життєздатність ІСППР	Іноді ІСППР у пограничних станах генерує більш якісні рішення, ніж в нормальному стані
Груповий егоїзм	Цілі колективу важливіші за цілі її членів та цілі суспільства	Відсутній	Ефективність діяльності колективу може зашкодити суспільству
Конформізм	Спільна думка – істина, думка окремої людини – ніщо	Відсутній	Перешкоджає виникненню нових підходів до вирішення проблеми
Мода (наслідування)	Добровільне прийняття встановлених в колективі точок зору на проблеми	Основа самонавчання членів колективу; сприяє адаптації людей один до одного	Знижує ймовірність появи оригінальних поглядів та підходів до рішення проблеми
Рінгельманна	Зі зростанням чисельності групи знижується індивідуальний внесок у спільну роботу	Знижується навантаження на окремих учасників ІСППР	Знижується мотивація експертів до ефективної спільної роботи
Самонавчання	Робота учасників СППР по підвищенню свого рівня знань з опорою на досвід	Підтримання знань учасників СППР в актуальному стані	Отримані знання можуть бути несистематизованими, невербалізованими, помилковими
Самоорганізація	Відношення між експертами динамічні та змінюються в процесі роботи	Адаптація до зовнішнього середовища; кожен раз розробляється новий метод, релевантне завдання. Поява оригінальних підходів до рішення задачі та синергії	Ускладнює аналіз роботи та зовнішнє управління колективом

Продовження таблиці 2

Синергія	Отримання загального результату, який не можуть отримати експерти індивідуально	Отримання емерджентного якісно кращого результату	Можливий ефект від'ємної синергії (дисергії)
Соціальна фасилітація	Посилення домінантних реакцій в присутності інших людей	Прискорює рішення простих задач, для яких індивід знає відповідь	У складних задачах підвищує ймовірність помилкової відповіді

Визначення 4. *Значення – поняття чи число, що показує кількість одиниць міри. Множину значень позначимо $VAL = C^{val} \subseteq C$.*

Визначення 5. *Стан – поняття, що означає прояв процесів, що відбуваються у ресурсі в певний час. Множину станів позначимо $ST = C^{st} \subseteq C$.*

Між концептами цих категорій встановлено множину відносин R .

Визначення 6. *Відношення – те, що утворює річ із даних елементів (властивості чи інших речей). Відношення – є те, що, будучи встановленим між речами, утворює нові речі.*

Факт встановлення між концептами відношення позначимо $r^{\alpha\beta}(c_1^\alpha, c^\beta)$.

Відрізнятимемо відносини між різними категоріями концептів: $R^{\alpha\beta} \subseteq R$ – множина відносин між концептами з множини C^α і множини C^β , де $\alpha, \beta \in \{ "res", "pr", "act", "val" \}$.

Таким чином, фрагмент схеми концептуальних моделей sch_1 для структурування знань про предметну область завдання, що моделюється, може бути представлена в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 sch_1 = & R^{res\ res}(RES, RES) \circ R^{pr\ pr}(PR, PR) \circ R^{act\ act}(ACT, ACT) \circ \\
 & \circ R^{val\ val}(VAL, VAL) \circ R^{st\ st}(ST, ST) \circ R^{res\ pr}(RES, PR) \circ \\
 & \circ R^{pr\ res}(PR, RES) \circ R^{res\ act}(RES, ACT) \circ R^{act\ res}(ACT, RES) \circ, \\
 & \circ R^{res\ st}(RES, ST) \circ R^{st\ res}(ST, RES) \circ R^{pr\ act}(PR, ACT) \circ \\
 & \circ R^{act\ pr}(ACT, PR) \circ R^{pr\ val}(PR, VAL) \circ R^{val\ pr}(VAL, PR) \circ
 \end{aligned} \tag{1}$$

де знак $\circ$ – конкатенація.

Мікрорівнева концептуальна модель ІСППР може бути записана у такому вигляді:

$$dss = R^{res\ res} (prt^{dm}, env) \circ R^{res\ res} (PRT, PRT), \quad (2)$$

де prt^{dm} – модель знань особи, що приймає рішення (ОПР); $env \in RES$ – зовнішнє середовище; $PRT = \{prt_1, \dots, prt_n, prt^{dm}\}$, $PRT \subseteq RES$ – множина учасників ІСППР, що включає ОПР prt^{dm} ; $R^{res\ res}$ – множина відносин «ресурс – ресурс» між учасниками ІСППР, а також ОПР та зовнішнім середовищем.

У [236] зазначається, що кожен учасник $prt \in PRT$ ІСППР має власну мету pr^{gsu} , яка може збігатися чи суперечити цілям інших учасників. Взаємодіючи під час обговорення, експерти обмінюються даними pr^{dat} , знаннями pr^{knw} , поясненнями pr^{exp} і частковими рішеннями pr^{dec} спільного завдання, тобто виконують множину дій щодо передачі ACT^{itr} та отримання ACT^{iac} інформації, множину професійних функцій ACT^{prt} , чинять тиск на інших учасників ІСППР та членів навколишнього середовища, виконуючи дії ACT^{conf} .

Кожен експерт має власну модель res^{mod} зовнішнього середовища, в тому числі і об'єкта управління, а також власний набір методів RES^{met} вирішення завдань. Зважаючи на неоднорідний характер складних завдань, для їх успішного вирішення до складу ІСППР повинні входити експерти різних спеціальностей, з різними наборами методів розв'язання завдань, тобто $RES_i^{met} \neq RES_j^{met}$, де $i, j = 1, \dots, n$, $i \neq j$ – номер учасника у множині PRT .

Концептуальна модель експерта ІСППР записується так:

$$\begin{aligned} prt_i = & r_1^{res\ pr} (prt, pr^{gsu}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{dat}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{knw}) \circ \\ & \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{exp}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{prt}) \circ \\ & \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{itr}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{dat}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{knw}) \circ, \\ & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{exp}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{iac}) \circ \\ & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{dat}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{knw}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{exp}) \circ \\ & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{conf}) \circ r_3^{res\ res} (prt, res^{mod}) \circ \\ & \circ r_3^{res\ res} (prt, RES^{met}), \end{aligned} \quad (3)$$

де $r_1^{res\ pr}$ – відношення «мати властивість», що встановлюють відповідність між учасником ІСППР та його властивостями; $r_2^{res\ act}$ – відношення «виконувати», що пов'язує суб'єкт та дію, яку він виконує; $r_2^{act\ pr}$ – відношення «мати властивість», що зв'язує дію з його властивістю; $r_3^{res\ res}$ – відношення «включає», що пов'язує ціле та його частини.

Багато відносин $R^{res\ res}$ в (2) складається з підмножин відносин різних класів: співпраці $R_{coop}^{res\ res}$, конкуренції $R_{comp}^{res\ res}$, нейтралітету $R_{neut}^{res\ res}$, довіри $R_{trus}^{res\ res}$, тиску і конформізму $R_{conf}^{res\ res}$, координації $R_{coor}^{res\ res}$, спору $R_{disp}^{res\ res}$ та інші $R_{oth}^{res\ res}$. Підмножина відносин $R_{oth}^{res\ res}$ введена в модель, щоб зробити її повною та розширюваною [224]. Таким чином, множина $R^{res\ res}$ може бути представлено виразом:

$$R^{res\ res} = R_{coop}^{res\ res} \cup R_{comp}^{res\ res} \cup R_{neut}^{res\ res} \cup R_{trus}^{res\ res} \cup R_{conf}^{res\ res} \cup R_{coor}^{res\ res} \cup R_{disp}^{res\ res} \cup R_{oth}^{res\ res}. \quad (4)$$

Склад відносин із множини $R^{res\ res}$ та її підмножин заздалегідь невідомий і визначається під час роботи ІСППР згідно з правилами взаємодії $INT \subseteq RES$ внаслідок її самоорганізації. За рахунок динамічності зв'язків між експертами та самоорганізації ІСППР здатна виробляти новий метод рішення, релевантний умовам, що склалися, і концептуальна модель ІСППР як самоорганізованої сутності, методу вирішення складного завдання – може бути представлена виразом:

$$RES_{dss}^{met} = R^{res\ res} (RES_1^{met}, RES_2^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res} (RES_1^{met}, RES_n^{met}) \circ R^{res\ res} (RES_2^{met}, RES_1^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res} (RES_2^{met}, RES_n^{met}) \circ R^{res\ res} (RES_n^{met}, RES_1^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res} (RES_n^{met}, RES_{n-1}^{met}), \quad (5)$$

де метод RES_{dss}^{met} , що виробляється ІСППР при вирішенні чергового завдання, являє собою взаємопов'язану сукупність наборів методів RES_i^{met} , $i=1, \dots, n$, що використовуються експертами при вирішенні їх часткових завдань. При вирішенні чергового завдання інтенсивність і спрямованість відносин $R^{res\ res}$ між експертами ІСППР і, відповідно, між використовуваними ними методами змінюються, приводячи до вироблення згідно (5) нового методу, релевантного

складному завданню, тобто з'являється синергетичний ефект. Зовнішній прояв цього ефекту – отримання ІСППР рішень якісніше порівняно з думками окремих експертів.

Враховуючи вищесказане, макрорівнева модель ІСППР може бути представлена в такому вигляді:

$$dss = (PRT, env, INT, DSS, EFF), \quad (6)$$

де PRT – множина учасників ІСППР, що описуються концептуальною моделлю (3); env – середовище, в якому знаходиться ІСППР; INT – множина елементів структурування взаємодій між експертами; DSS – множина моделей (5) ІСППР на мікрорівні, що відповідають конкретним функціям експертів у ІСППР і відносинам, що встановилися між ними; EFF – множина концептуальних моделей макрорівневих (колективних) ефектів в ІСППР (табл. 1): адаптація ad , бумеранг bo , хвиля wa , гомеостаз ho , груповий егоїзм ge , групсинк gt , мода fa , ефект Рингельмана re , самонавчання sl , самоорганізація so , синергія se , соціальна фасилітація sf . Розглянемо докладніше моделі цих макрорівневих ефектів.

Розрізняються два види адаптації: пасивна та активна. У першому випадку система, що адаптується, змінюється так, щоб виконувати свої функції в даному середовищі найкращим чином. Концептуальна модель такої адаптації є виразом:

$$\begin{aligned} ad_p = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ \\ & \circ r_1^{res\ res} (DSS, DSS) \circ r_1^{res\ pr} (DSS, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ \\ & \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}), \end{aligned} \quad (7)$$

де PR^{cr} – множина критеріїв оцінки ефективності ІСППР; VAL^{cr} – множина значень критичних параметрів ІСППР для мікрорівневих моделей; $VAL^{cr\ go}$ – множина цільових значень критичних параметрів ІСППР; $r_1^{pr\ val}$ – відношення «мати значення»; $r_1^{val\ val}$ – відношення близькості двох значень.

Активна адаптація має на увазі зміну середовища з метою максимізації критерію ефективності або активного пошуку такого середовища. Концептуальна модель активної адаптації до ІСППР:

$$\begin{aligned} ad_a = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ \\ & \circ R_1^{res\ res} (ENV, ENV) \circ r_1^{res\ pr} (DSS, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ \\ & \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}) \circ r_2^{res\ act} (dss, ACT^{inf}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{inf}, env), \end{aligned} \quad (8)$$

де $ENV \subseteq RES$ – множина зовнішніх середовищ, які підходять для роботи ІСППР; ACT^{inf} – множина впливів ІСППР на середовище застосування.

Ефект бумерангу bo – ігнорування або ідентифікація як неправдивої інформації з недостовірних джерел:

$$\begin{aligned} bo = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT_{trus}^{iac}) \circ R_{trus}^{res\ res} (PRT, env) \circ \\ & \circ R_{trus}^{res\ res} (PRT, PRT), \end{aligned} \quad (9)$$

де ACT_{trus}^{iac} – множина дій щодо отримання інформації, що враховують відносини довіри між учасниками ІСППР, а також учасниками та джерелами інформації із зовнішнього середовища.

Відповідно до табл. 1 ефект хвилі wa – механізм поширення ідей і цілей у ІСППР, які відповідають інтересам її членів, що вони передаються учасникам ІСППР насамперед із «ближнього кола» експерта-джерела, тобто учасникам з якими у експерта-джерела встановлено ставлення довіри. Надалі ці учасники можуть переробити ідею та передати її учасникам ІСППР зі свого «ближнього кола». Формалізовано ефект хвилі записується у такому вигляді:

$$wa = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT_{trus}^{itr}) \circ R_{trus}^{res\ res} (PRT, PRT), \quad (10)$$

де ACT_{trus}^{itr} – множина дій щодо передачі інформації, що враховують відносини довіри між учасниками ІСППР.

Концептуальна модель гомеостазу ho в ІСППР записується в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} ho = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ \\ & \circ R_1^{res\ res} (DSS, DSS) \circ r_1^{res\ pr} (DSS, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ \\ & \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ all}), \end{aligned} \quad (11)$$

де $VAL^{cr\ all}$ – множина допустимих значень критичних параметрів ІСППР.

Ефект групового егоїзму ge полягає у зневазі ІСППР цілям суспільства та окремого члена ІСППР:

$$ge = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{conf}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, PRT) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, env) \circ R_{conf}^{res\ res} (PRT, PRT), \quad (12)$$

де $r_1^{act\ res}$ – відношення «мати об'єктом», що зв'язує дію та об'єкт, на який воно спрямоване.

Ефект групинку gt – придушення думок учасників ІСППР, які відрізняються від думки більшості членів ІСППР:

$$gt = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{conf}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, PRT) \circ R_{conf}^{res\ res} (PRT, PRT). \quad (13)$$

Ефект моди fa полягає в добровільному прийнятті точки зору на проблему, що встановилася в колективі:

$$fa = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, PR^{dec}). \quad (14)$$

Відповідно до табл. 1, ефект Рінгельмана re – зниження інтенсивності індивідуальної роботи зі зростанням чисельності групи:

$$re = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{prt}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{efi}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{efc}) \circ r_1^{pr\ pr} (PR^{efi}, PR^{efc}), \quad (15)$$

де PR^{efi} – ефективність виконання дії при індивідуальній роботі визначається для кожної ІСППР та завдання індивідуально. Загалом, під ефективністю розумітимемо показник, що враховує оцінку швидкості прийняття та якості запропонованих рішень; PR^{efc} – ефективність виконання дії під час роботи у колективі; $r_1^{pr\ pr}$ – відношення «бути більше».

Концептуальна модель самонавчання ОПР sl_{dm} є виразом:

$$sl_{dm} = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ R_1^{res\ res} (DSS, DSS) \circ r_1^{res\ pr} (dss, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ pl}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_3^{res\ res} (prt^{dm}, res^{fdb}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr\ pl}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_2^{pr\ act} (res^{fdb}, ACT^{lrn}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{lrn}, res^{rul}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ienv}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{idss}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ifct}), \quad (16)$$

де $VAL^{cr\ pl}$ – множина запланованих значень критеріїв ефективності ІСППР при вибраній мікрорівневій моделі dss ; $VAL^{cr\ fct}$ – множина фактичних значень

критеріїв ефективності ІСППР при вибраній мікрорівневій моделі dss ; res^{fdb} – нечітка база знань ОПП на вибір мікрорівневих моделей ІСППР з множини DSS ; ACT^{lm} – навчання, коригування правил нечіткої бази знань ОПП res^{fdb} ; res^{rul} – правило нечіткої бази знань ОПП на вибір мікрорівневих моделей ІСППР з множини DSS ; res^{ienv} – інформація про зовнішнє середовище; res^{idss} – інформація про мікрорівневу модель dss ; res^{ifct} – інформація про фактичні значення критеріїв ефективності ІСППР з обраною моделлю dss .

Самоорганізація ІСППР so , це специфічний ефект, коли колектив ІСППР без видимих причин створює або змінює взаємозв'язки між учасниками та організаційні структури:

$$so = r_3^{res\ res}(dss, PRT) \circ r_2^{res\ act}(PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res}(ACT^{iac}, env) \circ \\ \circ R_1^{res\ res}(DSS, DSS), \quad (17)$$

де $r_1^{act\ res}$ – відношення «мати об'єктом» дії та його ресурсів; $R_1^{res\ res}$ – множина відношень попередньої мікрорівневої моделі з наступною в ході їх зміни.

Ефект синергії se є наслідок взаємозв'язків між учасниками ІСППР під час спільної роботи над завданням, тобто генерації організаційної структури, релевантної задачі, що вирішується. Даний ефект у ІСППР виражається в отриманні колективного рішення вищої якості, ніж будь-яке з індивідуальних:

$$se = r_3^{res\ res}(dss, PRT) \circ r_2^{res\ act}(PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res}(ACT^{iac}, env) \circ \\ \circ R_1^{res\ res}(DSS, DSS) \circ r_4^{res\ res}(PRT, RES^{dec}) \circ r_1^{act\ pr}(RES^{dec}, PR^{qua}) \circ \\ \circ r_4^{res\ res}(dss, res_{dss}^{dec}) \circ r_1^{res\ pr}(dss, pr_{dss}^{qua}) \circ r_1^{pr\ pr}(pr_{dss}^{qua}, PR^{qua}), \quad (18)$$

де RES^{dec} – множина рішень завдання, поставленої перед ІСППР, запропонованих експертами в результаті індивідуальної роботи; PR^{qua} – множина показників якості індивідуальних рішень експертів; res_{dss}^{dec} – рішення, вироблене ІСППР, внаслідок спільної роботи експертів; pr_{dss}^{qua} – якість рішення, виробленого ІСППР; $r_4^{res\ res}$ – відношення, що пов'язує експерта чи ІСППР із виробленим рішенням.

Як показано у табл. 1, соціальна фасилітація sf передбачає посилення домінантних реакцій у присутності інших експертів, тобто сприяє прискоренню вироблення рішень:

$$sf = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{prt}) \circ r_1^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{spi}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{spc}) \circ r_1^{pr\ pr} (PR^{spc}, PR^{spi}), \quad (19)$$

де PR^{spi} – швидкість виконання дії під час індивідуальної роботи, PR^{spc} – швидкість виконання дії під час роботи у колективі.

Аналіз виразів (7) – (19) показав, деякі макрорівневі ефекти взаємопов'язані. Наприклад, вирази (7), (11), (16) і (18) можуть бути перетворені з використанням виразу (17) таким чином:

$$ad_p = so \circ r_1^{res\ pr} (DSS, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}), \quad (20)$$

$$ho = so \circ r_1^{res\ pr} (DSS, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ all}), \quad (21)$$

$$sl_{dm} = so \circ r_1^{res\ pr} (dss, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ pl}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_3^{res\ res} (prt^{dm}, res^{fdb}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr\ pl}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_2^{pr\ act} (res^{fdb}, ACT^{lrn}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{lrn}, res^{rul}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ienv}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{idss}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ifct}), \quad (22)$$

$$se = so \circ r_4^{res\ res} (PRT, RES^{dec}) \circ r_1^{act\ pr} (RES^{dec}, PR^{qua}) \circ r_4^{res\ res} (dss, res_{dss}^{dec}) \circ r_1^{res\ pr} (dss, pr_{dss}^{qua}) \circ r_1^{pr\ pr} (pr_{dss}^{qua}, PR^{qua}), \quad (23)$$

Вирази (20) – (23) показують, що особливу та основну роль серед колективних ефектів у ІСППР грає самоорганізація – передумова виникнення інших ефектів, що позитивно впливають на результат роботи ІСППР, таких як адаптація, гомеостаз, самонавчання та синергія [241].

8.3.2 Математична модель вирішення складного розрахункового завдання

Координація – процес, що відбувається в ІСППР в ході вирішення складних завдань і представляє послідовність аналізу проміжних результатів рішення часткових завдань та видачі впливів, що управляють. Координація здійснюється ОПР, проте може ініціюватися і експертами. У роботі ініціатор координації –

ОПР. Поняття «координація» стосовно ІСППР ще не досліджувалося. Вивчення реальних ІСППР визначило розробку нової моделі вирішення складного завдання та методу моделювання розв'язання складних завдань із координацією часткових завдань з метою їх застосування для проектування ІСППР.

Завдання у системному підході традиційно розглядаються як системи [235, 237] з окремих взаємопов'язаних завдань, між якими є зв'язки, взаємодії. Порядок з'єднання та взаємодії елементів у ІСППР визначається її структурою.

Позначимо завдання-систему prb^u , а окреме завдання – prb^h . Тоді $PRB^h = \{prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h\}$ – множина окремих завдань, що входять до prb^u ; $PRB^u = \{prb_1^u, \dots, prb_{N_u}^u\}$ – множина декомпозицій завдань prb^u [228]; $R^h = \{r_{wq} \mid w, q = 1, \dots, N_h; q \neq w\}$ – множина відносин між окремими завданнями; N_h – потужність множини PRB^h .

Модель розрахункового завдання ІСППР представимо у вигляді:

$$prb^u = \langle PRB^h, PRB^u, R^h \rangle, \quad (24)$$

а модель кожного часткового розрахункового завдання як [228]:

$$prb^h = \langle GL^h, DAT^h, MET^h \rangle, \quad (25)$$

де GL^h – кінцева мета; DAT^h – вихідні дані; MET^h – умови, що конкретизують як DAT^h перетворюються на GL^h .

Модель (24) задовольняє всім властивостям ІСППР: вона складається з множини елементарних завдань PRB^h , між якими встановлені відносини R^h ; зв'язки організовані, що відображено у множині декомпозицій PRB^u ; при вирішенні загального завдання системи окремі елементарні завдання переважно відокремлені від довкілля чи його стан зафіксовано, тобто виконується вимога того, що зв'язки всередині системи набагато сильніші, ніж із зовнішнім середовищем; просте підсумовування рішень окремих завдань не дає вирішення загального завдання в цілому [232, 233].

Модель (25) має недоліки. Основний – нерелевантне відображення відносин між елементами ІСППР. Враховувати лише множину відносин R^h між

частковими завданнями недостатньо. Дослідження ІСППР показали, що здебільшого експерти неспроможні дати професійні рішення часткових завдань з урахуванням даних про складне завдання, заданих ОПР. Зазвичай не вистачає ресурсів, зокрема часу, і є помилки в положенні цілі. Зміна початкових умов моделі (24) неможлива через відсутність істотного елемента – образу ОПР, який виконував функцію координатора і переформулював залежно від ситуації мети експертів.

У запропонованому підході розв'язання завдання розглядається не лише як відображення послідовності вирішення часткових завдань, але й як система з координатором prb^k , функція якого – моніторинг та управління процесом вирішення окремих часткових завдань $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$ експертами під час колективного обговорення. Координатор пов'язаний відносинами $R^{hk} = \{r^{kw} \mid w=1, \dots, N_h\}$ з кожним завданням prb^h у ІСППР prb^u , за допомогою яких збирає інформацію про стан процесу вирішення експертом окремого завдання, та у певні моменти часу видає координуючі впливи для зміни вхідного набору даних: ресурсів та цілей. При цьому модель складного завдання з координацією є виразом:

$$prb^{uk} = \langle PRB^h, PRB^u, prb^k, R^h, R^{hk} \rangle, \quad (26)$$

де prb^k – координатор; $R^{hk} = \{r^{kw} \mid w=1, \dots, N_h\}$ – множини відносин між координатором та окремими завданнями.

Порівняння (24) та (26) показує, що (26) має більш загальний характер і зводиться до (24) при відкиданні в моделі (26) задачі координатора, тобто у разі коли ОПР у ІСППР не виконує координацію в ході вирішення складного завдання. Елемент-координатор може бути представлений «координуючим завданням» (k -завданням), яка повинна бути «додана» в декомпозицію $prb^u \in PRB^u$ складного завдання prb^u , щоб релевантно відображати в моделі особливості завдань планування.

Нехай $MET^* = \{met_1, \dots, met_{N_{MET^*}}\}$ – множина умов. Тоді може бути визначено

відповідність ψ_1 :

$$\psi_1 : SOL_1^h \otimes SOL_2^h \otimes MET^* \rightarrow SOL^u. \quad (27)$$

Елементи відповідності ψ_1 – кортежі $((sol_\alpha^{h1} sol_\beta^{h2} met_\gamma), sol_\eta^u)$, при $\alpha = 1, \dots, N_{sh1}$; $\beta = 1, \dots, N_{sh2}$; $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$; $\eta = 1, \dots, N_{su}$, де перша компонента – трикомпонентний вектор, що складається з рішення $sol_\alpha^{h1} \in SOL_1^h$ завдання prb_1^h , рішення $sol_\beta^{h2} \in SOL_2^h$ завдання prb_2^h і координуючої умови $met_\gamma \in MET^*$, а друга – вирішення sol_η^u завдання prb^u .

Відповідність ψ_1 не є функцією, не може бути записана аналітично та обчислена, оскільки умови координації та результати вирішення окремих часткових завдань найчастіше представлені природною мовою.

Нехай в результаті рішення часткових завдань prb_1^h і prb_2^h отримано рішення $sol_1^{h1} \in SOL_1^h$ і $sol_1^{h2} \in SOL_2^h$, причому $\{(sol_1^{h1}, sol_1^{h2})\} \otimes MET^* \not\subset SOL^u$, тобто отримані рішення sol_1^{h1} і sol_1^{h2} за всіх $met_\gamma \in MET^*$ не призводять до вирішення завдання prb^u . Знак « $\not\subset$ » означає відсутність відображення множини з лівої частини знаку до множини з його правої частини. При цьому необхідно повторне вирішення завдань prb_1^h та prb_2^h . Однак у ІСППР часто немає часу на те, щоб вирішувати завдання наново, тому міркування над складним завданням prb^u розбиваються на окремі, логічно завершені проміжні етапи [236, 237], а в кінці етапів систематично перевіряється інтегрований результат вирішення складного завдання, тобто організується ітеративний процес. Як наслідок, рішення часткового завдання prb^h (лінії міркування експертів) також розбиваються на частини.

У цьому прикладі, в процесі вирішення завдань prb_1^h і prb_2^h будуть отримані наступні проміжні результати:

$$\begin{aligned} sol_{11}^{h1} &\Rightarrow sol_{12}^{h1} \Rightarrow \dots \Rightarrow sol_{1s-1}^{h1} \Rightarrow sol_{1N_{sol}}^{h1} = sol_1^{h1}, \\ sol_{11}^{h2} &\Rightarrow sol_{12}^{h2} \Rightarrow \dots \Rightarrow sol_{1s-1}^{h2} \Rightarrow sol_{1N_{sol}}^{h2} = sol_1^{h2}, \end{aligned} \quad (28)$$

де N_{sol} – кількість кроків ітерації, куди розбиті часткові завдання; а sol_1^{h-1} і sol_1^{h-2} – результати розв'язання часткових завдань prb_1^h і prb_2^h , відповідно, яких привела послідовність кроків $1, \dots, N_{sol}$.

За підсумками перевірки координатором отриманих на конкретному кроці результатів виявляється актуальність впливу на хід рішення окремих часткових завдань prb_1^h і prb_2^h для того, щоб процес вирішення складного завдання prb^h привів до отримання заданого результату – мети. Сам вплив назовемо координуючим, і спрощення далі позначатимемо результат проміжного етапу без першого нижнього індексу, тобто sol_l^{h-1} і sol_l^{h-2} , де $l=1, \dots, N_{sol}$.

Наслідуючи [240], введемо множину координуючих впливів:

$$E = \{e_1^\alpha, \dots, e_{N_{pri}}^\alpha\}, \quad (29)$$

де α – тип координуючого впливу, $\alpha=1, \dots, 6$. Розглянемо кожен із шести типів.

Інтегральна координація ($\alpha=1$) – ОПР встановлює на вхідні параметри $in_i^{h-1} \in IN^{h-1} \subseteq DAT^h$ часткового завдання prb_1^h різні обмеження (нормативи) на певний період часу:

$$\int_0^T (in_i^{h-1}(t)) dt = in_i^{h-1H}, \quad (30)$$

де in_i^{h-1H} – норматив для вхідного параметра $in_i^{h-1} \in IN^{h-1}$, $i=1, \dots, N_{inhl}$; IN^{h-1} – множина вхідних параметрів часткового завдання prb_1^h ; $[0, T]$ – часовий інтервал. Чітка координація ($\alpha=2$) встановлює обмеження на вхідні параметри часткового завдання, щоб у кожний момент часу t вони дорівнювали заданому значенню:

$$in_i^{h-1}(t) = in_i^{h-1Set}, \quad (31)$$

де $in_i^{h-1}(t)$ – вхідний параметр; in_i^{h-1Set} – задане значення параметра; t – довільний момент часу, коли перевіряються виконання умови, $t \in [0, +\infty]$.

Інтервальна координація ($\alpha=3$) вимагає належності вхідного параметра in_i^{h-1} часткового завдання (вихідні дані) заданому інтервалу:

$$in_i^{h-1} \in [val_{\min}^{h-1i}, val_{\max}^{h-1i}] \quad (32)$$

де $val_{\min}^{h-1i}, val_{\max}^{h-1i}$ – межі інтервалу.

Лінгвістична координація ($\alpha = 4$) – умова, задана природною мовою. Координація за часом, синхронізація рішення часткових завдань ($\alpha = 5$) – встановити, через який період часу потрібно дати проміжний результат, тобто. $sol_l^{h\ 1}$, де $l = 1, \dots, N_{sol}$ результати вирішення часткових завдань видаються через певні інтервали часу:

$$sol_l^{h\ 1} \xrightarrow{\tau} sol_{l+1}^{h\ 1}, \quad (33)$$

де τ – інтервал часу, через який відбувається видача рішення; $sol_l^{h\ 1}$ і $sol_{l+1}^{h\ 1}$ – результат вирішення завдання prb_l^h після i -го та $i+1$ -го етапу вирішення складного завдання.

Ситуацію, коли лінія міркування експерта не змінюється, позначимо як «порожню дію» $\alpha = 6$. Наприклад, ОПР вважає, що не потрібно впливати на перебіг рішення часткових завдань експертом. Оскільки результати рішення часткових завдань найчастіше видаються природною мовою, те й координуючі впливи $e_1^\alpha, \dots, e_{N_{prt}}^\alpha$ також найчастіше представлені так само.

Тоді, з урахуванням вищесказаного, встановимо відповідність:

$$\psi_2 : \{(sol_l^{h\ 1}, sol_l^{h\ 2})\} \otimes MET^* \rightarrow E, \quad (34)$$

де $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$. Як максимальне значення індексу l використовується $N_{sol} - 1$, оскільки після етапу N_{sol} вже неможливо координувати вирішення часткових завдань – отримано кінцевий результат.

Елементи відповідності ψ_2 – пари $((sol_l^{h\ 1}, sol_l^{h\ 2}, met_\gamma), e_q^\alpha)$, при $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$; $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$; $q = 1, \dots, N_{prt}$, де перша компонента – трикомпонентний вектор, що складається з вирішення $sol_l^{h\ 1} \in SOL_1^h$ завдання prb_1^h , рішення $sol_l^{h\ 2} \in SOL_2^h$ завдання prb_2^h та координуючої умови $met_\gamma \in MET^*$, а друга – координуючий вплив $e_q^\alpha \in E$. Аналогічно (26) відповідність (34) не є функцією. Воно багатозначно, оскільки можливе застосування по відношенню до одного і того ж часткового завдання prb^h кількох координуючих дій $e_q^\alpha \in E$ відразу.

Оскільки є обмеження на кількість кроків, то при $l = N_{sol}$ має бути відповідність:

$$\psi_3 : \{(sol_l^{h1}, sol_l^{h2})\} \otimes MET^* \rightarrow SOL^u. \quad (35)$$

Елементи відповідності ψ_3 – пари виду $((sol_l^{h1}, sol_l^{h2}, met_\gamma), sol_\eta^u)$, при $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$; $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$; $\eta = 1, \dots, N_{su}$, де перша компонента – трикомпонентний вектор, що складається з рішення $sol_l^{h1} \in SOL_l^h$ завдання prb_1^h , рішення $sol_l^{h2} \in SOL_2^h$ завдання prb_2^h і координуючої умови $met_\gamma \in MET^*$, а друга рішення $sol_\eta^u \in SOL^u$ завдання met^u . Якщо ψ_3 немає, тобто в результаті пошуку елементів ψ_3 виявляється, що $\psi_3 = \emptyset$, то ОПР необхідно змінити множину умов координації MET^* : ввести нові умови та видалити частину старих.

Відповідність ψ_3 – підмножина множини $\psi_1, \psi_3 \subseteq \psi_1$, оскільки єдина відмінність у тому, що у ψ_3 вказані конкретні результати вирішення завдань prb_1^h та prb_2^h . Оскільки не всі елементи відповідності ψ_3 мають як другий компонент $sol_\eta^u \in SOL^u$, яке задовольняє цілі рішення prb^u , позначимо DAT_{ψ_3} множину елементів відповідності ψ_3 , у яких друга компонента задовольняє цілі рішення prb^u , $DAT_{\psi_3} \in \psi_3$. З урахуванням зазначеного, а також враховуючи модель (25), модель k -завдання можна записати так:

$$prb^k = \langle SOL_1^h, SOL_2^h, \psi_2, DAT_{\psi_3} \rangle, \quad (36)$$

де SOL_1^h, SOL_2^h – вихідні дані для задачі-координатора prb^k , виражені комбінацією чисел, слів та виразів; $DAT_{\psi_3} \in \psi_3$ – кінцева мета вирішення завдання координатора prb^k ; ψ_2 – множина умов, що конкретизують, як формуються після кожного кроку координуючі впливи (34), в результаті застосування яких після останнього кроку може бути отримано DAT_{ψ_3} .

На підставі зазначеного дамо наступне визначення процесу координації – ітераційний (багатоетапний) процес, в ході якого, після кожної ітерації ОПР аналізує інтегрований результат вирішення сукупності часткових завдань і обирає координуючі впливи для лінії міркувань кожного з експертів, з тим, щоб

по закінченню процесу вирішення складного завдання отримати загальний результат її вирішення максимально.

Можна також відзначити, що зі збільшенням кількості часткових завдань, актуальність координації їх вирішення зростає, оскільки комбінаторно збільшується кількість відносин (обмін інформації, використання загальних змінних чи загальних обмежень) між завданнями-елементами.

Висновки

1. У дослідженні запропоновано математичні моделі управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Новизна запропонованих математичних моделей полягає у:

у комплексному описі процесі функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Зазначене дозволяє підвищити точність моделювання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для послідовних управлінських рішень;

описі як статичних так і динамічних процесів, які відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень;

здатності провести моделювання як окремо взятого процесу, що відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, так і комплексно проводити моделювання тих процесів, що в них відбуваються;

у встановленні концептуальних залежностей процесу функціонування інтелектуальних системи підтримки прийняття рішень. Це дозволяє описати взаємодію окремих моделей на всіх етапах вирішення розрахункових завдань;

описі процесів координації у гібридних інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, чим досягається підвищення достовірності прийняття управлінських рішень;

моделюванні процесів вирішення складних розрахункових завдань в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, за рахунок концептуального опису зазначеного процесу;

узгодженні процесів проведення розрахунків в інтелектуальних системах

підтримки прийняття рішень, чим досягається зменшення кількості обчислювальних ресурсів систем;

2. Запропоновані математичні моделі доцільно використовувати для вирішення завдання управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що характеризуються високим ступенем складності.

SECTION 9. MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.9.1

9.1 Системи регулювання радіального розміру хона

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується високими вимогами до гнучкості технологічних процесів, що обумовлено як зростанням номенклатури продукції, так і потребою у підвищенні стабільності параметрів якості оброблених поверхонь. Одним із технологічних процесів, де гнучкість відіграє визначальну роль, є хонінгування отворів. Гнучкість цього процесу полягає у здатності технологічної системи оперативно реагувати на відхилення геометричної форми отвору, які виникають як після попередніх етапів механічної обробки, так і безпосередньо під час самого хонінгування. Реалізація такої властивості можлива лише за умови ефективної взаємодії елементів інструментальної системи регулювання радіального розміру (СРРР), які забезпечують злагоджену вхідну та вихідну дії в процесі формоутворення.

Для досягнення заданих показників точності та гнучкості технологічного процесу традиційно застосовуються інструментальні системи регулювання радіального розміру, до яких належать хонінгувальні головки та стрижневі хони (алмазні розвертки). Вони здатні забезпечити необхідні параметри точності та шорсткості оброблюваної поверхні, проте мають низку суттєвих недоліків, а саме:

- відсутність перекриття зони різання при обробці отворів зі складною або переривчастою поверхнею;
- неможливість автоматизованого регулювання радіального розміру в отворах малого діаметра (менше 35 мм);
- інтенсивне руйнування алмазно-абразивного шару в момент вривання;
- недостатня теоретична та експериментальна опрацьованість процесів функціонування СРРР;

- обмежена придатність до інтеграції в адаптивні системи керування процесом хонінгування.

У зв'язку з цим актуальним є створення ефективної інструментальної системи регулювання радіального розміру, здатної забезпечити стабільну роботу під час хонінгування прецизійних отворів деталей машин.

Процес хонінгування, як правило, здійснюється на вертикально-хонінгувальних верстатах [270-273]. Основним робочим рухом у більшості таких верстатів є обертання інструменту, тоді як рух подачі реалізується у вигляді зворотно-поступального переміщення. Для підвищення точності формоутворення та забезпечення оброблюваності важкооброблюваних матеріалів, а також з метою зростання продуктивності, до складу рухів додають осциляційний рух (коливання) [271]. Розрізняють два типи осциляцій: коловий та осьовий.

Конструктивна складність верстата значною мірою визначається концентрацією рухів. Під концентрацією розуміють зосередження всіх основних рухів процесу на одному з двох взаємодіючих елементів технологічної системи (наприклад, на інструментальному шпинделі). Протилежним підходом є диференціація рухів, яка полягає в їх розподілі між обома елементами системи (інструментом і заготовкою), що дозволяє спростити конструкцію окремих вузлів і підвищити технологічну гнучкість.

Для проведення системного аналізу та класифікації сучасних хонінгувальних верстатів доцільно сформулювати базові вимоги до їх кінематичних схем, серед яких:

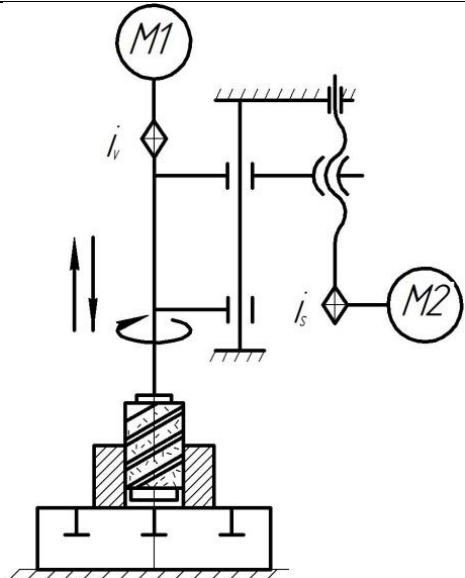
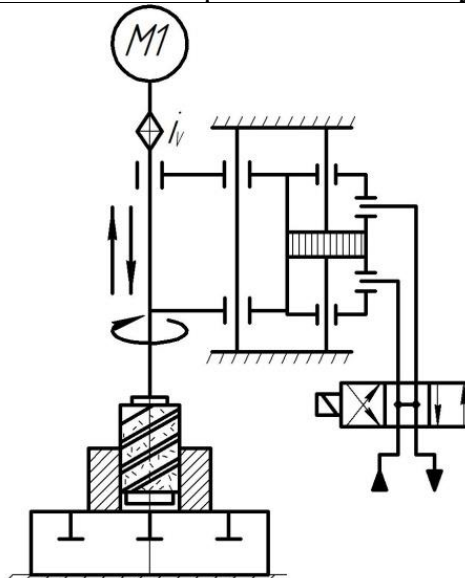
- забезпечення високої точності прямого та зворотного рухів інструменту;
- висока швидкодія та стабільність роботи системи регулювання радіального розміру;
- раціональна диференціація рухів між елементами системи;
- наявність осцилюючих рухів для підвищення якості обробки;
- можливість інтеграції адаптивних систем керування процесом.

На основі зазначених вимог може бути розроблена класифікація кінематичних схем традиційних хонінгувальних верстатів, яка слугуватиме підґрунтям для подальшого вдосконалення їх конструкцій та підвищення ефективності процесу хонінгування.

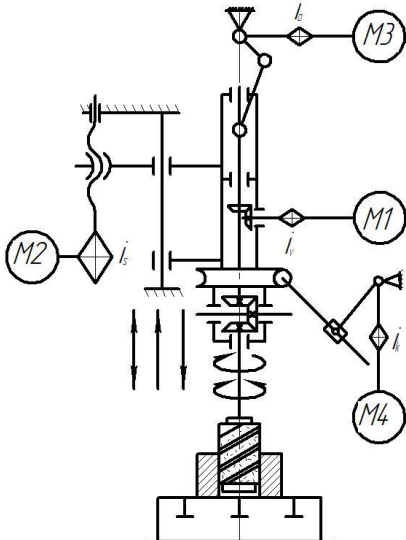
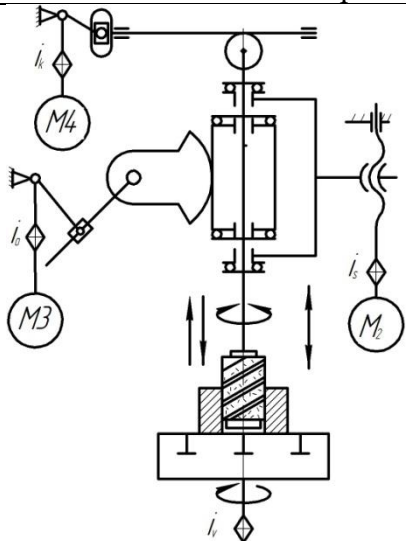
Класифікація кінематичних схем хонінгувальних верстатів за видами надання рухів виконавчим елемента наведена в таблиці 1.

Одним із ключових конструктивних недоліків більшості традиційних хонінгувальних верстатів є концентрація всіх основних рухів на інструменті. Такий принцип кінематичного побудування призводить до істотного ускладнення конструкції верстата, підвищення чутливості до похибок юстування та зниження стабільності технологічного процесу. Зокрема, у верстатах моделей 3Г833, 3Н85 та 3М83 відсутні осциляційні рухи, що обмежує можливості забезпечення високої точності формоутворення та знижує ефективність обробки матеріалів із підвищеними вимогами до якості поверхні. При цьому верстати, в конструкції яких передбачено осциляційний рух, зазвичай мають складну структуру виконавчих механізмів, що ускладнює їх виготовлення, налагодження та обслуговування. Перспективним напрямом удосконалення є диференціація рухів між інструментом і заготовкою, що дозволяє реалізувати осциляційні переміщення за допомогою простих механізмів, підвищуючи гнучкість системи та зменшуючи складність конструкції. Система регулювання радіального розміру (СРРР) відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності процесу хонінгування. Вона призначена для формування необхідного зусилля притиску різальних зерен алмазно-абразивного інструменту до поверхні отвору, а також для реалізації радіального переміщення брусків у процесі обробки. Крім цього, СРРР забезпечує виконання допоміжних функцій: швидкого підводу брусків до поверхні після введення інструменту в отвір і їх оперативного відводу перед виходом з отвору [270, 273].

Таблиця 1

№	Схема верстат	Комплект рухів	Елемент, якому надається рух	Вид приводу	Елементи процесу різання
1	2	3	4	5	6
Вертикальний хонінгувальний верстат мод. 3Г833 [270, 273]					
1	 Джерело: сформовано автором за [270,273]	Обертальний	Інструменту	Електро-механічний	Швидкість різання
		Прямолінійний зворотно-поступальний довгий			Осьова подача
Вертикальний хонінгувальний верстат мод. 3Н85 і 3М83 [270, 273]					
2	 Джерело: сформовано автором за [270, 273]	Обертальний	Інструменту	Електро-механічний	Швидкість різання
		Прямолінійний зворотно-поступальний довгий		Гідравлічний	Осьова подача

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
Хонінгувальний верстат з круговою та осьовою осциляцією [270, 273-275]					
3	 Джерело: сформовано автором за [270, 273-275]	Обертальний	Інструменту	Електро-механічний	Швидкість різання
		Прямолінійний зворотно-поступальний довгий			Осьова подача
		Прямолінійний зворотно-поступальний короткий			Осьова осциляція
		Зворотно-поступальний обертальний			Колова осциляція
Верстат з осьовою осциляцією [276]					
4	 Джерело: сформовано автором за [276]	Обертальний	Деталі	Електро-механічний	Швидкість різання
		Прямолінійний зворотно-поступальний довгий	Інструменту		Осьова подача
		Прямолінійний зворотно-поступальний короткий			Осьова осциляція
		Зворотно-поступальний обертальний			Колова осциляція

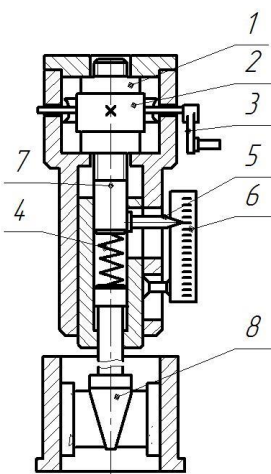
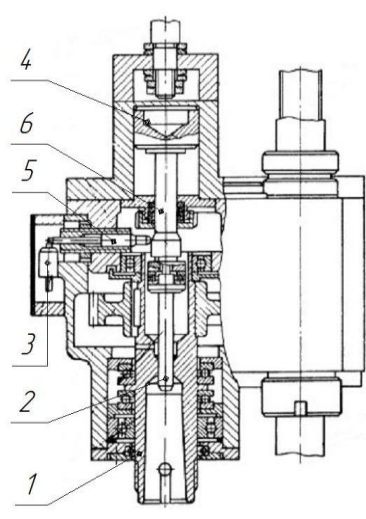
За характером керувальної дії розрізняють СРРР за способом створення тиску та реалізації радіальної подачі. У механізмах подач виникають сили статичного та кінетичного тертя між взаємодіючими поверхнями елементів приводу [277, 278]. Статичне тертя визначається як тертя поверхонь у стані спокою, тоді як кінетичне — як тертя під час їх відносного руху. Вплив цих явищ на функціональні характеристики кінематичних пар описується поняттям

фрикційної інерційності, яка суттєво впливає на точність і стабільність переміщень.

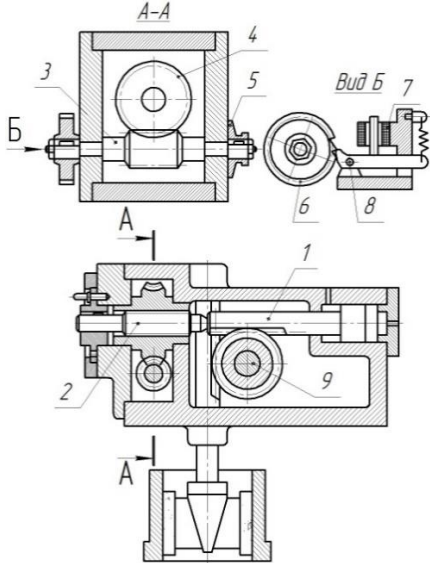
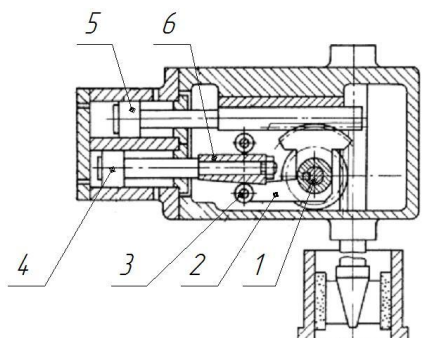
Аналіз традиційних схем CPPP алмазно-абразивного інструменту свідчить про наявність низки конструктивно-функціональних обмежень. До основних вимог, яким повинні відповідати сучасні системи регулювання, належать висока точність і швидкодія переміщення, можливість роботи в умовах адаптивного керування процесом з урахуванням наявності кінематичних пар зі статичним або кінетичним тертям, мінімізація кількості кінематичних ланок та забезпечення стабільності функціонування в різномірних технологічних середовищах. Усі традиційні схеми CPPP побудовані на основі мікропереміщень у режимах статичного та кінетичного тертя, що призводить до флуктуацій зусиль притиску та нестійких режимів роботи. Це, своєю чергою, унеможливорює ефективне застосування таких систем в умовах адаптивного керування технологічним процесом через їхню фрикційну інерційність та обмежені динамічні властивості.

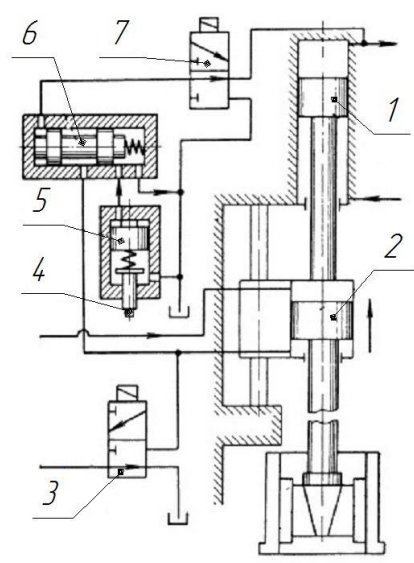
Подальший розвиток систем регулювання радіального розміру має бути спрямований на комплексне дослідження існуючих схем, що працюють у режимах статичного та кінетичного тертя, з метою виявлення їхньої стабільності та чутливості; розроблення нових конструкцій, придатних до інтеграції в адаптивні системи керування без істотного ускладнення структури; а також мінімізацію кількості функціональних середовищ, у яких працює система. Реалізація цих завдань дозволить створити нове покоління CPPP, здатних забезпечити стабільність, точність та адаптивність процесу хонінгування відповідно до вимог сучасного високоточного машинобудівного виробництва.

Таблиця. 2

№	Схема СРРР	Опис принципу дії	Вид приводу	Характер керуючої дії	Зв'язок між елементами та наявність тертя
1	2	3	4	5	6
Механічний привод подач СРРР [270, 273]					
1	 Джерело: сформовано автором за [270, 273]	Рукоятка 3 передає обертальний рух на черв'ячну передачу 2, котра обертає гайку 1. Гайка 1 переміщує гвинт 7, котрий діє на пружину 4. Зусилля від тарувальної пружини 4 передається на плунжер регулювання радіального розміру хона 8. Величина зусилля, з яким тарувальна пружина 4 діє на плунжер радіального розміру хона 8 визначається за допомогою вказівника 6 та шкали 5.	Механічний	Дискретний	Пружній Елементи тертя: Черв'ячна передача Гвинтова передача
Гідравлічний привод подач СРРР [270, 273]					
	 Джерело: сформовано автором за [270, 273]	Регулювання радіального розміру алмазно-абразивного інструмента відбувається за рахунок переміщення товкача 2 в осьовому напрямку. Переміщення товкача 2 здійснюється при допомозі штоку гідроциліндру 6. З метою попередження виводу алмазно-абразивного інструменту з	Гідравлічний	Постійний	Жорсткий Елементи тертя: Гідроциліндр

Продовження таблиці 2

		розтиснутими брусками передбачений контроль стискання брусків кінцевим перемикачем 4.			
СРРР з дискретною подачею [270, 273]					
	 Джерело: сформовано автором за [270, 273]	При кожному подвійному ході інструмента супорт фіксатора провертає храпове колесо на заданий кут, при цьому черв'ячна передача здійснює поворот черв'ячного колеса 4 і переміщення гвинтового упора 2 на дозовану величину. При цьому збільшується простір для переміщення штока гідроциліндру 1 для контакту з новим положенням гвинтового упора 2.	Гідравлічний	Дискретний	Жорсткий Елементи тертя: Черв'ячна передача Рейкова передача Гвинтова передача
Дозований гідромеханічний привод подач СРРР [270, 273]					
	 Джерело: сформовано автором за [270, 273]	Шток гідроциліндру 4 переміщує конус 6, тим самим ролик 3 переміщується вниз по обумовленому конусу. Це дозволяє штоку гідроциліндра 5 повернути зубчатий сектор 2, який перемістить плунжер регулювання радіального розміру хона.	Гідромеханічний	Постійний	Жорсткий Елементи тертя: Рейкова передача Клинова передача

Імпульсний гідравлічний привод подач СРРР [270, 273]					
	Для переміщення плунжера регулювання радіального розміру хона та підводу її брусків до поверхні, що оброблюється здійснюється при подачі мастила в верхню порожнину гідроциліндра 2. Одночасно з цим мастило з нижньої порожнини циліндра через золотник 3 зливається в бак. Момент дотику брусків з поверхнею, що оброблюється фіксується шляхом контролю потужності, яка використовується електродвигуном обертання шпинделя верстату. В процесі обробки потужність, що витрачається електродвигуном зростає. Дане явище використовується для подачі сигналу на відімкнення золотника 3. В даному випадку мастило з гідроциліндру може зливатися лише через золотник 6 та дозатор 5.		Гідравлічний	Дискретний	Жорсткий Елементи тертя: Гідроциліндр
	Джерело: сформовано автором за [270, 273]				

Всі традиційні схеми CPPP функціонують на основі мікропереміщень в умовах статичного та кінетичного тертя, що може призвести до несталої роботи.

Слід зазначити, що CPPP працює в різномірних функціональних середовищах.

Можливість використання традиційних схем CPPP даних типів в умовах адаптивного керування неможливе внаслідок фрикційної інерційності.

Кінцева ланка системи регулювання радіального розміру (CPRP) є ключовим елементом, що безпосередньо визначає ефективність та точність функціонування всієї системи. Саме вона забезпечує безперервне та контрольоване збільшення радіального розміру інструмента відповідно до технологічних вимог процесу хонінгування. У переважній більшості конструкцій кінцева ланка виконується у вигляді клинового механізму, який взаємодіє з алмазно-абразивними брусками та утворює клинову передачу. Такий підхід зумовлений необхідністю забезпечення високої передавальної здатності при мінімальних габаритах вузла. Клинова передача дає змогу створювати значні зусилля притиску за відносно невеликих переміщень виконавчого органу, що є особливо важливим у процесі обробки, де на інструмент діють значні сили різання.

Однією з ключових функцій клинкової кінцевої ланки є здатність протидіяти силам різання, які виникають під час формоутворення, і водночас забезпечувати плавне та високоточне радіальне розширення інструментального блоку, що вимагає високої стабільності геометричних параметрів клина, мінімального зносу робочих поверхонь та забезпечення сталої кінематичної точності упродовж усього терміну експлуатації. Конструкція клинового механізму повинна гарантувати стабільність зусилля притиску навіть за умов коливань навантажень та мікроколивань, властивих процесу хонінгування.

Для системного аналізу та подальшої класифікації кінцевих ланок CPPP доцільно сформулювати комплекс основних вимог, яким вони повинні відповідати. Передусім це висока точність переміщення та швидкодія, що визначають здатність механізму оперативно реагувати на зміни технологічних параметрів. Не менш важливою є максимальна площа контакту між взаємодіючими елементами, яка забезпечує рівномірний розподіл навантаження

та зменшує питомі контактні напруження, що позитивно впливає на зносостійкість та стабільність роботи. Крім того, конструкція кінцевої ланки повинна забезпечувати можливість зворотного ходу під час обробки, що необхідно для реалізації допоміжних технологічних рухів і компенсації можливих похибок.

Особливу увагу при класифікації кінцевих ланок слід приділяти характеру різальної поверхні. Існують два основні типи таких поверхонь — дискретна та єдина. Дискретна поверхня формується окремими алмазно-абразивними елементами з проміжками між ними, що забезпечує гнучкість у відведенні стружки та зменшення контактної площі, але вимагає точного регулювання положення кожного елемента. Єдина різальна поверхня утворюється суцільним рядом різальних елементів, що дозволяє забезпечити більш рівномірне навантаження та стабільність формоутворення, проте потребує підвищених вимог до точності регулювання радіального розміру по всій довжині поверхні контакту.

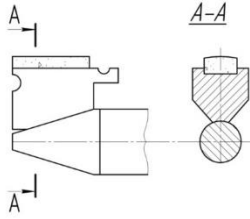
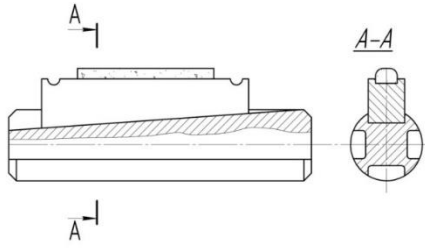
На основі зазначених характеристик доцільно виконати класифікацію існуючих кінцевих ланок СРРР за типом різальної поверхні та формою контакту з оброблюваною поверхнею. Така класифікація дозволяє системно оцінити функціональні можливості різних конструкцій та визначити оптимальні варіанти для конкретних умов обробки. Узагальнені результати класифікації традиційних кінцевих ланок СРРР за формою контакту з поверхнею наведено в таблиці 3.

Майже всі традиційні кінцеві ланки СРРР мають в основі клин, який передбачає наявність роботи в умовах статичного та кінетичного тертя, що може призвести до виникнення нестійкої роботи СРРР в цілому.

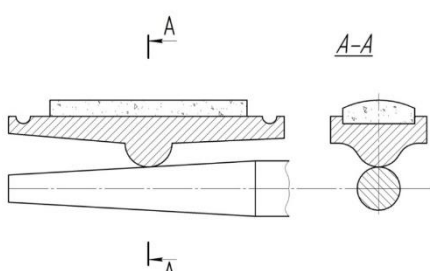
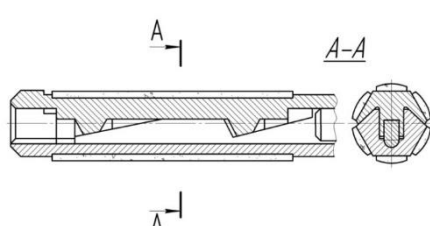
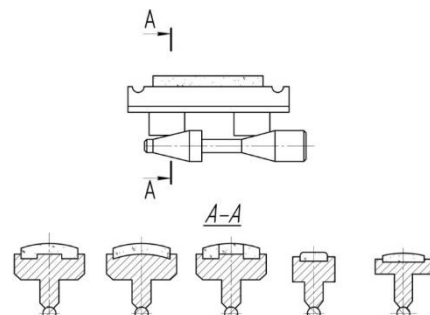
Кінцеві ланки СРРР не мають можливості забезпечення точного зворотного ходу в процесі обробки, що ускладнить їх використання в умовах адаптивного керування процесом.

Більшість кінцевих ланок СРРР мають малу площу контакту з алмазно-абразивним брусками, що негативно впливає на здатність інструменту виправляти геометричні похибки.

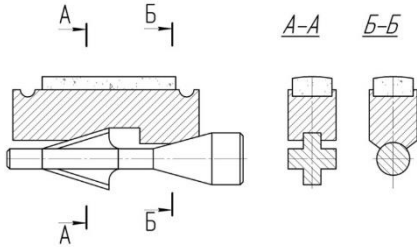
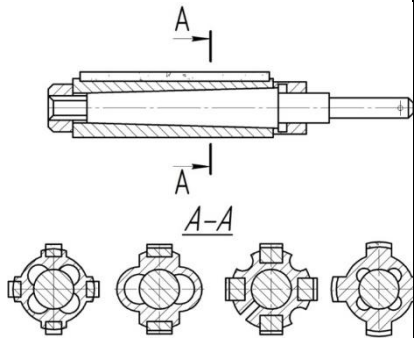
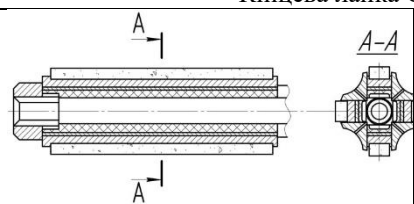
Таблиця. 3

№	Тип кінцевої ланки	Конструктивне виконання кінематичної пари, які утворюють рух розтиску	Можливість прямого та зворотного ходу без наявності фрикційної інерційності	Теоретична форма контакту взаємодіючих поверхонь	Область використання
1	2	3	4	5	6
Кінцева з одним конусом розширення з кромковим контактом [271, 272]					
1	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий у вигляді одного конусу	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується наявністю не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху	Взаємодія внутрішньої і зовнішньої конічної поверхні с переходом на кромковий контакт	Хонінгування глухих отворів
Кінцева ланки СРРР з одним конусом розширення з площинним контактом [271, 272]					
2	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий у вигляді одного конусу	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується наявністю не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху.	Взаємодія поверхонь у площинному контакті.	Прецезійне хонінгування отворів високої точності

Продовження таблиці 3

Кінцева ланка CPPP з одним конусом розширення з сферичним контактом [271, 272]					
3	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий у вигляді одного конусу	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується на явністю не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху.	Взаємодія поверхонь у сферичному контакті	Однчасне хонінгування декількох довгих отворів при наявності самовстановлення брусків
Кінцева ланка CPPP з одностороннім клином [271, 272]					
4	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий односторонній	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується на явністю не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху.	Взаємодія поверхонь площинним у контакті.	Абразивне хонінгування отворів (10-25мм)
Кінцева ланка CPPP з двома конусами розширення з кромковим контактом [271, 272]					
5	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий у вигляді двох конусів	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується на явністю не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху.	Взаємодія внутрішньої і зовнішньої конічної поверхні с переходом на кромковий контакт.	Хонінгування переривчатих поверхонь (шліцьових шпонкових отворів)

Продовження таблиці 3

Кінцева ланка CPPP з двома конусами розширення з площинним контактом [271, 272]					
6	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клиновий у вигляді двох конусів	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується на явність не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного прямого та зворотного руху.	Взаємодія внутрішньої і зовнішньої конічної поверхні с переходом на комбінований контакт	Хонінгування отворів (до 20 мм)
Кінцева ланка CPPP з пружно-деформуємою гільзою (алмазна розвертка або стержневий хон) [271, 272]					
9	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Клин у вигляді конусу	Не задовільне внаслідок наявності перехідного процесу від статичного до кінетичного тертя, що супроводжується на явність не рівномірного руху і фактично не може забезпечити точного зворотного руху	Взаємодія внутрішньої і зовнішньої конічної поверхні с переходом на кромковий контакт	Алмазне розверчування
Кінцева ланка CPPP з гідравлічним роз тиском [271, 272]					
10	 Джерело: сформовано автором за [271, 272]	Гідростатичний	Задовільне із-за мінімізованої кількості деталей с статичним і кінематичним тертям.	Взаємодія поверхонь площинному контакті	Одночасне хонінгування декількох співвісних отворів довгими брусками

На операціях хонінгування отворів доцільним є застосування систем автоматичного керування технологічним процесом, що дає змогу суттєво підвищити точність розмірів та геометричної форми оброблюваних поверхонь. Впровадження таких систем забезпечує стабільність параметрів обробки, зменшення впливу дестабілізуючих чинників та підвищення рівня автоматизації

виробництва. Залежно від закону дії, який визначає принципи регулювання та керування, автоматичні системи поділяють на чотири класи [280, 281].

До першого класу належать системи стабілізації, у яких задана дія описується постійними величинами. Основний режим їх функціонування спрямований на зменшення або повне усунення помилок, зумовлених дією зовнішніх обурень. Такі системи ефективні у випадках, коли технологічний процес характеризується відносною сталістю параметрів та незначними відхиленнями від номінальних умов.

Другий клас становлять системи програмного регулювання, де задана дія визначається заздалегідь відомими функціями часу. Основний режим роботи таких систем полягає у зміні регульованих величин відповідно до встановленої програми та в компенсації похибок, викликаних збуреннями. Подібні системи дають змогу реалізовувати точно визначені кінематичні закони, що особливо важливо при обробці отворів з варіативною структурою поверхонь або змінними режимами навантаження.

Третій клас представлений системами стеження, в яких закон заданої дії є невідомою функцією часу. Основний режим роботи таких систем спрямований на відтворення регульованої величини відповідно до фактичного закону її зміни. Вони особливо ефективні у випадках, коли процес обробки супроводжується випадковими або складно прогнозованими змінами зовнішніх умов.

Четвертий клас становлять адаптивні системи керування, які автоматично змінюють алгоритми функціонування керуючої частини для досягнення оптимального режиму в умовах змінних параметрів об'єкта керування. Ці системи забезпечують найвищий рівень гнучкості та стійкості процесу за рахунок здатності до самопристосування до змінних характеристик технологічного середовища.

У металорізальних верстатах з електричними або гідравлічними приводами для забезпечення високої точності обробки необхідно підтримувати стабільність законів функціонування їхніх вузлів. Однак на практиці ця вимога не завжди виконується через нестабільність параметрів приводів і

невизначеність характеристик об'єкта обробки. Нестабільність параметрів гідромеханічних та електромеханічних приводів зумовлена низкою факторів, серед яких — конструктивні недосконалості окремих елементів, вплив технологічних похибок, коливання припуску на обробку, зміни тиску та температури робочої рідини тощо. Невизначеність характеристик процесу обробки виникає як через недостатню апіорну інформацію про властивості матеріалу та умови різання, так і через зміну цих властивостей упродовж часу.

Одним із найефективніших підходів до компенсації нестабільності параметрів динамічних систем в умовах неповної визначеності їхніх характеристик є використання принципів адаптивного керування. Адаптивні системи керування (АСК) здатні оперативно реагувати на зміну зовнішніх та внутрішніх параметрів процесу, автоматично коригуючи власні алгоритми роботи. Саме тому на операціях хонінгування отворів найбільш доцільним є застосування АСК, які мають здатність до самопристосування [281].

Важливим чинником, що зумовлює потребу у використанні адаптивних систем, є розкид розмірів та геометричної форми отворів у межах допуску, що призводить до недостатності інформації про реальний стан оброблюваної поверхні під час виконання технологічної операції. АСК дозволяють компенсувати ці недоліки шляхом безперервного коригування параметрів процесу на основі даних зворотного зв'язку. Крім того, адаптивні системи здатні виправляти типові дефекти геометричної форми, такі як бочкоподібність, сідлоподібність та конусність отворів, а також автоматично враховувати знос зерен брусків хонінгувальної головки, підтримуючи стабільний контактний тиск та геометричну точність упродовж усього циклу обробки.

Подальший аналіз ефективності впровадження адаптивних систем керування процесом хонінгування отворів передбачає розгляд існуючих типів АСК, їх структурних схем, принципів побудови та функціональних можливостей у контексті сучасних технологічних вимог.

АСК стабілізації крутного моменту з електроприводом наведена на рис.1.

АСК стабілізації складається з поворотного динамічного столу 1, на якому закріплюється оброблювана деталь. До поворотного столу 1 прикріплений потенціометричний датчик 2, який з'єднаний в свою чергу з омметром 3. Омметр знаходиться в єдині цепі з безконтактним регулятором БРМ -11 4.

Регулювання радіального розміру інструмента 6 здійснюється за рахунок черв'ячної передачі 7, яка приводиться в дію приводом 5.

Обумовлена АСК працює наступним чином. Деталь, що оброблюється, закріплюється на поворотному динамометричному столі 1.

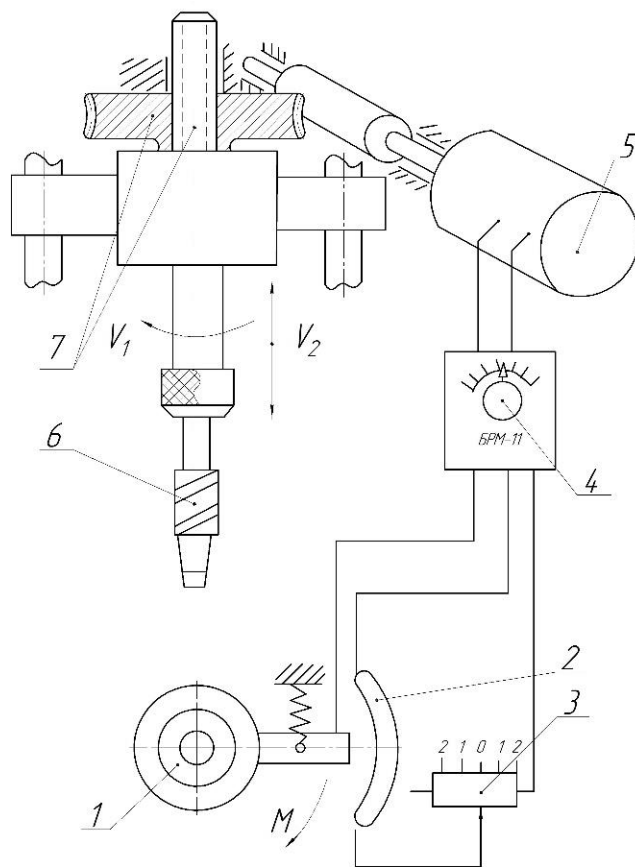


Рис. 1. АСК стабілізації

крутного моменту з
електроприводом .

1 – поворотний
динамометричний стіл;

2 – потенціометричний
датчик;

3 – омметр;

4 – безконтактний
регулятор БРМ – 11;

5 – привід СРРР;

6 – інструмент;

7 – СРРР

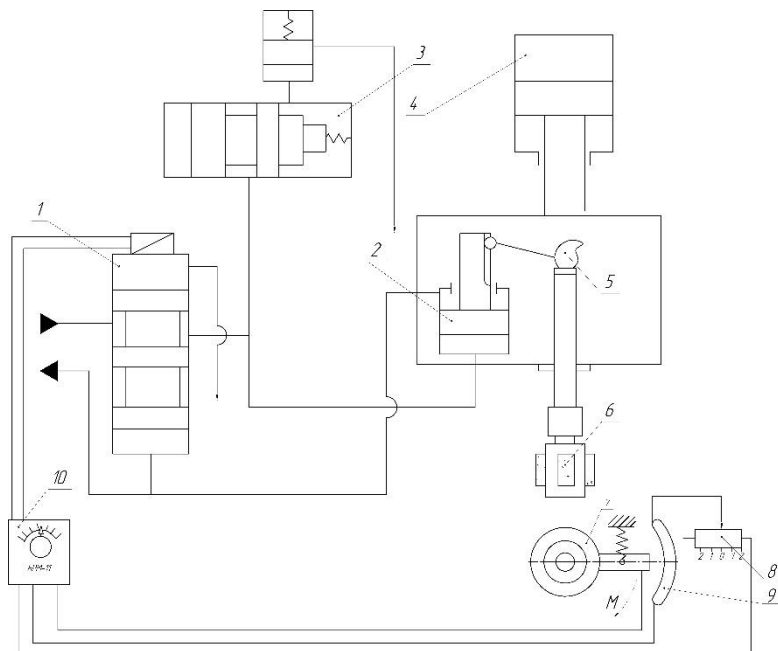
Джерело: сформовано
автором за [270, 273]

При відхиленні поточного значення моменту від заданого при налаштуванні потенціометричного датчика 2, з'єданого з столом, створюється вихідний сигнал, який вимірюється в зміні опору в обумовленому датчика, який визначається омметром 3 та передається на підсилення до безконтактного регулятора БРМ-11 4. Після підсилення сигнал передається на привід 5, що призводить до зменшення величини подачі плунжера регулювання радіального розміру до моменту стабілізації крутного моменту на оброблюваній деталі.

АСК програмного керування тиском з гідравлічним приводом наведена на рис. 2

АСК програмного керування тиском з гідравлічним приводом із складається поворотного динамометричного столу 7, на якому встановлюється деталь. До обумовленого столу приєднаний потенціометричний датчик 9, який з'єднаний в свою чергу з омметром 8. Омметр знаходиться в єдині цепі з безконтактним регулятор БРМ -11 10.

Рис. 2 АСК програмного керування тиском з гідравлічним приводом



1 – керуючий електрогіддорозподільник; 2 – гідроциліндр привода обертання профільного кулачка; 3 – розподільник зворотного зв'язку; 4 – гідроциліндр приво­ду зворотно – поступального руху; 5 – профільний кулачок; 6 – інструмент; 7 – поворотний динамометричний стіл; 8 – омметр; 9 – потенціометричний датчик; 10 – безконтактний регулятор БРМ – 11

Джерело: сформовано автором за [270, 273]

Регулювання радіального розміру інструмента 6 здійснюється за рахунок плунжера на кінці, якого закріплений профільний кулачок 5 переміщення, кого здійснює рейко-поршень гідроциліндру 2. Керування обумовленого циліндру здійснюється за рахунок електрогіддорозподільника 1.

АСК програмного керування тиском з гідравлічним приводом працює наступним чином. Деталь, що оброблюється закріплюється на поворотному

динамометричному столі 7. При відхиленні поточного значення моменту від заданого при налаштуванні потенціометричного датчика 9, з'єднаного з столом, створюється сигнал розузгодження, який вимірюється в переміні опору, яка визначається омметром 8 та передається на підсилення до безконтактного регулятора 10. Після підсилення сигнал передається керуючому електрогіддорозподільнику 1, котрий збільшує або зменшує тиск у магістралі гідроциліндру привода обертання профільного кулачка.

АСК стабілізації крутного моменту з гідромеханічним приводом наведена на рис. 3

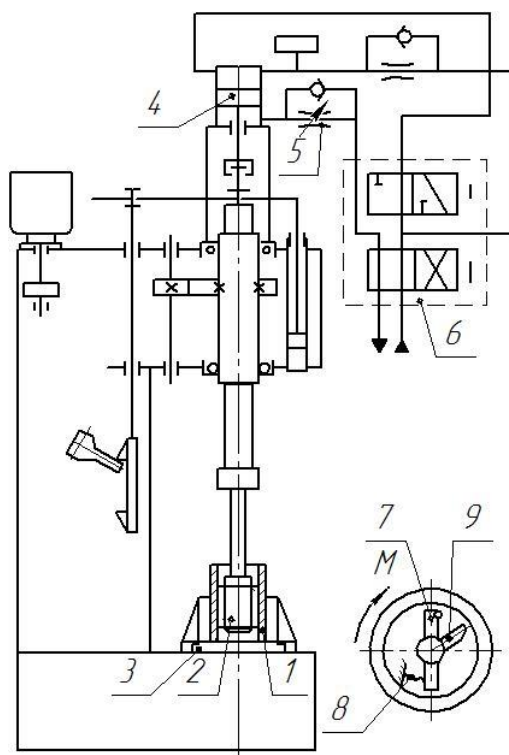


Рис.3 АСК стабілізації крутного моменту з гідромеханічним приводом

- 1 – оброблювана деталь;
- 2 – інструмент;
- 3 – пружно-поворотна планшайба;
- 4 – СРРР;
- 5 – дросель;
- 6 – електрогіддорозподільник;
- 7 – кулачок;
- 8 – пружина;
- 9 – кулачок;

Джерело: сформовано автором за [270, 273]

АСК стабілізації крутного моменту з гідромеханічним приводом складається з пружно-поворотної планшайби 3 на, якій закріплюється оброблювана деталь 1. Пружно-поворотна планшайба складається з пружини 8, кулачка 9 та кулачка 7, який з'єднаний з дроселлем 5.

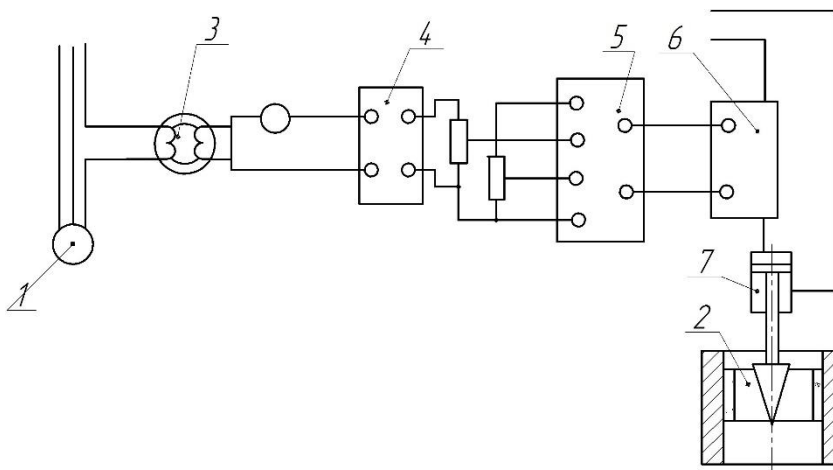
Регулювання радіального розміру інструмента здійснюється при допомозі гідроциліндру 4 керування, яким здійснюють електрогіддорозподільники 6.

Обумовлена АСК працює наступним чином: на протязі процесу хонінгування тиск брусків 2 реєструється за реактивним моментом на оброблюємії деталі 1, встановленій на пружно-поворотній планшайбі 3. Під дією крутного моменту від сил різання планшайба повертається на певний кут і через кулачок 7 діє на дросель 5. Мاستило від гідросистеми через електрогідроперетворювач 6 діє на механізм розтиску брусків 4, в результаті чого зменшується крутний момент на шпінделі верстата. Планшайба з деталлю під дією пружини повертається у вихідне положення [271].

АСК стабілізація крутного моменту з електрогідравлічним приводом наведений на рис. 4

Рис.4 АСК

стабілізації крутного
моменту з
електрогідравлічним
приводом



1 – електродвигун
головного привода; 2 –
інструмент; 3 –
трансформатор; 4 –
випрямляч; 5 – електронний
блок керування; 6-
електрогідравлічний клапан; 7
– гідроциліндру;

Джерело: сформовано
автором за [270,273]

АСК стабілізації крутного моменту з електрогідравлічним приводом складається з електродвигуна головна привода 1, трансформатору 3, електронного блоку керування 3 та електрогідравлічного клапану 6.

Регулювання радіального розміру інструменту 7 здійснюється за рахунок гідроциліндру 7.

Обумовлена АСК працює наступним чином. Струм, який споживає двигун головного привода 1, через трансформатор 3 подається до випрямляча 4 і далі до електронного блоку керування 5, де буде порівнюватися із заданим сигналом. Якщо існує різниця між цими сигналами, то електрогідравлічний клапан 6 зменшить або збільшить подачі робочої рідини в гідроциліндр 7.

Недоліком даної системи є використання для керування величини струму двигуна головного приводу.

АСК програмного керування пройденого шляху з механічним приводом наведена на рис. 5.

АСК програмного керування пройденого шляху з електромеханічним приводом складається з інструменту 1, який з'єднаний з гвинтовою передачею 3 на, якій закріплений фотоімпульсний датчик ВЕ. Гайка гвинтової передачі 3 розміщена в осьовому отворі зубчатого колеса зубчатої передачі 2. Зубчата передача 2 обертається за рахунок крокового електродвигуна М1.

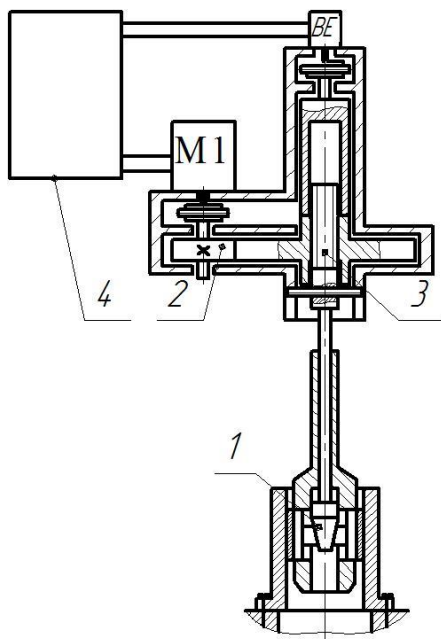


Рис. 5 АСК програмного керування пройденого шляху з електромеханічним приводом

1 – інструмент;

2 – зубчата передача;

3 – гвинтова передача;

4 – ПЧПК;

М1 – кроковий електродвигун;

ВЕ – фотоімпульсний датчик

Джерело: сформовано автором за [271]

АСК програмного керування пройденого шляху з електромеханічним приводом працює наступним чином. Фотоімпульсний датчик ВЕ визначає положення гвинта гвинтової передачі 3 і посилає сигнал на пристрій числового програмного керування (ПЧПК), який у відповідності до отриманого сигналу

провертає вихідний вал крокового електродвигуна М1. Сукупність обумовлених призводить до регулювання радіального розміру інструмента 1.

Під час алмазно-абразивного хонінгування отворів виникає необхідність точного та стабільного регулювання радіального розміру інструмента з метою забезпечення заданих параметрів точності розмірів та геометричної форми деталі. Від цього безпосередньо залежить досягнення необхідних допусків, формування правильної геометрії отвору, а також відтворюваність результатів обробки в серійному та масовому виробництві. Зазначені функції реалізуються за допомогою систем регулювання радіального розміру (СРРР), які є невід'ємною складовою сучасних хонінгувальних інструментів та комплексів.

Оцінювання якості роботи СРРР можливе на основі аналізу диференціальних рівнянь, що описують поведінку системи. Такий підхід дає змогу врахувати як статичні, так і динамічні характеристики механізмів, а також оцінити стійкість, точність та швидкодію системи у реальних умовах функціонування. Задачу дослідження СРРР доцільно розділити на дві самостійні підзадачі: статичну та динамічну. Перша з них пов'язана з аналізом сталого режиму роботи системи та визначенням її точності у статичному стані. Друга — з дослідженням поведінки системи в перехідних режимах, що дозволяє оцінити швидкодію, інерційність та можливі коливальні процеси.

Статичний аналіз СРРР дає можливість визначити величину похибки у сталому режимі, її залежність від конструктивних параметрів ланок та зовнішніх впливів, а також оцінити здатність системи підтримувати задане зусилля притиску та радіальне положення інструмента. Динамічний аналіз, у свою чергу, дозволяє дослідити часову реакцію системи на зміну вхідного сигналу, оцінити наявність перехідних процесів, їхню тривалість та характер (аперіодичний, коливальний тощо), що є критично важливим у процесі високошвидкісної обробки та при адаптивному керуванні.

Не менш важливим етапом є класифікація систем регулювання радіального розміру, яка дозволяє систематизувати існуючі технічні рішення та визначити оптимальні конструктивно-функціональні схеми для конкретних технологічних

умов. У загальному вигляді CPPP складається з трьох основних ланок. Привідна ланка отримує вхідний сигнал від керуючої системи та ініціює рух. Комплект передавальних ланок забезпечує перетворення руху приводу у необхідні лінійні та силові параметри, відповідно до кінематичних і силових співвідношень механізму. Кінцева ланка здійснює безпосереднє лінійне переміщення алмазно-абразивних брусків та виконує силову функцію обробки, забезпечуючи необхідний контактний тиск інструмента на поверхню деталі.

На основі зазначеної структурної побудови складено загальну класифікацію CPPP, яка узагальнює типи приводів, види передавальних механізмів та варіанти кінцевих ланок залежно від їх конструктивних та функціональних особливостей. Ця класифікація наведена в таблиці 4. Вона є відправною точкою для проведення поглибленого аналізу кожного зі складових елементів системи з визначенням їхніх статичних та динамічних характеристик. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити потенціал різних схем CPPP, визначити їх придатність до інтеграції в адаптивні системи керування, а також обґрунтувати напрямки вдосконалення конструкцій з урахуванням вимог сучасного високоточного виробництва.

Після введення основних визначень і класифікацій ланок системи регулювання радіального розміру (CPRP) виникає можливість більш глибокого аналізу та синтезу як окремих складових елементів, так і фізичних процесів, що відбуваються під час їх функціонування. Це особливо важливо з огляду на характер переміщень, які реалізуються в таких системах. Регулювання радіального розміру у процесі хонінгування здійснюється з високою точністю, у діапазоні від часток мікрона до кількох мікрометрів [271]. Такий масштаб переміщень дає підстави розглядати CPPP як системи малих переміщень (СМП) [304], що накладає специфічні вимоги до їх кінематичних, силових та динамічних характеристик.

Таблиця 4

Найменування елементів СРРР	Функціональне призначення	Конструктивне виконання
Привід	Забезпечення переміщень на основі вхідного сигналу	Електричні, гідравлічні і пневматичні крокові двигуни.
Комплект передавальних кінематичних ланок	Забезпечення переміщень необхідної лінійної величини, з необхідною швидкістю	Зубчата, гвинтова і інші передачі
Кінцева ланка	Регулюємий носій алмазних чи абразивних зерен, який виконує обробляючу функцію	Клинова передача спряжена з комплектом призматичних тіл розміщених в пазах циліндричної обойми.

Малі переміщення, які виконуються в процесі регулювання, як правило, відбуваються з незначними швидкостями. У цих умовах система працює в зоні граничного тертя, коли статичне тертя переходить у кінетичне. При цьому коефіцієнти тертя набувають змінних значень, що залежить від мікрогеометрії поверхонь, стану змащення та локальних мікроколивань. Функціонування СМП в умовах граничного тертя зумовлює появу характерного ефекту переривчастого руху [278].

Переривчастий рух характеризується чергуванням фаз зупинок та різких скачків переміщення, що призводить до виникнення коливальних процесів. Такі явища негативно впливають на точність переміщення кінцевої ланки, оскільки мікроскачки та запізнення можуть порушувати стабільність регулювання радіального розміру, особливо при роботі в режимах високої точності. Наявність переривчастого руху безпосередньо пов'язана з фрикційними властивостями кінематичних пар та пружними деформаціями елементів системи, які накопичуються у фазі зупинки та різко вивільняються у фазі стрибка.

Процес регулювання радіального розміру відбувається в умовах короткочасності як часу, так і шляху переміщення, що фактично переводить його у площину перехідних режимів. Це вимагає розгляду роботи СРРР з динамічних позицій, адже саме у перехідному процесі проявляються інерційні, фрикційні та

пружні ефекти, які визначають фактичну точність та стабільність регулювання. У зв'язку з цим особливу увагу слід приділити аналізу динамічної поведінки CPPP традиційних конструктивних схем.

Для забезпечення об'єктивності оцінювання необхідно перевірити сталість роботи традиційних схем CPPP, які функціонують у режимі програмного керування підналагодженням без використання адаптивних алгоритмів. Такий аналіз дозволяє виявити внутрішні обмеження класичних конструкцій і визначити ступінь їхньої відповідності сучасним вимогам високоточного машинобудування. З цією метою розглядаються окремі ланки системи відповідно до класифікації (див. табл. 4), що дає можливість детально простежити внесок кожного елемента у загальну поведінку CPPP.

З огляду на вирішальну роль фрикційних явищ у роботі СМП, доцільно провести поглиблений розгляд сил тертя, що діють у кінематичних парах і спряженнях системи. Ці сили визначають як характер мікропереміщень, так і форму перехідних процесів, а отже, є ключовим фактором у забезпеченні стабільності та точності регулювання радіального розміру під час хонінгування.

Для забезпечення високої точності регулювання радіального розміру в процесі хонінгування отворів необхідно реалізувати принцип силового замикання інструментальної системи регулювання радіального розміру (CPPP). Саме силове замикання визначає надійність контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, стабільність зусиль притиску та збереження заданих параметрів положення алмазно-абразивних брусків у процесі обробки. Наявність правильно сформованої замкненої силової схеми дозволяє уникнути паразитних переміщень, коливань та самовільних зсувів інструментальних елементів, які можуть призвести до відхилень геометричних параметрів отвору.

Розглядаючи кінцеву ланку традиційної інструментальної CPPP, можна побудувати схему дії сил у процесі регулювання радіального розміру (рис. 6, а). У момент позиціонування на кінцеву ланку діє осьова сила P_Z спрямована уздовж осі інструмента. Під дією цієї сили відбувається переміщення клинового елемента, що призводить до утворення радіальної сили P_X , спрямованої

перпендикулярно до осі отвору. Радіальна сила, у свою чергу, передається на поверхню оброблюваного отвору через контактні ділянки алмазно-абразивних брусків. У відповідь на дію радіальної сили формується реакція опору R_X , спрямована протилежно до P_X . Саме ця реакція є елементом силового замикання, яке фіксує систему відносно оброблюваної поверхні, створюючи рівновагу сил у робочому стані.

Сили, які діють у кінцевій ланці CPPP, мають імпульсний, тобто змінний у часі, характер. У процесі регулювання осьовий імпульс сили P_Z , що зображується на схемі лінією 4, викликає утворення відповідного імпульсу радіальної сили P_X , який представлений лінією 7. Ці імпульси відповідають етапу короткочасного переміщення та встановлення інструмента у новому положенні. Після завершення позиціювання осьова сила P_Z стабілізується, а система переходить у статичний режим, за умови, що радіальна сила $P_X > 0$. У цьому стані контакт між інструментом і поверхнею підтримується за рахунок силового замикання, що забезпечує фіксоване положення брусків.

Під час безпосереднього знімання припуску осьова сила P_Z знижується до нуля, оскільки активне позиціювання припиняється. Водночас радіальна сила P_X зберігає своє значення завдяки пружній жорсткості системи та незворотності клинної передачі. Остання виконує функцію механічного фіксатора, який запобігає самовільному зворотному переміщенню брусків під дією реакції контактних сил. Таким чином, навіть у відсутності осьового зусилля, система зберігає необхідний контактний тиск між інструментом і поверхнею деталі, що є необхідною умовою стабільного процесу хонінгування.

Реалізація принципу силового замикання є критично важливою для досягнення високої точності та відтворюваності результатів обробки. Вона забезпечує сталість положення інструментальних елементів у зоні різання, компенсує вплив мікроколивань та фрикційних ефектів, а також визначає характер розподілу навантажень у зоні контакту. Аналіз силової схеми кінцевої ланки дозволяє не лише оцінити ефективність традиційних конструктивних рішень, а й виявити потенційні зони покращення, пов'язані з підвищенням

пружної стабільності та точності позиціонування у перехідних і сталих режимах роботи.

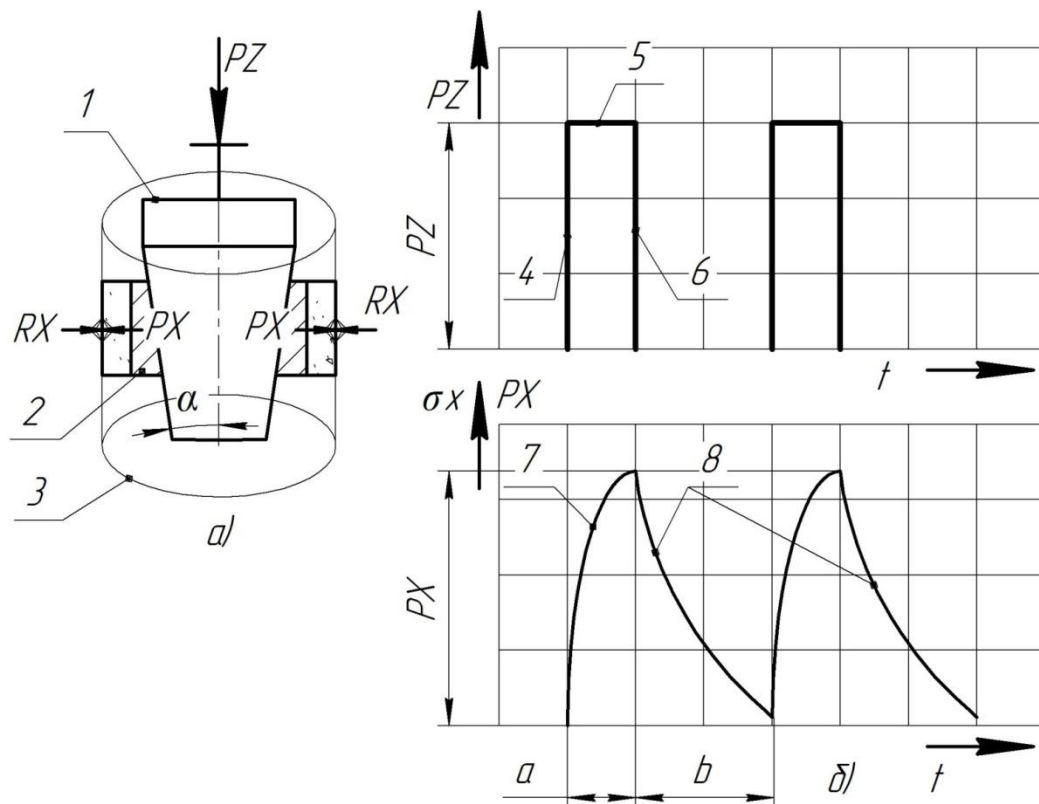


Рис. 6 Схема дискретного силового замикання кінцевої ланки

традиційних CPPP а) схема дії сил в кінцевій ланці; б) графік дії імпульсу сил при функціонуванні CPPP

1 – клин; 2 – алмазно-абразивні бруски; 3 – контур поверхні оброблюваного отвору; 4 – лінія зростання імпульсу сили PZ ; 5 – лінія стабілізації сили PZ ; 6 – лінія падіння імпульсу сили PZ ; 7 – лінія зростання імпульсу сили PX та зростання напруження σ_x ; 8 – лінія падіння імпульсу сили PX , яка співпадає з лінією зміни припуску в процесі хонінгування та падіння напруження σ_x ; PZ – осьова сила; PX – радіальна сила; RX – реакція опору на дію сили PX ; t – час; a – час зростання імпульсу сили PX в умовах силового замикання; b – час падіння імпульсу сили PX , який супроводжується зменшенням величини припуск, що знімається.

Джерело: сформовано автором самостійно

Також, при зростанні імпульсу осьової сили PZ та імпульсу радіальної сили PX присутнє розузгодження, що свідчить про наявність інерційності.

Падіння значення радіальної сили $PX \rightarrow 0$, що пов'язано з процесом зняття припуску призведе до того, що імпульс осьової сили PZ знову прийме максимальне значення та збільшить величину радіальної сила $PX > 0$.

Проміжок часу при падінні імпульсу радіальної сили в межах $0 \leftarrow PX \gg 0$ і відсутності імпульсу осьової сили ($PZ=0$) буде визначати "силовий люфт".

Силовий люфт - це стан при якому інструментальна система невірноважена ($PZ=0$; $PX \rightarrow 0$).

Умови рівноваги системи:

$$\Sigma X=0 \quad R_X-P_X=0 \quad (1)$$

$$\Sigma Z=0 \quad P_Z-R_X/\operatorname{tg}\alpha=0 \quad (2)$$

де: α – кут клинної передачі.

Умова (1) в будь якому разі стані зберігається протягом всього процесу хонінгування. Зменшення сили P_X пов'язане із зняттям припуску буде викликати зменшення реакції R_X і підтримувати рівновагу.

В той же час умова (2) не підтримується в процесі хонінгування, тому що при зупинці переміщення клина ($P_Z=0$), реакція $R_X/\operatorname{tg}\alpha > 0$, за рахунок пружної жорсткості системи визначеною незворотністю клинної передачі. Таким чином, система буде невірноважена в напрямку вісі Z .

Ріст імпульсу сили P_Z для створення силового замикання відбувається в умовах перехідного процесу. Як було визначено, в умовах перехідного процесу клинний ланці притаманна інерційність, яка негативно впливає на процес регулювання радіального розміру.

Отже, можна прийти до висновку, що утворений силовий люфт буде свідчити про дискретність імпульсу осьової сили P_Z та постійної роботи в умовах перехідного процесу у відповідності до досліджень [278,283].

Системи регулювання радіального розміру (СРРР) належать до верстатних систем, що забезпечують високоточні переміщення інструментальних елементів у межах малих швидкостей. Подібні системи застосовуються у високоточному машинобудуванні, де необхідно реалізовувати позиціонування з точністю до часток мікрона та при цьому забезпечувати стабільність процесу в умовах низькошвидкісного руху.

Відповідно до досліджень [278,283,284], приводи вузлів верстатів, що мають виконувати малі точні переміщення з низькими швидкостями, являють

собою системи, у яких відбувається пружна взаємодія контактуючих поверхонь. Наявність сил тертя між цими поверхнями зумовлює розузгодження між рухами ланок, які формують керуючий сигнал, та ланок, що безпосередньо його реалізують. Це розузгодження є однією з головних причин появи специфічних динамічних ефектів у прецизійних механізмах.

Коли швидкість ковзання в контактних зонах є нижчою від певного критичного значення [278], спостерігається різко виражена нерівномірність руху виконавчих ланок. Такий рух набуває стрибкоподібного характеру з чергуванням коротких фаз ковзання та зупинок, що повторюються з певною періодичністю. Подібні явища є типовими для механізмів точних верстатів, у яких необхідно забезпечити мікропереміщення з швидкостями у декілька міліметрів за хвилину або навіть меншими. У цих умовах сила тертя та пружні деформації відіграють домінуючу роль, а поведінка системи суттєво відхиляється від ідеалізованої лінійної моделі.

Характер руху при таких точних і малих переміщеннях відносить роботу системи до функціонування у перехідному режимі. Це означає, що звичні методи статичного аналізу не дозволяють повною мірою описати поведінку системи, оскільки визначальними є часові залежності та інерційно-фрикційні ефекти, які проявляються у коротких часових інтервалах. Внаслідок цього функціонування систем типу СРРР необхідно оцінювати з урахуванням динамічних характеристик, що вимагає спеціальних методів аналізу, заснованих на рівняннях руху та урахуванні змінних параметрів тертя.

Оскільки СРРР складається з ряду послідовно взаємопов'язаних ланок, на початковому етапі дослідження проводився аналіз динамічних характеристик кожної ланки окремо. Такий підхід дає змогу ідентифікувати вплив окремих конструктивних елементів на загальну поведінку системи, виявити потенційні джерела нестабільності та оцінити їхній внесок у формування перехідних процесів. Результати динамічних досліджень окремих ланок СРРР наведені в додатку А та слугують базою для подальшого моделювання інтегрованої поведінки системи в цілому.

На підставі динамічного аналізу складових ланок традиційних конструкцій СРРР, розглянемо систему в цілому. Електромеханічна СРРР (див. рис. 7) [272,273,285] складається з крокового електродвигуна 1, зубчатої кінематичної пари 2, гвинтової кінематичної пари 3 та клинової пари 4.

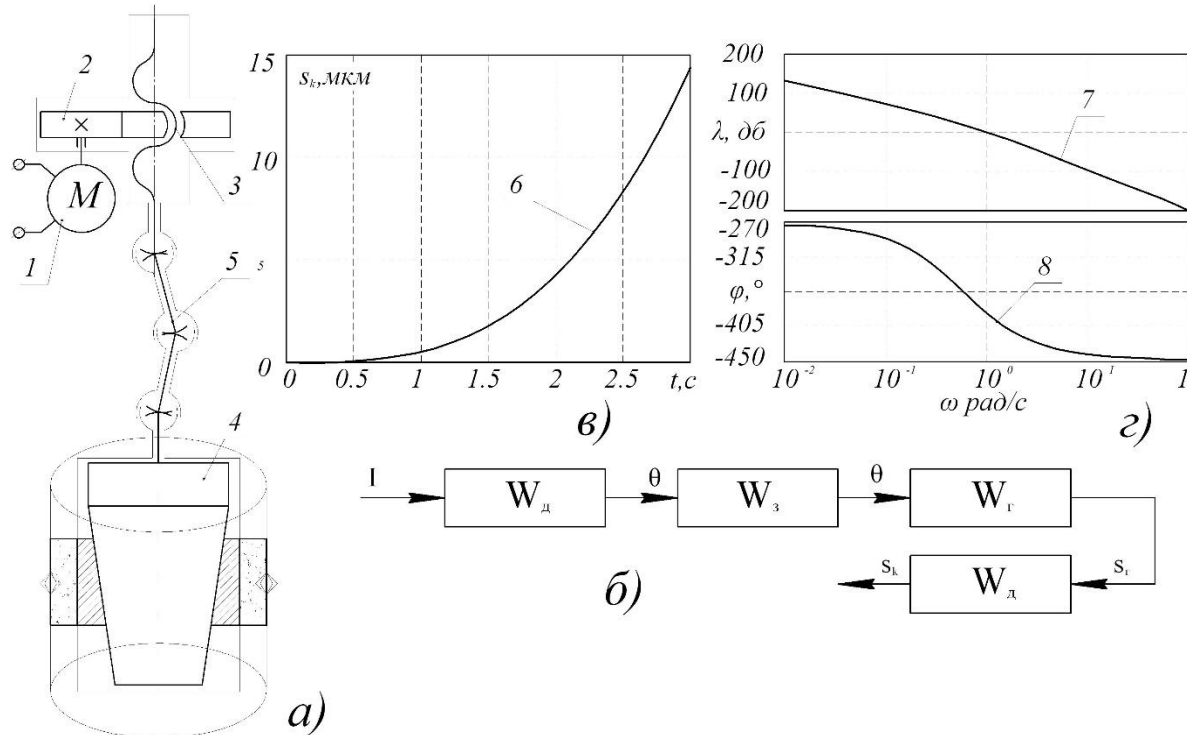


Рис.7 Електромеханічна СРРР та характеристика перехідного процесу

а) конструктивна схема; б) структурна схема; в) перехідна

характеристика; г) логарифмічно-частотні характеристики;

1 – електричний кроковий двигун; 2 – зубчата кінематична пара; 3 – гвинтова кінематична пара; 4 – клинова кінематична пара; 5 – шарнірна підвіска; 6 – перехідна характеристика вихідної величини $s_k = f(t)$; 7 – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика; 8 – логарифмічна фазово-частотна характеристика;

Джерело: сформовано автором самостійно

Окрім крокового електродвигуна, вже відомо рівняння передавальних функцій кінематичних пар в динаміці. Визначимо передавальну функцію крокового електродвигуна в динаміці.

Електричний кроковий двигун 1 (в подальшому ЕКД). Він представляє різновид синхронного електричного двигуна, обмотка керування, якого збуджується багатозафазовою системою прямокутних імпульсів [286,287].

Складемо рівняння обертового моменту, який створюється на валу ЕКД [286].

$$M_{ед} = M_s(\theta) + \beta \frac{d\theta'}{dt} \quad (3)$$

де: M_s – синхронізуючий момент ЕКД;

θ – геометричний кут повороту валу ЕКД;

β – коефіцієнт демпфування, обумовлений протидією обертанню, вихровими токами та статичним і кінематичним тертям;

$\frac{d\theta'}{dt}$ - кутова швидкість валу КД, перша похідна від кута пороту;

Рівняння 3 вказує на залежність синхронізуючого моменту від кута повороту, ця залежність буде змінюватися від конкретно обраного типу ЕКД.

Виведемо рівняння передавальної функції ЕКД.

$$i = \frac{M_{ед}}{M_s(\theta) + \beta \frac{d\theta'}{dt}} \quad (4)$$

Приведені рівняння описують ЕКД в статичі. Для більш детального аналізу необхідно розглянути ЕКД в динаміці.

Для аналізу ЕКД в динаміці необхідно скласти рівняння рівноваги в динаміці.

$$J \frac{d\theta'}{dt} = M_s(\theta) + \frac{d\theta'}{dt} \beta \quad (5)$$

де: J – момент інерції;

M_c – момент опору на валу ЕКД.

Визначимо передавальну функцію ЕКД в динаміці з врахуванням перетворень за Лапласом з початковими нульовими умовами.

$$W = \frac{\theta}{M_s} = \frac{\frac{1}{\beta}}{\left(\frac{J}{\beta}p+1\right)} \quad (6)$$

Після визначення всіх типів ланок та їх характеристичних рівнянь складемо загальне рівняння передавальної функції електромеханічної СРРР.

$$W_E = \frac{s_k}{\theta} = \frac{1}{tg\alpha(mkp^2 + \mu kp)} * \frac{i_z}{(J_z + \mu z)p} * \frac{\mu z}{0.5m\epsilon dtg\psi p} * \frac{\beta^{-1}}{\frac{J_o}{\beta} p + 1} \quad (7)$$

Опираючись на рівняння передавальних ланок та знаючі принцип дії електромеханічної CPPP складемо структурну схему де вкажемо всі зв'язки та недоліки (рис.7,б).

Для подальшого дослідження необхідно визначитися з значеннями сил та інших складових. Зведемо всі дані до таблиці 5.

Маючі необхідні дані побудуємо перехідну характеристику (рис.7,в), та логарифмічні характеристики (рис.7,г) електромеханічної CPPP.

Таблиця 5

Зміні параметри, одиниця виміру	Двигун	Зубчата передача	Гвинтова та клинова передача
J, Н м	1*	-	-
B	0,3	-	-
μ_z	-	0,3	-
A _з , Н м	-	1*	-
$\psi, ^\circ$	-	-	4,5
r _г , мм	-	-	8
A _к , Н м	-	-	1*
m _г , кг	-	-	1*
m _к , кг	-	-	1*
k _q	-	-	0.3
f _x	-	-	0.8
U _Σ , мм ²	-	-	342
M	-	-	0,3

* - так, як не відомо за яким законом буде визначатися дані параметри. Доцільно для їх визначення використати метод апроксимації, що дозволить виразити параметри в пропорційній залежності у вигляді прямої. Значення даних параметрів будуть визначатися тангенсом кута, між прямою та її проекцією на вісь. Умовно прийнемо, що тангенс кута буде дорівнювати 45°, а як відомо $\text{tg}45^\circ=1$.

Перехідна характеристика електромеханічної CPPP рис.7, в вказує на не лінійність вихідної дії, а саме зміни величини контактного тиску алмазно-абразивних брусків на оброблювану поверхню $p_k=f(t)$, що обумовлено наявністю інерційності, це пов'язано з наявністю елементів тертя в ланках. Наявність інерційності призводить до неспівпадіння з вхідною дією $\theta=f(t)$. Утворене розузгодження вхідної θ та вихідної дії p_k призводить до утворення не сталого (імпульсного) руху, що погіршує її точність регулювання радіального розміру.

Причиною обумовленого явища є наявність статичного та кінетичного тертя з нелінійною характеристикою в зоні малих переміщень

Отримані логарифмічні частотні характеристики (рис.7 ,г) свідчать про те, що процес функціонування не відповідає умовам сталості. Це підтверджується тим, що крива зміни фази перетинає раніше границю сталості 3 ніж крива зміни амплітуди перетинає границю сталості 4. Обумовленість не сталого функціонування викликане наявністю елементів тертя в ланках електромеханічної СРРР.

Гідравлічна СРРР (рис. 8) [274-276, 282] складається з золотникового гідророзподільника 3, гідравлічного циліндру 2 та клинної кінематичної пари 1.

Визначимо передавальну функцію гідравлічної СРРР, для цього перемножимо передавальну функцію клинної кінематичної пари та гідравлічної ланки. Слід зазначити, що передавальна функція гідравлічної ланки описує дію гідравлічного циліндру та золотникового гідророзподільника в умовах перехідного режиму.

$$W_r = \frac{s_k}{z_3} = \frac{1}{tg\alpha(mkp^2 + \mu kp)} * \frac{(k_x / U_p)}{\left(\left[\frac{1}{U_p} \sqrt{\frac{V_{mp}}{2E}} \right]^2 p^2 + \frac{k_o}{U_p} \sqrt{\frac{mpE}{2V}} p + 1 \right)} \quad (8)$$

Опираючись на рівняння передавальних ланок та знаючі принцип дії гідравлічної СРРР складемо структурну схему (рис.8, б) де вкажемо всі зв'язки та недоліки.

Для подальшого дослідження необхідно визначитися з значеннями сил та інших складових гідравлічної СРРР. Зведемо всі дані до таблиці 6

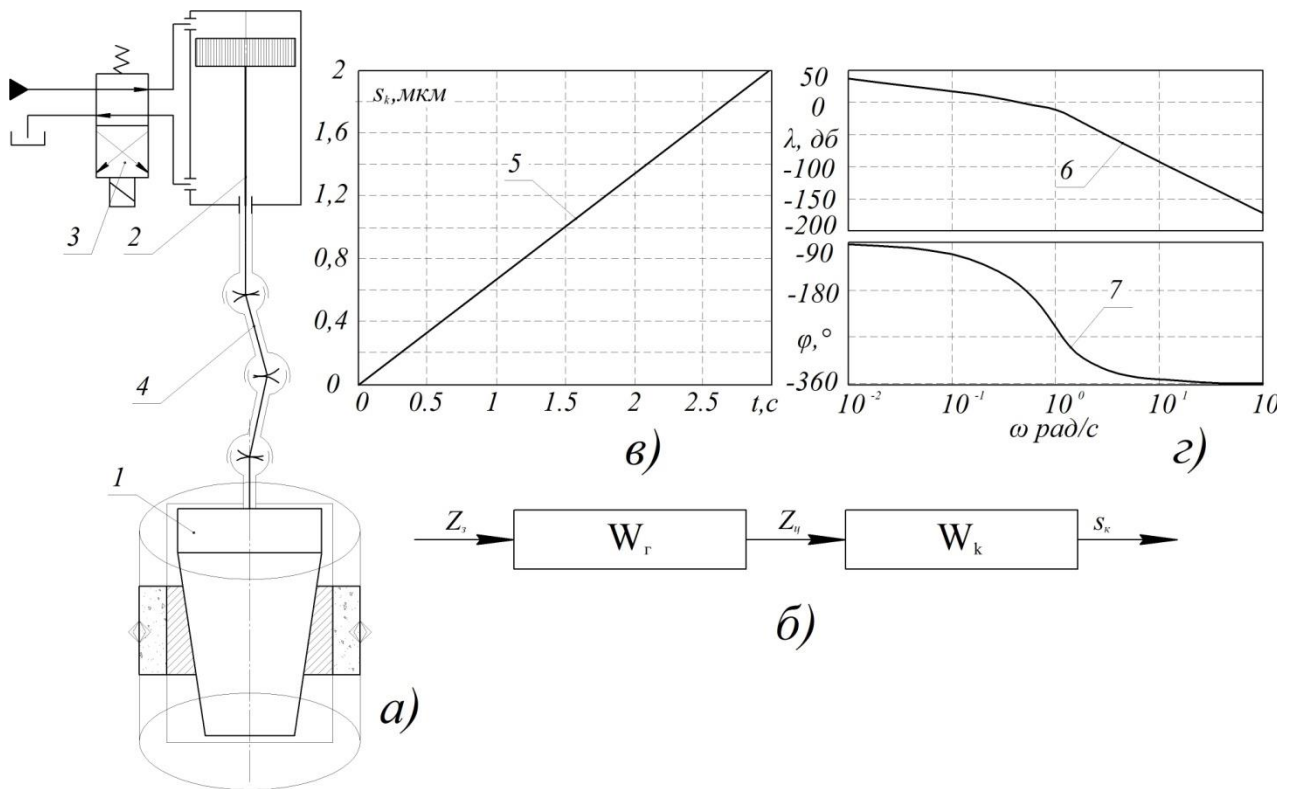


Рис. 8 Гідравлічна СРРР та характеристика перехідного процесу а) конструктивна схема; б) структурна схема; в) перехідна характеристика; г) логарифмічно-частотні характеристики;

1 – клинова кінематична пара; 2 – гідроциліндр; 3 – гідророзподільник; 4 – шарнірна підвіска; 5 – перехідна характеристика вихідної величини $p_k = f(t)$; 6 – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика; 7 – логарифмічна фазово-частотна характеристика.

Джерело: сформовано автором самостійно

Таблица 6

Зміни параметри, одиниця виміру	Гідравлічний циліндр	Клинова передача
$f, \text{мм}^2$	1*	-
$V, \text{мм}^3$	1*	-
$E, \text{МПа}$	10	-
$m_n, \text{кг}$	1*	-
$m_k, \text{кг}$	-	1*
k_q	-	0.3
f_x	-	0.8
$U_\Sigma, \text{мм}^2$	-	342
μ	-	0,3

* - так, як не відомо за яким законом буде визначатися дані параметри. Доцільно для їх визначення використати метод апроксимації, що дозволить виразити параметри в пропорційній залежності у вигляді прямої. Значення даних параметрів будуть визначатися тангенсом кута, між прямою та її проекцією на вісь. Умовно приймемо, що тангенс кута буде дорівнювати 45° , а як відомо $\text{tg}45^\circ=1$.

На основі приведених даних та рівняння передавальної функції побудуємо перехідну характеристику (рис. 8, в) та логарифмічно частотні характеристики (8, г) гідравлічної СРРР. На основі вказаних характеристик визначимо наявність скачко-подібного руху та умов сталого функціонування.

Перехідна характеристика гідравлічної СРРР (рис.8, в) вказує на не лінійність вихідної дії, а саме зміни величини контактного тиску алмазно-абразивних брусків на оброблювану поверхню $p_k=f(t)$, що обумовлено наявністю інерційності в ланка СРРР, що пов'язано з наявністю елементів тертя, а саме статичної та кінетичної енергії з нелінійною характеристикою. Наявність інерційності призводить до неспівпадіння з вхідною дією $Z_3=f(t)$ у вигляді переміщення золотника гідророзподільника. Утворене розузгодження вхідної Z_3 та вихідної дії p_k призводить до утворення не сталого руху, що погіршує її точність регулювання радіального розміру.

Отримані логарифмічні частотні характеристики гідравлічної СРРР (рис.8, г) свідчать про те, що процес функціонування не відповідає умовам сталості. Це підтверджується тим, що крива зміни фази перетинає раніше границю сталості 3 ніж крива зміни амплітуди перетинає границю сталості 4. Обумовленість не сталого функціонування викликане наявністю елементів тертя в ланках гідравлічної СРРР.

Найбільш ефективним є здійснення процесу хонінгування в умовах адаптації, оскільки саме в такому режимі система регулювання радіального розміру (СРРР) здатна найбільш адекватно реагувати на фактичні геометричні відхилення оброблюваного отвору. Адаптивне керування дозволяє автоматично враховувати реальні умови формоутворення, зокрема зміну припуску, відхилення форми, знос інструмента, а також інші фактори, які важко точно передбачити на етапі програмування.

Для здійснення аналізу сталості роботи СРРР в умовах адаптації необхідно провести класифікацію традиційних адаптивних систем керування (АСК) процесом хонінгування отворів та побудувати алгоритми їх роботи. Існуючі

АСК, залежно від поставленої задачі та методів її розв'язання, реалізують різні закони керування і поділяються на три основні типи:

- Адаптивні системи функціонального регулювання (АСФР) — керувальна дія є функцією одного або кількох параметрів системи. Такі системи змінюють свої режими залежно від відхилення контрольованих величин від заданих значень.
- Адаптивні системи екстремального регулювання (АСЕР) — забезпечують підтримання граничного значення одного чи кількох параметрів системи. Їхня робота базується на пошуку та утриманні оптимальних умов за обраним параметром (наприклад, крутним моментом або тиском).
- Адаптивні системи оптимального регулювання (АСОР) — враховують комплексний критерій оптимальності, який включає сукупність декількох факторів. На основі цього критерію здійснюється коригування параметрів керування для досягнення найкращих технологічних показників.

Визначальними факторами, що впливають на роботу АСК, є характер вхідного та вихідного сигналів. Для повноцінного аналізу важливо дослідити шлях перетворення вхідного сигналу у вихідний, оскільки саме цей шлях визначає швидкодію та точність реакції системи на зміни технологічних умов. Для забезпечення надійного функціонування АСК повинні відповідати низці вимог: чітка визначеність вхідних та вихідних параметрів; можливість їх точного вимірювання та регулювання в заданих межах; наявність стійкої кореляційної залежності між вхідними та вихідними сигналами (лінійної або нелінійної); стабільність цієї залежності за відсутності або мінімальних коливань гістерезису; оснащеність системи необхідними елементами — чуттєвими, порівняльними, підсилювальними, виконавчими та корегуючими.

Чуттєві елементи вимірюють відхилення регульованих параметрів від заданих значень або реагують на збурення, перетворюючи їх у керувальний сигнал. Елементи порівняння виконують операцію віднімання або співставлення фактичних і заданих величин. Підсилювальні елементи, використовуючи енергію стороннього джерела, збільшують потужність керувальних сигналів.

Виконавчі елементи безпосередньо впливають на регулюючі органи об'єкта керування, реалізуючи сформовані сигнали. Корегуючі елементи вводяться для надання системі додаткових властивостей, необхідних для забезпечення заданих режимів регулювання, наприклад компенсації інерційності чи підвищення стійкості.

На основі зазначених принципів побудовані алгоритми роботи різних типів АСК, що застосовуються у процесі хонінгування. На рисунку 9, а наведено алгоритм стабілізації крутного моменту з використанням корегуючого пристрою та СРРР на базі черв'ячно-гвинтової передачі з електроприводом адаптивного керування. Рисунок 9, б ілюструє алгоритм роботи гідравлічної системи програмного регулювання тиску інструмента в радіальному напрямку та СРРР на базі рейково-кулачкової передачі з гідроприводом адаптивного керування. На рисунку 9, в представлено алгоритм системи автоматичного керування з використанням гідравлічного циліндра прямої дії з дросельним адаптивним керуванням. Рисунок 9, г демонструє алгоритм адаптивної системи керування за струмом, спожитим електродвигуном головного приводу, з використанням СРРР на базі гідроциліндра прямої дії та електрогіддорозподільника адаптивно-програмного керування. Алгоритм роботи системи керування електроприводом з адаптацією по шляху та СРРР на базі зубчато-гвинтової передачі зображено на рисунку 10.

Аналіз наведених алгоритмів показує, що перші чотири системи мають подібну логіку роботи та відносно просту структуру, характеризуються наявністю одного вхідного та одного вихідного параметра. Проте слід зазначити, що майже всі вони функціонують у різноманітних середовищах — гідравлічному, електричному та механічному — що може призводити до коливань системи та зниження її швидкодії при зміні технологічних умов. П'ята система має складнішу структуру, оскільки оперує кількома вхідними (сигнал від таймера, поточні координати інструмента) та вихідними параметрами (пройдений шлях, подача). Також вона працює в декількох функціональних середовищах, що ускладнює її налаштування та забезпечення стабільності.

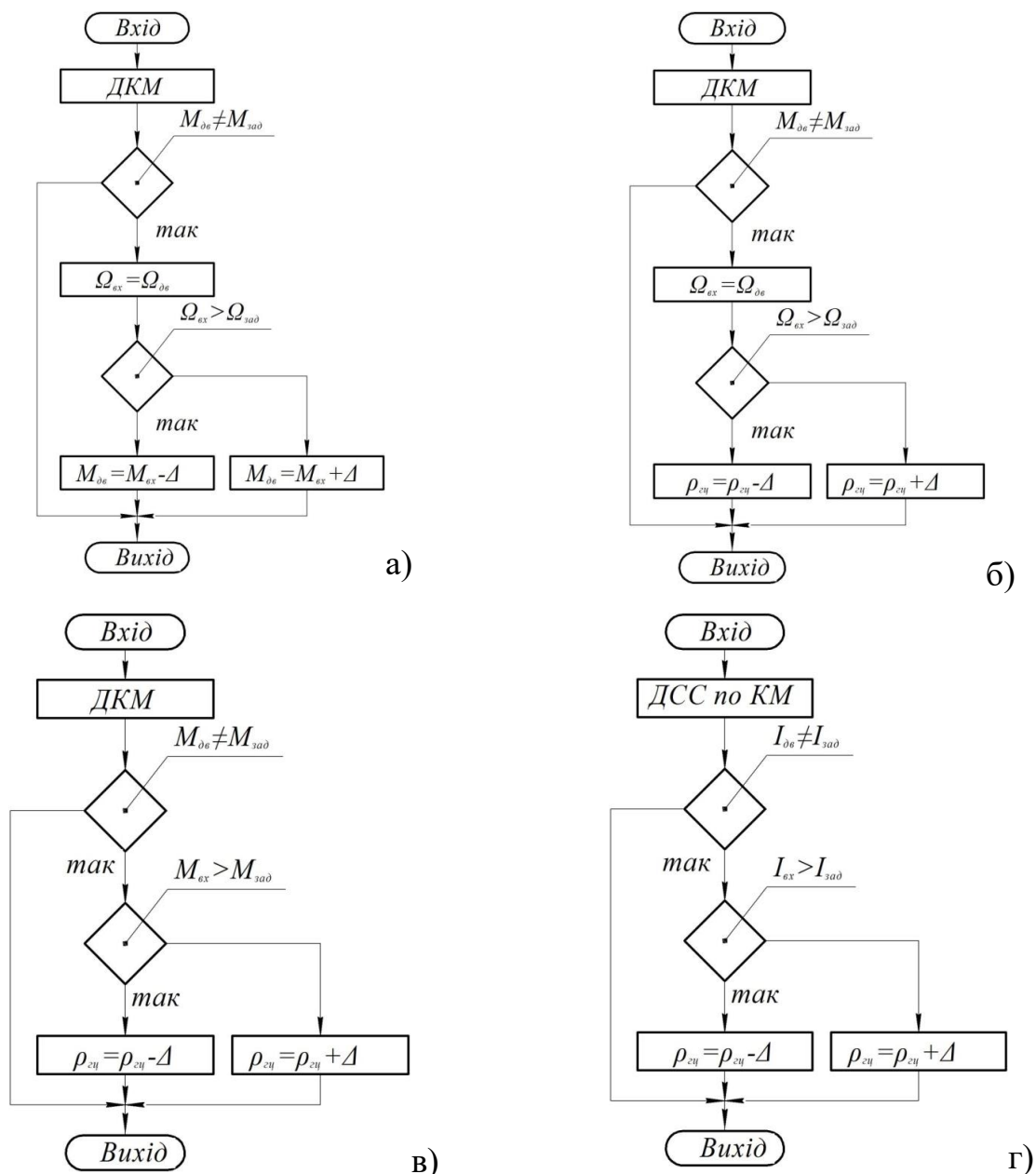


Рис. 9 Алгоритм роботи

а) система стабілізації крутного моменту з пристроєм корегування та СРРР на базі черв'ячно-гвинтової передачі з електроприводом адаптивного керування; б) гідравлічної системи програмного керування тиском інструменту в радіальному напрямку та СРРР на базі рейково-кулачкової передачі з гідроприводом адаптивного керування; в) системи автоматичного керування та СРРР на базі гідравлічного циліндра прямої дії з дросельним адаптивним керуванням; г) адаптивної системи по струму, спожитого електричним двигуном головного приводу та СРРР на базі гідроциліндра прямої дії з електрогіддорозподільником адаптивно-програмного керування

ДКМ – датчик крутного моменту; $M_{дв}$ – момент на двигуні головного приводу; $M_{зад}$ – заданий крутний момент; $M_{вх}$ – відхилення крутного моменту; $\Omega_{вх}$ – вхідний сигнал зміни опору; $\Omega_{дв}$ – опір двигуна; $\Omega_{зад}$ – заданий опір; $\rho_{гц}$ – тиск в гідросистемі СРРР; Δ – прирощення тиску в гідросистемі СРРР; ДСС по КМ – датчик сили струму по крутному моменту; $I_{дв}$ – сила струму на двигуні головного приводу; $I_{зад}$ – задана сила струму; $I_{вх}$ – відхилення сили струму; $\rho_{гц}$ – тиск в гідросистемі СРРР.

Джерело: сформовано автором самостійно

Отже, головним недоліком розглянутих систем є робота в різномірних функціональних середовищах, що ускладнює забезпечення високої стабільності та швидкодії. Після побудови алгоритмів роботи доцільно класифікувати існуючі адаптивні системи керування процесом відділкової алмазно-абразивної обробки та звести результати в таблицю 7, яка дозволить систематизувати наявні рішення та виявити їх переваги й недоліки.

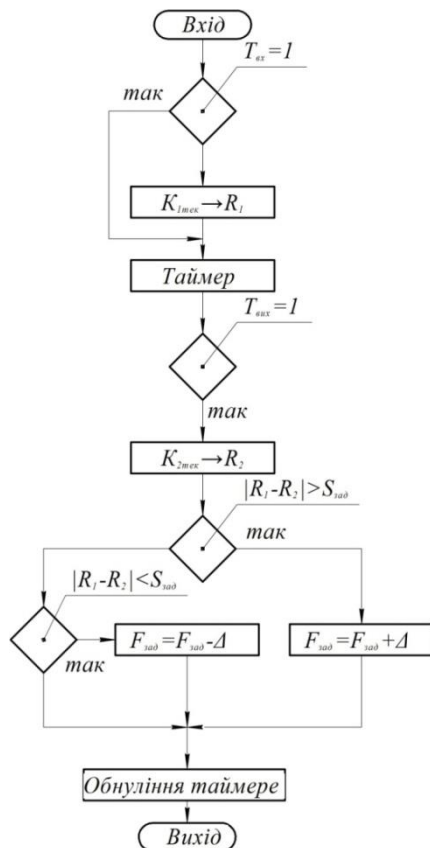


Рис. 10 Алгоритм роботи системи керування електричним приводом з адаптацією по шляху та СРРР на базі зубчато-гвинтової передачі з електроприводом адаптивно-програмного керування

$T_{вх}$ – входной сигнал таймера; $T_{вих}$ – вихідний сигнал таймера; $K_{1тек}$ – поточне значення координат інструменту; $K_{2тек}$ – кінцеве значення координат інструменту; R_1, R_2 – регістри загального призначення; $S_{зад}$ – задане значення шляху, який повинен пройти СРРР за час витримки таймеру; $F_{зад}$ – задане значення подачі; Δ – прирощення подачі;
Джерело: сформовано автором самостійно

Традиційні конструктивні схеми СРРР, що працюють в режимі програмного керування підналадкою не забезпечують достатньої точного регулювання радіального розміру у зв'язку з наявністю інерційності в умовах перехідного процесу.

Традиційні схеми адаптивного керування підналадкою в процесі хонінгування не забезпечують достатньої точного реагування на зміні умови різання.

Причинами інерційності СРРР є наявність непостійної сили кінетичного тертя і зміна сили статичного тертя, що є джерелом помилок регулювання розміру.

Традиційні конструктивні схеми СРРР використовують для функціонування вхідні і вихідні сигнали, які здійснюються в різномірних функціональних середовищах, а саме:

- електричних;
- гідравлічних;
- механічних.

Таблиця 7

Викона.	Тип вхідного сигналу	Тип ланки зворотного зв'язку	Вихідний сигнал СРРР		
			Привід	Передавальна ланка	Кінцева ланка
	2	3	4	5	6
АСК з адаптацією по крутному моменту на шпинделі виробу [271]					
	Зміна сили струму котушки індуктивності датчика крутного моменту	Перетворення електричного вхідного сигналу і подачі його в електричну обмотку крокового двигуна	Перетворення сили току в кутове переміщення ротору крокового двигуна	Перетворення в лінійне кутового переміщення черв'ячно-гвинтовою передачею	Лінійне радіальне переміщення алмазно-абразивних брусків за рахунок клинкової передачі
	Зміна сили струму котушки індуктивності крутного моменту	Перетворення електричного вхідного сигналу і подача його в обмотку керуючого гідророзподільника і дроселю зливної магістралі.	Перетворення об'ємної подачі робочої рідини в лінійне переміщення поршня гідроциліндру.	Перетворення в лінійне кутового переміщення рейково-кулачковою передачею	Лінійне радіальне переміщення алмазно-абразивних брусків за рахунок клинкової передачі.
АСК з адаптацією по крутному моменту на шпинделі інструмента [272]					
	Змінна сила току в обмотці асинхронного електродвигуна	Перетворення електричного вхідного сигналу і подача його в обмотку керуючого гідророзподільника і дроселю зливної магістралі	Перетворення об'ємної подачі робочої рідини в лінійне переміщення поршня гідроциліндру	Відсутня	Лінійне радіальне переміщення алмазно-абразивних брусків за рахунок клинкової передачі.

Така різноманітність допомагає утворенню інерційності значення сигналів при переході від одного функціонального середовища до іншого і зниженню точності регулювання.

Глибокий системний аналіз конструктивно-функціональних схем систем регулювання радіального розміру (СРРР) у процесі хонінгування виявляє низку фундаментальних науково-технічних обмежень, які визначають необхідність кардинального вдосконалення прецизійної обробки отворів. Ключовою проблемою традиційних СРРР, що ґрунтуються на клиновому механізмі як кінцевій ланці, є наявність фрикційної інерційності, яка виникає внаслідок функціонування в режимі мікропереміщень за умов статичного та кінетичного тертя, стаючи основним джерелом несталої роботи та помилок регулювання. Цей режим роботи в зоні граничного тертя при малих швидкостях переміщення (від часток мікрона до кількох мікрометрів) неминуче призводить до переривчастого (стрибкоподібного) руху кінцевої ланки, що критично знижує точність позиціонування. Крім того, силова схема традиційної кінцевої ланки реалізує дискретне силове замикання, і через незворотність клинної передачі при припиненні осьового зусилля створюється так званий "силовий люфт", який є проявом дискретності імпульсу осьової сили та постійної роботи системи у перехідному процесі. Динамічний аналіз електромеханічних та гідравлічних СРРР підтверджує їхню нестабільність та недостатню швидкодію, оскільки їхні перехідні характеристики вказують на нелінійність вихідної дії (зміни контактного тиску) та значну інерційність, викликану тими ж елементами тертя. Отримані логарифмічні частотні характеристики чітко свідчать про те, що процес функціонування цих систем не відповідає умовам сталості, оскільки крива зміни фази перетинає межу сталості раніше, ніж крива зміни амплітуди, підтверджуючи нестійке функціонування через елементи тертя. Це у свою чергу робить інтеграцію традиційних СРРР в адаптивні системи керування (АСК) вкрай неефективною; їхні обмежені динамічні властивості та фрикційна інерційність унеможливають достатньо точне реагування на змінні умови різання. Більше того, робота традиційних АСК у різноманітних функціональних

середовищах – електричному, гідравлічному та механічному – посилює проблему інерційності сигналів і знижує загальну точність регулювання. Виходячи з цих недоліків, подальший розвиток вимагає розроблення нового покоління інструментальних СРРР, які повинні мінімізувати кількість кінематичних ланок, забезпечуючи стабільну роботу та подолання фрикційної інерційності без істотного ускладнення структури. Перспективним напрямком є реалізація принципу диференціації рухів між інструментом і заготовкою, що дозволить спростити конструкцію верстата, підвищити його технологічну гнучкість та забезпечити осциляційні рухи за допомогою простіших механізмів, підвищуючи загальну ефективність процесу хонінгування.

SECTION 10. SEA AND INLAND WATERWAY TRANSPORT

DOI: 10.46299/XXX-XXX-XXX.10.1

10.1 Удосконалення локальних інформаційних зв'язків системи управління навігаційною безпекою руху морського судна

АНОТАЦІЯ

Широке використання берегових радіолокаційних систем для забезпечення безпеки плавання створює умови для вирішення багатьох завдань і забезпечення взаємодії суден між собою і береговими системами управління рухом суден (СУРС). Однак аналіз численних аварій, які відбуваються в зоні відповідальності СУРС, показує, що при наявності небезпеки зіткнення між суднами в морі, берегові системи не виявляють надмірного зближення між ними, а якщо і виявляють його, то зі значним запізненням. Як впливає з аналізу аварійності та вивчення процесів маневрування, існуюча практика забезпечення безпеки руху має цілу низку недоліків. Відсутня база декларативних даних про маневрені властивості, недостатньо розроблена концепція прогнозування та планування заданого алгоритму системи управління, а методика планування морських операцій відсутня взагалі. Також відсутня систематизована концепція коригування руху при змінних обмеженнях, недостатнє інформаційне забезпечення про поточні параметри руху та їх відповідність плановим, відсутні системи підтримки прийняття рішень.

Оскільки посилення інтеграції передових технологій у морські інформаційно-навігаційні системи збільшило ризики кібербезпеки суден, особливо з розвитком автономних суден, в роботі звернено увагу на наступні проблеми: 1. Порушення роботи суднового обладнання: кібератаки можуть зупинити операції, ставлячи під загрозу розклад рейсів і цілісність ланцюжка поставок. 2. Порушення конфіденційності: у зв'язку з посиленням правил захисту даних відсутність захисту судової інформації може призвести до юридичних наслідків. 3. Викрадена конфіденційна інформація: конфіденційні комерційні

секрети та конфіденційні дані можуть потрапити в руки злочинців.

4. Пошкодження репутації: порушення може підірвати довіру клієнтів і довіру морської галузі. 5. Фінансова турбулентність: успішна кібератака на суднові інформаційно-навігаційні системи часто призводить до серйозних фінансових втрат для судноплавних компаній, а також накладання штрафів.

Згідно з опитуванням компанії NSSLGlobal, 84% членів екіпажів або взагалі не проходили навчання з кібербезпеки, або отримували лише поверхневі знання з цього питання. Близько 64% опитаних моряків беруть на себе відповідальність за безпеку інформаційно-навігаційних систем на борту судна. Як з'ясувалося, роботодавці не допомагають морякам розібратися, з якими ризиками вони можуть зіткнутися і як їх можна запобігти.

Відповідно до Рекомендації МАКО щодо кіберстійкості №166 (Міжнародна асоціація класифікаційних товариств) представлено аналіз категорій I, II, III суднових інформаційно-навігаційних систем та ступені їх вразливості щодо кібератак.

На основі інтегрального багатофакторного критерію узгодженості психофізіологічних характеристик діяльності оператора та факторів руху судна здійснено кількісну оцінку безпеки маневрування, яка включає не менше п'яти факторів руху та чотирьох характеристик операторської діяльності.

Розроблений в дослідженні алгоритм організації процесу маневрування, який полягає в пошуку відповідності між вихідними даними та необхідними засобами, дозволяє досягти безпечного процесу управління судном. Також запропоновано способи захисту навігаційного обладнання від кіберзагроз.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ММО	Міжнародна морська організація
AIS	Автоматична ідентифікаційна система
МПЗС-72	Міжнародні Правила запобігання зіткненню суден у морі
GPS	Система глобального позиціонування
ОТ	Операційні технології
СУРС	Система управління рухом суден
ІТ	Інформаційні технології
СУКБ	Система управління кібербезпекою
МАКО	Міжнародна асоціація класифікаційних товариств
ЛО	Людина-оператор
ECDIS	Електронна картографічна навігаційно-інформаційна система
ARPA	Засіб автоматизованої радіолокаційної прокладки
РЛС	Радіолокаційна станція
$K_{ржа}$	Коефіцієнт ранжування за аналізаторами
$K_{ржз}$	Коефіцієнт ранжування за збоєм при зберіганні та обробці інформації
$K_{ржі}$	Коефіцієнт ранжування за швидкістю виконання інтелектуальних функцій
$K_{ржм}$	Коефіцієнт ранжування за результатом моторних помилок
$K_{ан}$	Узагальнений локальний критерій узгодженості інформаційного аналізу
$K_{пам}$	Узагальнений локальний критерій узгодженості пам'яті та мислення
$K_{фун}$	Узагальнений локальний критерій узгодженості швидкості та надійності виконання інтелектуальних функцій
$K_{ант}$	Узагальнений локальний критерій узгодженості антропометрії
$K_{узг}$	Глобальний критерій узгодженості
$K_{ржс}$	Коефіцієнт ранжування помилок оператора
$K_{лок}$	Локальний коефіцієнт узгодженості
$K_{ржмп}$	Коефіцієнт ранжування за результатами моторних помилок

ВСТУП

Навігаційне забезпечення безпеки плавання суден морського транспортного флоту здійснюється стандартними методами із застосуванням практично однакових за своїми характеристиками навігаційних приладів – курсопоказчиків, відносних лагів і засобів для визначення місця.

Обладнання суден гірокомпасами, електронними відносними та гідроакустичними абсолютними лагами, радіонавігаційними системами, засобами радіолокації, глобальними супутниковими навігаційними системами, інтегрованими навігаційними системами, системами управління курсом і траєкторією судна, електронними картографічними навігаційно-інформаційними системами викликало істотні зміни в методах судноводіння, проте до якісного стрибка – до повної передачі машині управлінських функцій – поки не призвело. Це пояснюється тим, що методи судноводіння та принципи організації штурманської служби на судах об'єктивно відстають від розвитку технічних засобів навігації та управління. Сучасне судноводіння залишається діяльністю людини в умовах підвищеної небезпеки. Ускладнення діяльності сучасного судноводія пов'язане з розвитком мережі портів і морських шляхів, збільшенням загальної кількості суден, їх водотоннажності, розмірів і швидкостей, збільшенням щільності судноплавства та появою високотехнологічних інформаційно-навігаційних систем.

Навігаційні небезпеки – це природні та штучні об'єкти, розташовані на поверхні та в глибинах світового океану, що становлять для судна реальну загрозу. До природних небезпек належать: берегова лінія, стиснені акваторії портів, мілини, банки, рифи, скелі тощо. До штучних слід віднести: гідротехнічні споруди, звалища ґрунту, ряжі, бурові та промислові вишки, платформи, опори та лінії високовольтних передач, мінні та бічні загородження, протичовнові та рибальські мережі тощо.

Попередження навігаційних аварійних випадків у морі та на внутрішніх водних шляхах спочатку забезпечується веденням спостереження, а потім

керуванням судном, що здійснюється з метою попередження зіткнення суден, удару, навалів, посадки на мілину.

Спостереження – сукупність застосування засобів і способів пошуку, виявлення та класифікації об'єктів зовнішнього середовища з метою ефективного та безпечного управління судном.

Управління – прийняття рішення щодо збереження або зміни параметрів руху судна (курсу, швидкості), віддача відповідних команд, подача сигналів, їх виконання та контроль за виконанням.

Спостереження з метою попередження аварійних ситуацій з судном на внутрішніх водних шляхах або зіткнення суден у морі виконується для повної оцінки ситуації, в якій знаходиться власне судно. При цьому змістом спостереження є збір, обробка та аналіз інформації про зовнішні та внутрішні фактори, що впливають на стан судна та розвиток існуючої ситуації.

У всіх випадках першочергове завдання спостереження полягає у визначенні, чи існує небезпека зіткнення або іншої аварійної ситуації чи кібератаки. Коли у судноводія існують сумніви щодо безпечного розвитку наявної ситуації, слід вважати, що її розвиток веде до зіткнення суден, удару, навалу, посадки на мілину, кіберзлочину або іншої аварійної події.

Візуальне спостереження здійснюють особи ходової вахти, а також лоцман, який знаходиться на борту. Воно повинно бути безперервним, кваліфікованим і надійним.

До візуальних засобів спостереження відносяться оптичні пеленгатори, біноклі, підзорні труби, оптичні далекоміри і прожектори.

За допомогою зорового спостереження реалізуються лоцманські способи судноводіння, що базуються на окомірній оцінці положення судна щодо судноплавної обстановки та небезпек, оскільки зорові засоби та способи дозволяють отримати інформацію в явному вигляді, безпосередньо оцінити обстановку та прийняти необхідне рішення.

Лоцманські способи судноводіння на сучасному етапі використовують і технічні засоби спостереження: суднові радіолокаційні станції (РЛС),

автоматичну ідентифікаційну систему (AIS), електронну картографічну навігаційно-інформаційну систему (ECDIS) і ехолоти.

Радіолокаційне спостереження включає: виявлення об'єктів, визначення їх положення відносно судна і визначення ступеня небезпеки. Радіолокаційне спостереження незамінне в умовах обмеженої видимості та плавання в обмежених умовах. Однак інформація від РЛС щодо рухомих об'єктів проявляється в неявній формі, а тому потребує обробки, тобто ведення радіолокаційної прокладки. Радіолокаційна прокладка передбачає: визначення елементів руху об'єктів (цілей) і їх відносних курсів, визначення ступеня небезпеки і її кількісну оцінку, розрахунок маневру безпечного розходження і контроль за його виконанням. Радіолокаційна прокладка здійснюється способами графічного вирішення задач, що теоретично базуються на методі відносного руху: вручну (за допомогою маневреного планшета), а також за допомогою засобів автоматизації ведення радіолокаційної прокладки (ARPA). Загальним недоліком засобів і способів ведення прокладки є те, що в них закладена гіпотеза про сталість елементів руху цілей після їх визначення.

Виходом із ситуації, що склалася, стало впровадженням AIS, тобто систем з активною відповіддю, що містять інформацію про елементи руху судна, його класифікацію та стан відповідно до МПЗЗС-72 (Міжнародні Правила запобігання зіткненню суден у морі). Це виключає необхідність визначення елементів руху цілей і прискорює появу інформації в явному вигляді з високим ступенем достовірності.

Навігаційна безпека на суднах забезпечується комплексом заходів, до яких слід віднести:

- професійну підготовку судноводіїв;
- технічну справність технічних засобів навігації та зв'язку;
- наявність необхідного комплексу скоригованих навігаційних карт, посібників та довідників для плавання;
- знання та врахування судноводіями навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умов плавання;

- чітку організацію та виконання процедур несення ходової вахти;
- суворе виконання правил плавання та МПЗЗС;
- безперервний контроль місцезнаходження судна.

Слід додати, що на судноводіїв, крім забезпечення навігаційної безпеки, покладено обов'язки з контролю за остійністю і непотоплюваністю суден, їх вибухо- та пожежною безпекою.

Таким чином, процес морського судноплавства, а особливо судноплавство на внутрішніх водних шляхах, складний і динамічний, пов'язаний зі значною кількістю об'єктивних і суб'єктивних факторів.

Відповідно до чинного законодавства підготовка штурманів на даний час проводиться за державними стандартами, розробленими для цивільних судноводіїв. Тому можна вважати однаковими і рівні теоретичної підготовки у військових і цивільних морських навчальних закладах. Відрізняються тільки терміни практичної підготовки: курсанти цивільних інститутів судноводіння практикуються на суднах майже в п'ять разів більше за часом, ніж курсанти військово-морських інститутів.

Ідентичність можливостей штурманських приладів і структури спеціальної штурманської підготовки у військових і цивільних навчальних закладах дозволяє використовувати і в якійсь мірі узагальнювати досвід забезпечення навігаційної безпеки плавання військових кораблів і суден транспортного флоту.

З огляду на те, що опублікована в пресі статистика аварійності та аналіз її причин стосуються лише морського транспортного флоту, то, використовуючи її, можна зробити більш-менш обґрунтовані висновки і про причини навігаційних аварій суден морського флоту.

Через низьку організацію штурманської служби на судні, через помилки і промахи при вирішенні навігаційних завдань, 80-85% всіх навігаційних аварійних випадків на морському транспорті відбувається з вини судноводіїв.

В основі навігаційних інцидентів лежить порушення вимог керівних документів, що визначають правила і організацію штурманської служби і регламентують її діяльність щодо забезпечення навігаційної безпеки.

Ці порушення відбуваються з двох основних причин: або через низький рівень професійної та психологічної підготовленості командирів і штурманів (невміння вирішувати навігаційні завдання судноводіння, психологічна нестійкість, що призводить до прийняття неправильних рішень), або через безвідповідальне ставлення посадових осіб штурманської служби до виконання своїх обов'язків у морі.

Як показали численні дослідження, велика кількість аварій морських і річкових суден відбувається через вплив людського фактору, тобто внаслідок помилок, допущених при керуванні судном.

За статистикою, маломірні судна є найбільш небезпечними на воді. З метою забезпечення безпеки життя людей, які беруть участь у морському транспортному процесі, а також нормальних умов життєдіяльності екіпажу, міжнародні організації прийняли кілька конвенцій, контроль над виконанням яких покладено в першу чергу на державу. Всі компанії-судновласники, діяльність яких підлягає державній реєстрації, зобов'язані впроваджувати комплекс встановлених захисних заходів відповідно до системи управління безпекою суден, яка в обов'язковому порядку включає охорону навколишнього середовища від забруднення.

Судноплавство, як і інші галузі транспорту (залізничний, авіаційний, комерційний автомобільний транспорт), працює цілодобово безперервно. Встановлені в міжнародних конвенціях Міжнародної морської організації (ІМО) та Міжнародної організації праці (МОП) обмеження тривалості робочого дня та відпочинку вважаються основними вимогами до управління ризиками втоми [306], що встановлюють мінімальні стандарти відповідності міжнародним перевезенням. Чинні нормативні акти допускають максимум 14 годин роботи протягом 24 годин і максимум 72 години роботи протягом 7 днів [307, 308]. Правила ІМО також встановлюють мінімальні періоди відпочинку, які повинні становити не менше 10 годин у будь-який 24-годинний період і 77 годин у будь-який 7-денний період. Період відпочинку можна розділити не більше ніж на два періоди, один з яких повинен бути тривалістю не менше 6 годин [308]. Недавні

дослідження показали, що дотримання цих нормативних вимог у морській галузі, як правило, погане, при цьому спостерігаються відмінності у фактичних і зареєстрованих годинах роботи та відпочинку [309, 310, 311].

Оскільки судноплавство функціонує в умовах високої конкуренції, судновласники та/або оператори змушені прагнути економічної ефективності, іноді за рахунок скорочення кількості членів екіпажу на судні [312]. Оскільки моряки прагнуть впоратися з підвищеними вимогами через зменшення чисельності екіпажу, вони, отже, піддаються більш жорстким умовам роботи [313]. Експлуатаційні аспекти, пов'язані з судноплавством, стають більш проблематичними в порівнянні з іншими галузями з таких причин, як: торгові моделі, довжина морського проходу, ротація портів і короткий період часу, протягом якого судно залишається в порту, і все це сприяє скороченню періодів відновлення моряків. [309, 310]. Все більш інтенсивний характер судноплавних операцій означає, що морякам доводиться працювати довгі і нерегулярні години протягом тривалих періодів часу і часто піддаються; обмежений і переривчастий сон, швидко змінюються зміни, високе навантаження, погані звички харчування, погані умови сну, соціальна ізоляція і відсутність чіткого поділу між роботою і відпочинком [310, 313-316].

Поточні вимоги до судна та умови роботи в морі на даний час розглядаються як проблемні, створюючи ситуацію, яка не дає морякам достатніх можливостей для відпочинку та сну [309, 317, 318]. Найчастіше моряки готові працювати, будучи дуже втомленими, тому що це вважається «професійним». Широко поширена думка про те, що втома «приходить з роботою», хоча і не відноситься до морської галузі, безумовно, поширена в ній, що ускладнює для моряків визнання втоми як проблеми і вжиття відповідних заходів. Це «заганяє» екіпаж у пастку поганої відповідності, оскільки він відчуває себе відповідальним за управління власною втомою на борту судна [318, 319], що робить нинішні підходи до управління втомою неефективними. Отже, використання багаторівневої захисної стратегії для управління пов'язаними з втомою ризиками на морі має вирішальне значення. Це дозволяє справлятися з втомою так само,

як з будь-якою іншою судновою небезпекою, використовуючи підхід, заснований на оцінці ризику, при належній підтримці компанії.

Швидка цифрова трансформація в морській індустрії стає дедалі важливішою темою у питаннях забезпечення інформаційної безпеки (кібербезпеки) в рейсовому циклі морського судна. Збільшення автоматизації та цифровізації дозволяють процесам керування судном бути більш ефективними. Тому, критично важливим завданням з кібербезпеки мореплавання є оптимізація операцій управління судном з використанням нових інформаційних технологій (ІТ) та цифрових рішень [320-321].

Концепції інформаційно-навігаційних систем розроблялися в період низької пріоритетної значущості питань кібербезпеки. Нові типи ризику в морській інфраструктурі успішно досліджуються провідними країнами в галузі кібербезпеки на морі, такими як Норвегія, Великобританія, Франція та США. Особлива увага приділяється розробці застосування методів оцінки ризиків кібербезпеки, моніторингу та виявленню кібератак на морські інформаційні системи [322-323]. Вразливими до кібератак можуть бути наступні системи: навігаційного містка, вантажних операцій, руху та енергетичного менеджменту, керування доступом на судно; обслуговування пасажирів; мережі загального користування; соціального забезпечення екіпажу; радіозв'язку та комунікації. Така вразливість систем насамперед пов'язана з відкритістю каналів передачі інформації, відсутністю або обмеженим шифруванням даних та аутентифікації.

Оскільки супутникова система навігації (GPS) є джерелом даних про місцезнаходження судна, а саме, ECDIS та AIS, її можна відносно легко заглушити. Представлений у науковій роботі [310] SWOT-аналіз («Strengths» – сильні сторони, «Weaknesses» – слабкі сторони, «Opportunities» – можливості, «Threats» – загрози) служби AIS, підтверджує, що ці системи можуть бути легко підроблені, внаслідок чого неминучі негативні наслідки для безпеки судноплавства.

Автоматична ідентифікаційна система є стандартом зв'язку, який використовують судна для передачі інформації про їх місцезнаходження. Однак,

оскільки повідомлення AIS не зашифровані та не автентифіковані, вони можуть бути перехоплені та підроблені зловмисниками, що може призвести до кіберзагроз та ймовірності здійснення кібератак. У дослідженні [324]. запропоновано безпечну, гнучку, відповідну стандарту та зворотно сумісну структуру автентифікації Auth-AIS для захисту широкомовних повідомлень AIS. Вона використовує існуючі надійні криптографічні інструменти, включаючи TESLA та фільтри Блума на основі їх якості безпеки сумісності технології AIS.

Основні недоліки суднових інформаційних систем безпеки показані в роботі [325]. Нещодавні інциденти, вразливості та загрози, що стосуються кіберсистем сучасних суден, є досі незрозумілими для судноплавних компаній, тому ймовірність критичних наслідків подальших атак залишається питанням «коли», а не «якщо».

Кіберсистеми сучасних суден класифікуються як стандартні системи інформаційних технологій (ІТ) або системи операційних технологій (ОТ), пов'язаних з експлуатацією та управлінням. Злом ІТ-систем може мати серйозні репутаційні та фінансові наслідки. Однак, зазвичай, це не впливає на безпечну роботу суден. У той же час системи ОТ менш захищені та опрацьовані щодо кібербезпеки, тому кібератака на бортові системи ОТ може поставити під загрозу безпеку судна та екіпажу.

10.1.1 ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА НАВІГАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ

10.1.1.1. Забезпечення кібербезпеки операційних та інформаційних технологій систем управління судном

Збільшення кіберінцидентів впливає на міжнародне судноплавство і робить кібербезпеку однією з найважливіших проблем на морі. Для забезпечення безпеки експлуатації суден [326-327], екіпажу та пасажирів вводяться правила та закони, що вимагають від судновласників, операторів та менеджерів враховувати

кіберризки. Такі правила включені до Керівництва Міжнародної морської організації (ММО, IMO) з управління морськими кіберризиками MSC-FAL.1/Circ3 та єдині вимоги Міжнародної Асоціації Класифікаційних Товариств (МАКО) щодо кібербезпеки.

Результат міжнародного галузевого співробітництва відображено в [328-329] рекомендаціях МАКО (IACS), яка 27 квітня 2022 року опублікувала нові уніфіковані вимоги (Unified Requirement, UR) щодо кібербезпеки, а також зміни до Рекомендації № 166 (Rec. № 166), а саме: UR E26 (Кіберстійкість суден, Cyber Resilience of Ships); UR E27 (Кіберстійкість судових систем та обладнання, Cyber Resilience of on-board Systems and Equipment).

Вимога UR E26 націлена на забезпечення кібербезпеки інтегрування операційних та інформаційних технологій у мережу судна під час проектування, будівництва, введення в експлуатацію та включає ідентифікацію обладнання, захист, виявлення кібератак, реагування та відновлення.

Вимога UR E27 спрямована на забезпечення захисту сторонніми постачальниками обладнання та регламентує вимоги до кіберстійкості бортових систем, а також розробку нових пристроїв до впровадження на борту суден.

Поради Rec. 166 [330] містять нормативні вимоги підтримки кіберстійкості суден протягом усього терміну експлуатації. Вони включають побудову системи управління кібербезпеки (СУКБ) відповідно до Посібника з управління морськими кіберрисками (Циркуляр IMO MSC-FAL.1/Circ.3) та Резолюцією MSC.428(98) – «Управління кіберрисками в морській галузі в рамках систем управління безпекою» [331]. Згідно з вимогами Комітету з безпеки на морі (MSC) у схваленій системі управління безпекою має враховуватися управління кіберризиками і вони були належним чином враховані в системах управління безпекою після 1 січня 2021 року.

Відповідно до Рекомендації МАКО № 166 введено термінологію «якість даних» (Data Quality) - сукупність дій, спрямованих на забезпечення безпеки даних, що генеруються, оброблюються, передаються і зберігаються в процесі експлуатації бортових комп'ютерних систем. До термінології «якість даних

належать наступні: 1. Конфіденційність (Confidentiality) – недоступність та закритість інформації для неавторизованих осіб чи процесів. 2. Цілісність (Integrity) – збереження правильності та повноти активів. 3. Доступність (Availability) – доступність та готовність до використання на запит авторизованого користувача.

Також у Рекомендації визначено Категорії (I, II, III) судових комп'ютерних систем та ступеня їх вразливості щодо якості даних:

Категорія I. Типові функції систем: моніторинг для інформаційних/адміністративних завдань. Це системи, вихід з ладу яких не призведе до небезпечних ситуацій для безпеки людини, безпеки судна та/або загрози довкіллю.

Категорія II. Типові функції систем: сигналізація та моніторинг; контрольні функції, необхідних підтримки судна у його нормальних експлуатаційних і заселених умовах. Це системи, відмова яких може зрештою призвести до небезпечних ситуацій для безпеки людини, безпеки судна та/або загрози навколишньому середовищу.

Категорія III. Типові функції систем: управління для підтримки руху судна та кермового управління; функції безпеки судна. Це системи, які можуть негайно призвести до небезпечних ситуацій для безпеки людини, безпеки судна та/або загрози навколишньому середовищу.

Процес управління судном обумовлений відсутністю достатнього узгодження системних компонентів – інформаційного забезпечення, навігаційних факторів управління та психофізіологічних характеристик судноводія та, як наслідок, помилок у його діях [332].

Судноводій при управлінні судном працює з двома видами інформації – процедурною та декларативною. Процедурна інформація заснована на алгоритмах дій судноводія, пов'язаних з процесом управління та командами, що віддаються. Декларативна інформація побудована на даних, з якими працює при цьому. Такі дані разом утворюють інформаційну базу. Параметри можуть бути представлені у вигляді векторів, матриць, списків чи ієрархічних структур. Для

створення спеціальної системи захисту даних слід організувати впорядковане управління великою кількістю інформації в базах даних про суди та впливи на них. Така система дозволить, при необхідності, вилучати їх із бази, модифікувати та знову зберігати у зміненому вигляді.

Основною проблемою в організації інформування капітана та екіпажу є відсутність розподілу за рівнем важливості.

З розвитком інформаційних технологій забезпечення процесу управління виникла форма подання інформації, яка об'єднала процедурний і декларативний вид. При нестачі належної інформації управління процесом маневрування проводиться методом спроб і помилок, що може бути наслідком збільшення ймовірності помилки та аварійного інциденту. Методи отримання інформації про характеристики судна у процесі управління розроблено недостатньо, через відсутність належних нормативних документів як національних, так і міжнародних. Проте, вони визначають зміст і форму представлення даних для планування заданого алгоритму управління судном. Відсутність засобів обліку даних про динамічні властивості при плануванні маневрування вказують на актуальність розробки систематизованої концепції організації системи управління рухом судна.

10.1.2. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ

10.1.2.1. Класифікація інформаційних потоків для оцінки безпеки маневрування судна

Для забезпечення процесу управління роботою судна необхідна наступна інформація: відомості про судно; зовнішні чинники впливу; жорсткі та змінні обмеження, засоби навігаційного обладнання; функціональні обов'язки оператора-судноводія з організації обробки інформації та її використання. У цьому контексті поняття «інформація» можна охарактеризувати двома поняттями: 1) вибір можливих необхідних ситуацій із великої кількості рівно

ймовірних чи нерівно ймовірних можливостей; 2) вибір, інформації, яку можна сприйняти та запам'ятати.

Функціональні обов'язки судноводія при управлінні визначають вимоги до рівня його здатності виконувати інтелектуальні дії з обробки інформаційних потоків. Класифікація таких потоків при управлінських процесах у рейсовому циклі судна представлена рис 2.1.

На сучасних суднах інформація з маневрування та управління, розосереджена містком, не завжди представлена у вигляді декларативних даних і потрібна її обробка для прийняття рішень. З цієї причини інформацію необхідно подавати в інтерпретованому, структурованому, зв'язному та активному вигляді, що суттєво збільшить швидкодію управління.

Основною проблемою в організації інформування капітана та екіпажу є відсутність розподілу за рівнем важливості. При лоцманській проводці обсяг інформації збільшується, проте вона також не розподіляється. На містку зосереджено інформаційно-розпорядчу інформацію, навігаційну, господарську та координаційну. При цьому часто капітан і лоцман відволікаються від роботи із забезпечення процесу мореплавання на інші види діяльності. Це призводить до того, що відбувається перерва у спостереженні за навколишнім оточенням, деяка інформація сприймається із запізненням і є результатом неадекватних команд.

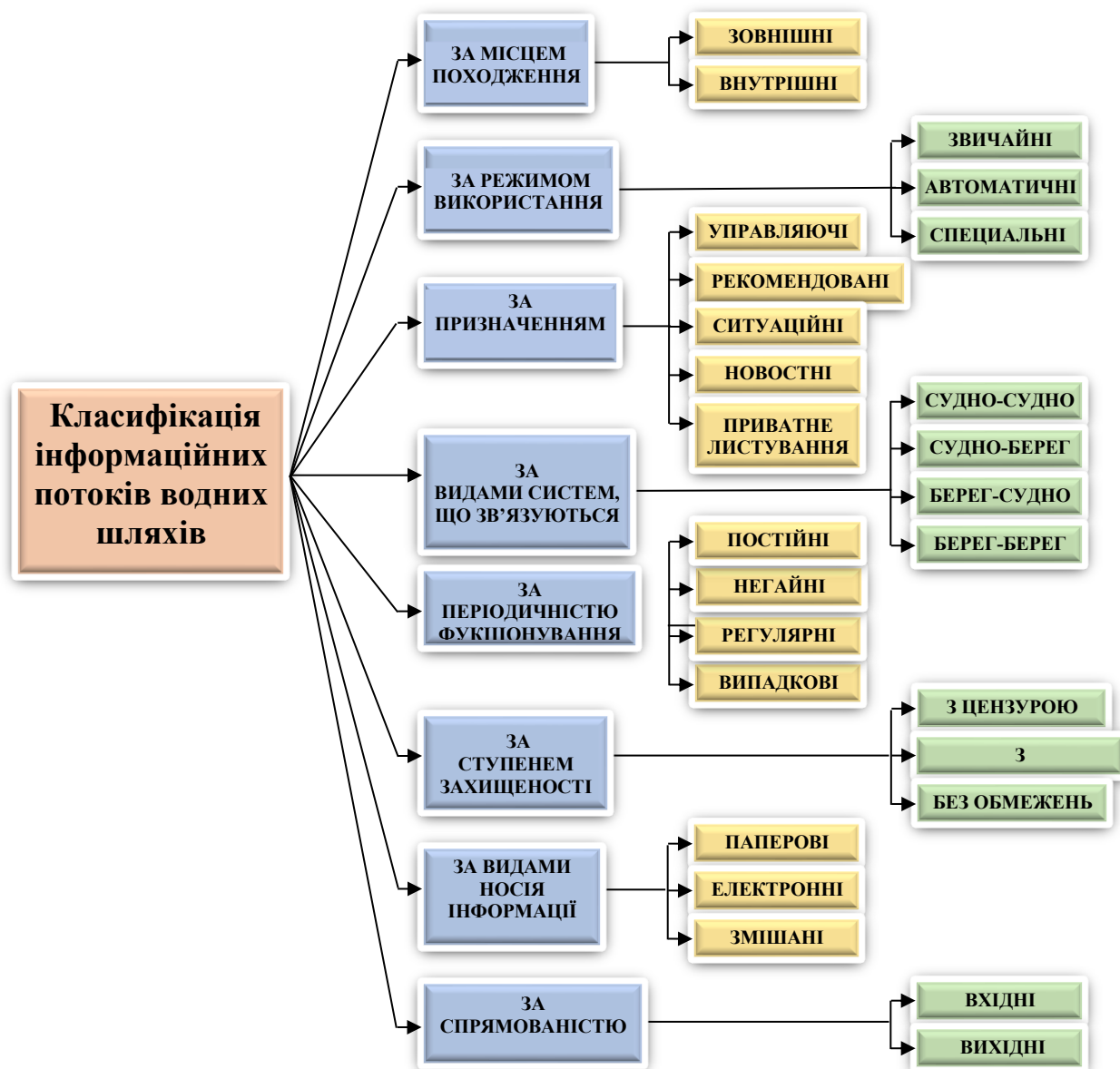


Рис. 2.1. Класифікація інформаційних потоків водних шляхів [розроблено авторами]

10.1.2.2 Контроль над інформаційним забезпеченням поточних параметрів руху судна при організації процесу маневрування та діяльності оператора

2.2.1. Критерії узгодженості чинників руху та показників людини-оператора

По каналах зв'язку надходить до 25 видів інформації, що створює напруженість у роботі містка (рис. 2.2).



Слід зазначити, що останнім часом у з'явилися кібератаки на навігаційно-інформаційні системи суден з метою злому навігаційної системи, отримання доступу до критично важливих даних, впровадження шкідливого програмного забезпечення, глушіння чи створення перешкод системам, внаслідок чого суднам доводиться повертатися до порту через проблеми з їх навігаційними системами. Необхідно звернути особливу увагу, що вся інформація є відкритою і може бути використана кіберзлочинцями.

Як показує виконаний аналіз процесу управління роботою судна та помилок у діях людини-оператора (ЛО), який ним керує, вони обумовлені відсутністю достатнього узгодження трьох складових частин процесу: зовнішніх обмежень; факторів руху; психофізіологічних характеристик ЛО як елемента системи.

Кількісна оцінка безпеки маневрування може бути здійснена на основі ведення глобального інтегрального багатфакторного критерію узгодженості психофізіологічних характеристик діяльності оператора та факторів руху, що включає не менше п'яти факторів руху та чотирьох характеристик операторської діяльності.

Помилки оператора виникають у процесі отримання зорової інформації, через необхідність її обробки та характеризуються збоями в управлінні та втратою орієнтування [333]. Для однозначного сприйняття інформації необхідно її обробляти та подавати оператору у вигляді процедурних інструкцій.

10.1.3 АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА УЗГОДЖЕНОСТІ ДЛЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ

Для коригування планової траєкторії руху судна, у ситуації зміни зовнішніх впливів та змінних обмежень, оператору потрібно здійснювати обробку декларативної інформації, що надходить, з контролю над параметрами процесу управління, що призводить до помилок в управлінні процесом

маневрування. Швидкість та надійність ухвалення рішення залежить від інтелектуальної діяльності оператора, низький рівень якої може призвести до помилок у дотриманні правил плавання. Отже, антропометричні характеристики оператора впливають процес управління судном і вимагають окремого аналізу та дослідження.

Безпека маневрування не забезпечувалася через відсутність необхідних відомостей про маневрені характеристики судна, як об'єкта управління та відповідних даних про поточний стан від технічних засобів судноводіння, для контролю над процесом руху в обмежених умовах плавання. На це вказують посадки на ґрунт у 46,8% із 173-х випадків, прийнятих до аналізу.

Через недостатнє інформаційне забезпечення процесу судноводіння, поза судном і на самому судні, відсутність методів та способів контролю з боку берегових систем навігаційного обладнання не дозволила попередити посадки на ґрунт (47%) та навали на берегові споруди та знаки огорожі (17%).

Недостатнім виявилось й інформаційне забезпечення поточних параметрів руху та положення судна, відсутність методики попереднього планування управління, систем підтримки прийняття рішення та алгоритмів дій оператора при управлінні маневруванням, що не дозволило попередити зіткнення у 15,0%, посадку на мілину у 47% та навали в 17%.

Такий аналіз дозволив провести ранжування помилок оператора за його психофізіологічними характеристиками: у 47% випадків причиною аварійної події були помилки аналізаторів; у 21% – через збої при зберіганні та обробці інформації; у 18% – через збої при прийнятті рішення і в 14% – моторні помилки, зумовлені працездатністю оператора.

Для оцінки ступеня впливу кожної характеристики оператора на узгодженість руху введемо коефіцієнти ранжування – за аналізаторами $K_{ржа}$, за збоєм при зберіганні та обробці інформації $K_{ржз}$, за швидкістю виконання інтелектуальних функцій $K_{ржі}$ і за результатом моторних помилок $K_{ржмп}$.

Оцінюючи узгодженість, введемо три критерії узгодженості чинників руху та показників оператора – *локальний, узагальнений локальний і глобальний* [340].

Локальні критерії узгодженості характеризують рівень узгодженості кожної характеристики оператора з відповідними факторами руху. Їхня загальна кількість дорівнює 20. Умовні позначення коефіцієнтів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Локальні коефіцієнти узгодженості

Фактори руху	Аналізатори	Пам'ять	Інтелектуальні функції	Антропометрія
Швидкість	$K_{ша}$	$K_{шп}$	$K_{ші}$	$K_{ш ант}$
Курс	$K_{ка}$	$K_{кп}$	$K_{кі}$	$K_{к ант}$
Момент початку маневру	$K_{мпма}$	$K_{мпмп}$	$K_{мпмі}$	$K_{мпм ант}$
Траєкторія	$K_{тра}$	$K_{трп}$	$K_{трі}$	$K_{тр ант}$

При узгодженості одного фактору руху з однією характеристикою оператора він приймає значення, рівне 0,2, а при відсутності – він дорівнює 0.

Узагальнені локальні критерії узгодженості інформаційного аналізу ($K_{ан}$), пам'яті та мислення ($K_{пам}$), швидкості та надійності виконання інтелектуальних функцій ($K_{фун}$) і антропометрії ($K_{ант}$) характеризують ступінь узгодженості кожної характеристики оператора з усіма факторами руху. Кожен з них приймає значення, рівне [305, с. 1]. При узгодженості одного фактору руху з відповідною характеристикою $K_{ан}, K_{пам}, K_{фун}, K_{ант} = 0,2$; двох – 0,4; трьох – 0,6; чотирьох – 0,8 і 1,0 – при повному збігу.

Глобальний критерій узгодженості ($K_{узг} \in [0; 1]$ відн. од.) характеризує ступінь узгодженості всіх характеристик діяльності оператора з усіма факторами руху судна, представленими у вигляді окремих коефіцієнтів. Якщо глобальний і узагальнені локальні критерії дорівнюють одиниці, то це означає, що забезпечується узгодженість складових процесу маневрування і створюються передумови для його гарантованої безпеки.

Виконаний аналіз показує, що оцінки величин локальних критеріїв узгодженості, засновані на припущенні про рівноймовірність подій, не зовсім коректні. З цієї причини при визначенні значень коефіцієнтів узгодженості необхідно враховувати ймовірність події за кожною характеристикою, шляхом

множення узагальнених локальних критеріїв на коефіцієнт ранжування. Тоді аналітична залежність для визначення $K_{узг}$ матиме вигляд:

$$K_{узг} = \sum_{i=1}^4 (K_{ржі} \cdot \sum_{j=1}^5 K_{локij}), \quad (1)$$

де i – число характеристик оператора ($i \in [306, с. 4]$); j – число факторів руху $j \in [306, с. 5]$; $K_{ржс}$ – коефіцієнт ранжування помилок оператора; $K_{лок}$ – локальний коефіцієнт узгодженості (табл. 3.1).

Структурну схему алгоритму [340] визначення коефіцієнта за формулою (1) наведено на рис. 3.1.

З іншого боку, необхідно враховувати як результати аналізу аварійності, так і результати вивчення психофізіологічних характеристик оператора, що потребують додаткових досліджень.

Розглянуті необхідні та достатні умови дозволяють розпочати обґрунтування процесу гарантованої безпеки маневрування. Підготовку до маневрування і його виконання розглядатимемо з **чотирьох етапів**:

- планування переміщення з урахуванням жорстких обмежень та довгострокового прогнозу параметрів гідрометеорологічних умов плавання;
- управління процесом руху відповідно до попереднього плану та його коригування за фактичними параметрами гідрометеорологічних умов плавання;
- виконання морських операцій на початкових та кінцевих ділянках переходу.

Особливістю першого етапу є можливість вирішення завдань початку плавання, інші можуть виконуватися лише у процесі управління.

Організація процесу маневрування та його виконання являють собою цілеспрямовані інтелектуальні дії оператора, і на кожному його етапі вирішується певне коло завдань.

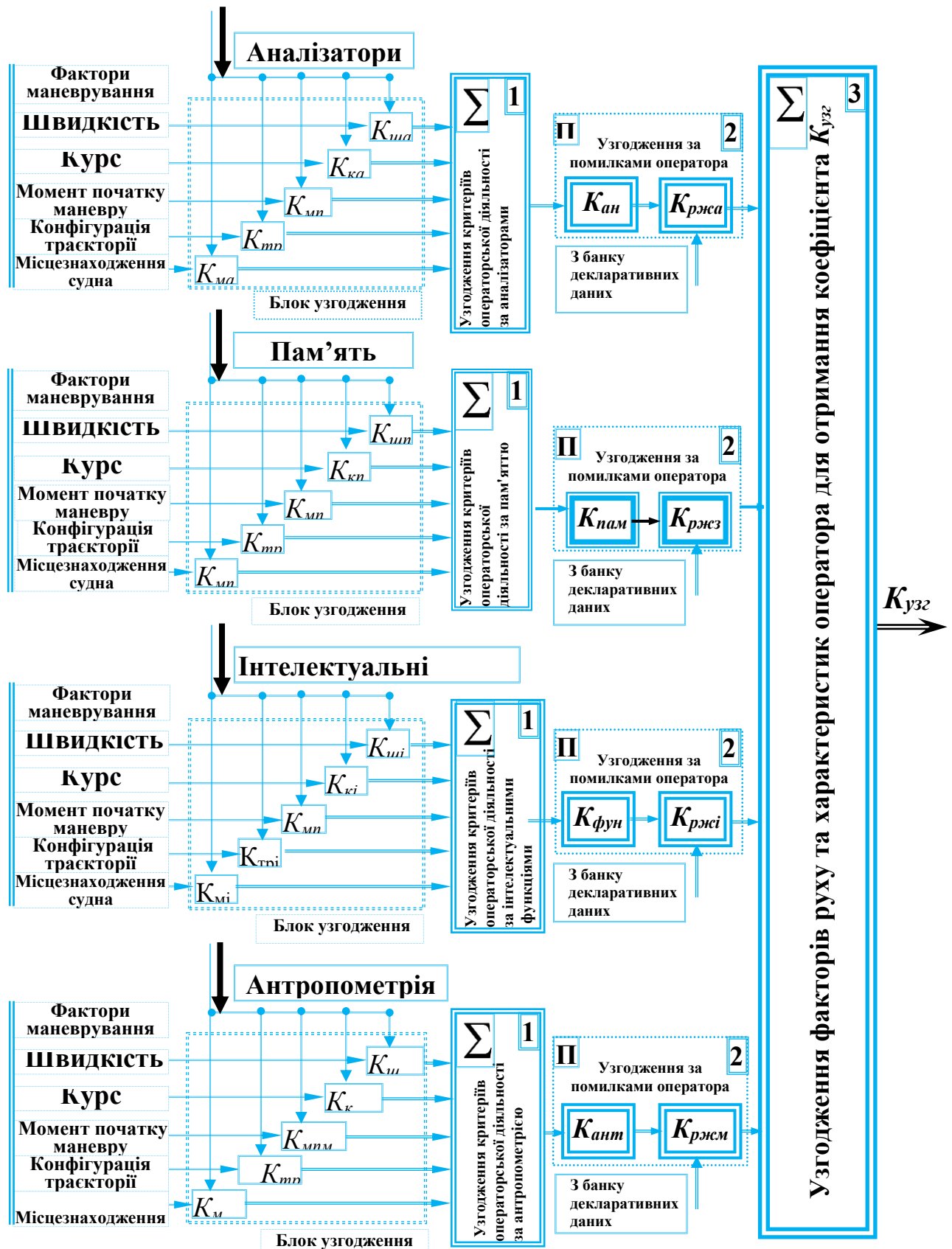


Рис. 3.1. Структурна схема алгоритму визначення коефіцієнта узгодженості для кількісної оцінки безпеки маневрування. Позначення блоків: 1 – узгодження за локальними критеріями; 2 – узгодження з урахуванням помилок оператора; 3 – глобальне узгодження переміщення;

Після того, як попередній план складено, можна приступати до виконання наступного етапу маневрування – управління процесом переходу. Для його реалізації необхідно:

- здійснити виконання морської операції з виходу з порту;
- уточнити параметри гідрометеорологічних факторів і скоригувати поправки, прийняті за прогностичними даними;
- ввести в роботу пристрій управління курсом (ручний або автоматичний), навігаційні пристрої з визначення місця судна, оцінки навігаційної обстановки і визначення моменту появи змінних обмежень руху судна.

При визначенні місця і наявності відхилення слід уточнити причини, що викликали зміщення, і скоригувати курс без зміни початкового плану з таким розрахунком, щоб судно вийшло в наступну маршрутну точку.

При появі змінних обмежень слід визначити, чи існує небезпека зіткнення, а, відповідно, і необхідність змінювати параметри руху. Якщо вона існує, то коригується початковий план шляхом зміщення наступної однієї або декількох шляхових точок у бік лінії доставки вантажу (лінії переміщення між портами). Після цього змінюється курс і/або швидкість для того, щоб забезпечити розбіжність і виконання скоригованого заданого алгоритму управління.

Оскільки при появі змінних обмежень зростає обсяг операторської роботи з обробки інформації, особливо при плаванні в обмежених умовах, при обмеженій видимості і наявності інтенсивного судноплавства, виникає необхідність наявності іншого оператора, який безпосередньо зайнятий не управлінням, а тільки обробкою інформації і підготовкою даних.

Таким чином, гарантовану безпеку управління маневруванням [334-337] передбачається забезпечити за рахунок підвищення рівня поінформованості та швидкодії систем обробки інформації з подальшою розробкою алгоритмів операторської діяльності шляхом:

- структурування тактичних і оперативних завдань, розробки алгоритмів інтелектуальних дій оператора при плануванні та управлінні рухом судна;
- розробки алгоритмів і програм розрахунку прогнозованої безпечної

швидкості в різних умовах плавання;

- планування морських операцій інверсним методом;
- створення системи підтримки прийняття рішень щодо маневрування;
- розробки алгоритмів поточного контролю розбіжності та способів коригування спочатку заданої траєкторії;
- розробки алгоритмів поточного контролю місцезнаходження, включаючи криволінійний рух і візуалізацію поточної ситуації розбіжності з суднами, які небезпечно маневрують.

10.1.4 АЛГОРИТМ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МАНЕВРУВАННЯ

10.1.4.1 Етапи підготовки до процесу маневрування

Для забезпечення максимально можливої узгодженості факторів руху і жорстких, а також змінних обмежень, розглянемо послідовність формування заданого алгоритму процесу маневрування. Функціонування судна, як об'єкта управління, визначається видом виконуваних робіт і носить цілеспрямований характер. Типовим прикладом такого функціонування є вирішення задачі планування таким способом, який дозволить досягти поставлену мету переміщення з деякої початкової фіксованої ситуації до кінцевої.

Всі завдання планування переміщення з початкового фіксованого в цільове кінцеве положення виконують у просторі станів в умовах жорстких і змінних обмежень при наявності зовнішніх по відношенню до об'єкта управління впливів.

Оскільки протягом усього часу руху судно переміщається зі змінними параметрами (курс, швидкість, положення в просторі), будемо вважати, що маневрування відбувається на всьому переході, проте воно має різний характер, залежно від його позиції по відношенню до пункту відходу і приходу, а також характеру навігаційних умов.

Процес підготовки до маневрування і його виконання пропонується розглядати як такий, що складається з чотирьох етапів: планування процесу

переміщення з урахуванням жорстких обмежень і довгострокового прогнозу параметрів гідрометеорологічних умов плавання; управління процесом руху відповідно до попереднього плану і його коригування за фактичними параметрами гідрометеорологічних умов плавання; коригування початкового плану при появі змінних обмежень в процесі переміщення; виконання морських операцій на початкових і кінцевих ділянках переходу. Особливістю першого етапу є можливість вирішення завдань до початку, інші можуть виконуватися тільки в процесі управління, у зв'язку зі зміною стану судна, обмежень і зовнішніх впливів.

На першому етапі для заданого початкового стану визначається смислова структура бази вихідних даних, тобто ставиться стратегічне завдання щодо прогнозування способів управління та складу системи маневрування. Укрупнений алгоритм дій оператора з організації процесу маневрування наведено на рис. 4.1 (ШТ – шляхова точка).

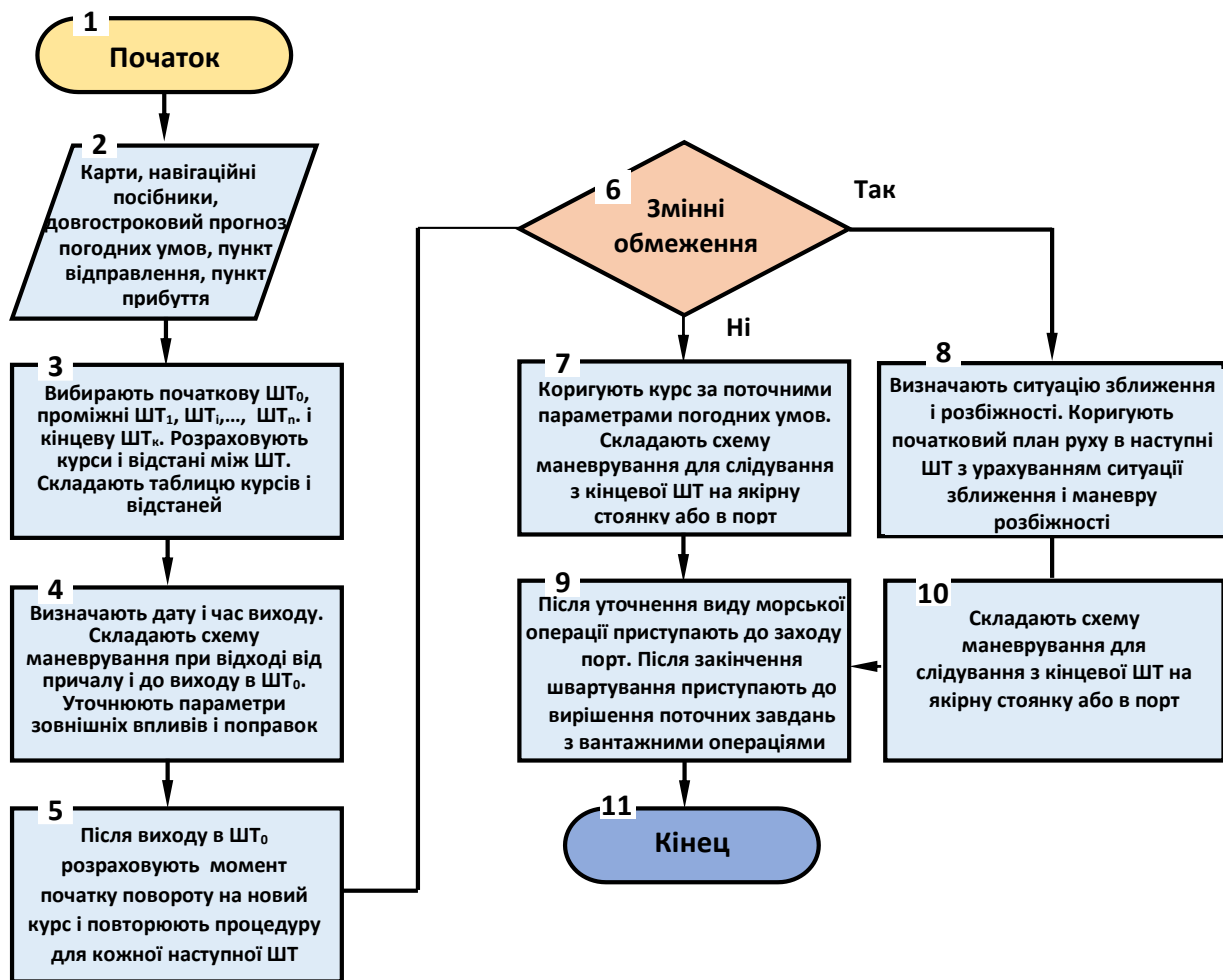


Рис. 4.1. Укрупнений алгоритм організації маневрування

Потім проводять декомпозицію кожного завдання і переходять від вихідних до елементарних завдань, що призводить до вирішення тактичних завдань щодо уточнення ділянок шляху, розрахунку поправок на зовнішні впливи і планування заданого алгоритму управління рухом судна.

Після побудови гіпотези вирішення елементарних завдань виникає необхідність розробки технологічного процесу виконання маневрування, який полягає в пошуку відповідності між вихідними даними і необхідними засобами для досягнення поставленої мети.

В результаті вирішення стратегічних і тактичних завдань, а також після розробки технології маневрування отримують заданий алгоритм функціонування процесу управління переміщенням судна. При цьому на етапі вирішення стратегічних і тактичних завдань маневрування характеристики судна

практично не присутні, тому такі завдання можна вважати типовими. У них враховуються тільки жорсткі обмеження і характеристики головної силової установки. При переході до технологічних процесів і декомпозиції вихідних завдань на елементарні виникає необхідність врахування маневрених характеристик для детального планування руху.

Вирішення зазначених завдань досягається шляхом виконання різних дій за певних обставин і в різних умовах за рахунок використання алгоритмів інтелектуальної діяльності. Особливістю процесу маневрування є той факт, що попереднє планування може бути здійснене тільки з урахуванням жорстких обмежень і макропоказників зовнішніх впливів, у яких відомі тільки прогнози їх імовірнісних характеристик. Змінні обмеження невідомі взагалі, тому вони не можуть бути враховані при попередньому плануванні та розробці заданого алгоритму функціонування процесу управління маневрами. Зазвичай час на виконання попереднього планування необмежений, і оператор визначає його сам за обсягом необхідної роботи.

Оскільки в процесі управління маневруванням доводиться змінювати заданий алгоритм за уточненими параметрами зовнішніх впливів [338-339], коригувати його при появі змінних обмежень і вирішувати технологічні завдання заново, то у оператора є обмежений час для виконання такої роботи, оскільки він зайнятий управлінням маневрами. Це істотно ускладнює виконання його інтелектуальних дій у зв'язку з необхідністю обробляти значно більше інформації, обсяг якої може перевищувати психофізіологічні можливості оператора щодо її сприйняття.

ВИСНОВКИ

Удосконалити систему управління навігаційною безпекою маневрування морського судна [335] можливо за рахунок введення нових елементів і організації прямого або зворотного зв'язку між системою управління і об'єктом управління, а саме: 1. Для підвищення інформаційної кібербезпеки [341-347] управління судном на містку встановити інформаційний пост, в якому

зосередити всю інформацію, що надходить, структурувати її за категорією важливості та призначенням, забезпечивши належний захист при прийомі, передачі, обробці та зберіганні. 2. Скоротити обсяг переданих відомостей у відкритий ефір, для попередження використання її кіберзлочинцями.

З появою автоматизованих ідентифікаційних систем точність визначення положення судна істотно збільшилася, що дозволяє зменшити похибки оцінки параметрів зближення. У зв'язку з відсутністю відповідних алгоритмів оцінки небезпеки зіткнення в берегових СУРС і недостатньою точністю розрахунку параметрів найкоротшої розбіжності вони не можуть попереджати надмірне зближення суден в зоні відповідальності і розробити їм рекомендації [348-349]. З цієї причини порівняльна оцінка точності обчислення параметрів найкоротшого зближення в суднових і берегових РЛС, а також при використанні даних АІС є актуальною.

REFERENCES

1. Vozniuk L. Selection of a Variant Steel Space Truss Structure Based on the Bioenergetic Method // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. : 807 : 2nd International conference on Smart technologies in urban engineering, STUE 2023, 8–10 June 2023, online. – P. 104–116.
2. Lachowicz M., Shmukle V., Kot H., Vozniuk L., Demchyna K., Use of innovative solutions in the area of construction process planning [Електронний ресурс] // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2949, iss. 1 : XI International scientific session on Applied mechanics, 18 November 2022, Bydgoszcz, Poland.
3. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: колективна монографія / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с. 6.
4. DBN V.1.2-14:2018. General Principles for Ensuring Reliability and Structural Safety of Buildings and Structures. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
5. DBN V.2.6-198:2014. Steel Structures. Design Standards. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
6. DBN V.1.1-7:2016. Fire Safety of Construction Sites. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
7. DBN V.2.6-31:2021. Thermal Insulation of Buildings. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
8. DBN V.2.6-162:2010. External Enclosing Wall Structures with Facade Thermal-Insulation and Finishing Systems. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
9. DBN B.2.2-12:2019. Planning and Development of Territories. Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine.
10. Migrant workers: What we know [Електронний ресурс] // BBC. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/6957171.stm.
11. Social and Economic Characteristics [Електронний ресурс] // Pew Research Center. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.pewhispanic.org/2009/04/14/iv-social-and-economic-characteristics/>.
12. Percentages of Foreign Born Among All Workers and Among Union-Represented Workers Age 16 and Older by Industry, 2003 and 2006 [Електронний ресурс] // Migration Information Source. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: http://www.migrationpolicy.org/sites/default/files/source_charts/spotlight-aug07-fig8.cfm.

13. Velma Fan C. Foreign-Born Wage and Salary Workers in the U.S. Labor Force and Unions [Електронний ресурс] / C. Velma Fan, J. Jeanne // The Migration Policy Institute. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.migrationpolicy.org/article/foreign-born-wage-and-salary-workers-us-labor-force-and-unions-0>
14. Федака С. Сучасна Україна. Портрет з натури / Сергій Федака // Сучасна Україна. Портрет з натури / Сергій Федака. – Ужгород: Ліра, 2011. – С. 173.
15. Вахтовые поселки. Строительные общежития [Електронний ресурс] // Завод Атолл метало конструкций. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://atollsib.ru/products/vakhtovye-poselki/>.
16. Хом'як А., ІНТЕГРАЦІЯ МІГРАНТІВ У ЄВРОПЕЙСЬКІ СУСПІЛЬСТВА: ІНТЕГРАЦІЙНА ПОЛІТИКА ТА ГРОМАДСЬКА ДУМКА [Електронний ресурс] / А.Хом'як // Вісник НТКК "КПІ" Випуск 3(43) - 2019 - Режим доступу <https://visnyk-psp.kpi.ua/article/download/195706/196051/436241>
17. Andreasen E. America, the Melting Pot? / E. Andreasen, A. Bennicke. – Copenhagen,: Gyldendal, 1985. – 159 с.
18. Finoki B. MIGRANT HOUSING [Електронний ресурс] / Bryan Finoki // inhabitat. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: <http://inhabitat.com/migrant-housing/>.
19. Improving Migrant Worker Conditions by Design [Електронний ресурс] // vcuqatar. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.qatar.vcu.edu/news/improving-migrant-worker-conditions-by-design>.
20. Dahl C. Architectural graphic novel / C. Dahl, R. Cha, H. Lotfi Shemirani // Журнал по мировой архитектуре ПИ22 / C. Dahl, R. Cha, H. Lotfi Shemirani. – 2009. – (ОАО «Типография Новости»). – С. 52–60.]
21. Urban Land Institute (ULI). About Us [Електронний ресурс] // Urban Land Institute. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://europe.uli.org/about-us/>.
22. Goodson L. Mass migration and real estate in European cities / L. Goodson, S. Thomas, J. Phillimore – London: Urban Land Institute, 2017. – 40 с.
23. Migrant crisis: EU's Juncker announces refugee quota plan [Електронний ресурс] // BBC. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.bbc.com/news/world-europe-34193568>.
24. Uchodźcy w Polsce. Prawda i mity. Najważniejsze pytania [Електронний ресурс] // Super express. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: http://www.se.pl/wiadomosci/polityka/uchodzcy-w-polsce-prawda-i-mity-najwazniejsze-pytania_682160.html.

25. Vozniuk L. I., Babyak V. I., Gladyshev D. G., Zaulychna I. IN. Project of post-war reconstruction of a school in the city of Irpin // System analysis and intelligent systems for management: proceedings of the 17th International scientific and practical conference, Ankara, Turkey, May 02–05, 2023. – 2023. – С. 27–30.
26. Babyak V., Vozniuk L., Bebko S. Architectural methods of designing specialized dwellings for underutilized blank facades // Архітектурні дослідження. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 128–134.
27. Murray M. Locals say refugee homes are like prisons. BBC. 11.05.2024. URL: <https://www.bbc.com/news/articles/crggn2ddrkro>.
28. Charlotte Wright. Home Office 'saving on purchase' of £15m migrant camp. BBC. 15.11.2024. URL: <https://www.bbc.com/news/articles/clyjm6nrr0zo>.
29. Ravi, V.K.; Cheruku, S.R. AI and Machine Learning in Predictive Data Architecture. *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.* 2022, 10, 95–116.
30. Bastos, D.; Fernandez-Caballero, A.; Pereira, A.; Rocha, N.P. Smart City Applications to Promote Citizen Participation in City Management and Governance: A Systematic Review. *Informatics* 2022, 9, 89.
31. Biswal, B.; Deb, S.; Datta, S.; Ustun, T.S.; Cali, U. Review on Smart Grid Load Forecasting for Smart Energy Management Using Machine Learning and Deep Learning Techniques. *Energy Rep.* 2024, 12, 3654–3670.
32. Dimara, A.; Tzitziou, G.; Papaioannou, A.; Krinidis, S.; Anagnostopoulos, C.-N.; Ioannidis, D.; Tzovaras, D. Appliance Maintenance Behaviors and Sustainability: A European Household Perspective Analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 2024, 210, 107835.
33. Allam, Z.; Dhunny, Z.A. On Big Data, Artificial Intelligence and Smart Cities. *Cities* 2019, 89, 80–91.
34. Wang, H.; Saito, M.; Liu, J.; Shimamoto, S. Comprehensive Analysis of Traffic Operation for On-Street Parking Based on the Urban Road Network. *IEEE Access* 2024, 12, 125643–125653.
35. Berkani, S.; Gryech, I.; Ghogho, M.; Guermah, B.; Kobbane, A. Data Driven Forecasting Models for Urban Air Pollution: MoreAir Case Study. *IEEE Access* 2023, 11, 133131–133142.
36. Babyak V., Vozniuk L., Bebko S. Architectural methods of designing specialized dwellings for underutilized blank facades // Архітектурні дослідження. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 128–134
37. Hladyshev D. Modern science: theory, practice, evolution / D. Hladyshev, U. Ivanochko, L. Lisnykh, L. Vozniuk, V. Babyak, Y. Merezhko, O. Hryb, R. Petryshyn, D. Serban, O. Podra, N. Petryshyn, Л., R. Zhelizniak and others – : Staten House LLC, 2025. – 300 с.

38. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: колективна монографія / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с. 6.
39. ДБН В.2.2-9:2018 «Громадські будинки та споруди основні положення»
40. ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції. Норми проектування"
41. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
42. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування та забудова територій. Київ: Мінрегіон України.
43. ДБН В.2.2-3:2018. Заклади освіти. Київ: Мінрегіон України.
44. Vozniuk L. I., Babyak V. I., Gladyshev D. G., Zaulychna I. IN. Project of post-war reconstruction of a school in the city of Irpin // System analysis and intelligent systems for management: proceedings of the 17th International scientific and practical conference, Ankara, Turkey, May 02–05, 2023. – 2023. – С. 27–30.
45. Hladyshev D. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development: колективна монографія / D. Hladyshev, L. Vozniuk, V. Babyak, A. Smaliychuk, D. Mazur, S. Leibych, S. Kiiko, Y. Ivaskiv, O. Hehedosh, V. Chereshnya, A. Zastryzhnyi, O. Mytsyk, V. Ivaskiv, K. Demchyna, V. Artemenko, Y. Dragun, T. Rymar. – Boston: Primedia eLaunch, 2024. – 418 с.
46. Babyak V. Improvement of scientific approaches to the development of engineering: collective monograph / V. Babyak, D. Hladyshev, L. Vozniuk, I. Mysak, P. Mysak, V. Orel, I. Popadiuk, I. Marlai, B. Pitsyshyn and others – Boston: Primedia eLaunch, 2022. – 562 с.
47. Hladyshev D. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: collective monograph / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с.
48. Serban D., Merezhko Y. Reconstruction of the laboratory educational building // Advanced technologies in scientific research : 2nd International scientific and practical conference, November 19–21, 2025. Rotterdam, Netherlands : collection of scientific papers. – 2025. – С. 51–54.
49. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: колективна монографія / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с. 6.
50. ДБН В.2.2-9:2018 «Громадські будинки та споруди основні положення»

51. ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції. Норми проектування"
52. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
53. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування та забудова територій. Київ: Мінрегіон України.
54. ДБН В.2.2-3:2018. Заклади освіти. Київ: Мінрегіон України.
55. Vozniuk L. I., Babyak V. I., Gladyshev D. G., Zaulychna I. IN. Project of post-war reconstruction of a school in the city of Irpin // System analysis and intelligent systems for management: proceedings of the 17th International scientific and practical conference, Ankara, Turkey, May 02–05, 2023. – 2023. – С. 27–30.
56. Hladyshev D. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development: колективна монографія / D. Hladyshev, L. Vozniuk, V. Babyak, A. Smaliychuk, D. Mazur, S. Leibych, S. Kiiko, Y. Ivaskiv, O. Hehedosh, V. Chereshnya, A. Zastryzhnyi, O. Mytsyk, V. Ivaskiv, K. Demchyna, V. Artemenko, Y. Dragun, T. Rymar. – Boston: Primedia eLaunch, 2024. – 418 с.
57. Babyak V. Improvement of scientific approaches to the development of engineering: collective monograph / V. Babyak, D. Hladyshev, L. Vozniuk, I. Mysak, P. Mysak, V. Orel, I. Popadiuk, I. Marlai, B. Pitsyshyn and others – Boston: Primedia eLaunch, 2022. – 562 с.
58. Hladyshev D. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: collective monograph / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с.
59. Hladyshev D. Modern science: theory, practice, evolution / D. Hladyshev, U. Ivanochko, L. Lisnykh, L. Vozniuk, V. Babyak, Y. Merezhko, O. Hryb, R. Petryshyn, D. Serban, O. Podra, N. Petryshyn, Л., R. Zhelizniak and others – : Staten House LLC, 2025. – 300 с.
60. Vozniuk L. I., Babyak V. I., Mazur D. V., Leibych S. R., Ivaskiv Ya. Ya., Mytsyk O. S. Modern building structures made of metal and wood: a collection of scientific works. – 2024. – Vol. № 28. – S. 85–94.
61. Hrushanyk N. I., Goshovska R. V., Deineka A. AND. Architectural solutions in the conditions of post-war reconstruction of educational facilities //Pragmatika. Media. – 2022. – № 34. – P. 210–215.
62. Zeng Z., Chen S., Kong X., Li X., Zhang C., Yang G. (2025), "Revised Control Barrier Function with Sensing of Threats from Relative Velocity Between Humans and Mobile Robots", Sensors, 2025, 25(13), 4005, <https://doi.org/10.3390/s25134005>

63. Sun W., Liu C. and Zhu J. (2018) "A Remote Controlled Mobile Robot Based on Wireless Transmission," 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, China, 2018, pp. 2173–2176, <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469731>.
64. Ащепкова Н.С. Пристрій для дистанційного керування антропоморфним маніпулятором. Патент на корисну модель № 146657 від 10.03.2021. БД "Електронна версія акумулятивного офіційного бюлетеня "Промислова власність"
65. Lee K. –H., Singh H., Hulin T. and Ryu J. –H. (2022) "Simultaneous Use of Autonomy Guidance Haptic Feedback and Obstacle Avoiding Force Feedback for Mobile Robot Teleoperation," 2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 978–981, <https://doi.org/10.23919/ICCAS55662.2022.10003886>.
66. Farkhatdinov I., Ryu J.–H., Poduraev J. (2008). "Control Strategies and Feedback Information in Mobile Robot Teleoperation". Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6–11, 2008 (IFAC–PapersOnline). 17. <https://doi.org/10.3182/20080706–5–KR–1001.0918>.
67. Opiyo, S., Zhou, J., Mwangi, E. et al. (2021) "A Review on Teleoperation of Mobile Ground Robots: Architecture and Situation Awareness". International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, Vol. 19, pp. 1384–1407. <https://doi.org/10.1007/s12555–019–0999–z>
68. Moniruzzaman M., Rassau A., Chai D., Mohammed S., Islam S. (2021) "Teleoperation methods and enhancement techniques for mobile robots: A comprehensive survey", Robotics and Autonomous Systems, Vol.150(2):103973, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103973>
69. Muhammad F., Masjudin M., (2023) "Multiplatform of SVC Device for User Experience Mobile Robot Teleoperation", 2023, Indonesian Journal of Computer Science, Vol. 12(5), <https://doi.org/10.33022/ijcs.v12i5.3476>
70. Publication, I. J. R. A. S. E. T. (2022). Design and Implementation Mobile Control Robot. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol. 10(IV), pp. 1487–1490 . <https://doi.org/10.22214/IJRASET.2022.41487>
71. Usiade R.E., Asiwe M.U. (2023). Design and Implementation of a Mobile (Wireless) Phone Controlled Robot. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research). GPH – International Journal Of Computer Science and Engineering, Vol. 05(12), pp. 01–09, 2023, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7512895>
72. Danail V. Slavov and Vladimir D. Hristov, (2021), "Remote Wi-Fi Control of a Holonomic Mobile Robot", Proceeding of the Technical University of Sofia, ISSN: 1311–0829, Vol. 71, No. 3, <https://doi.org/10.47978/TUS.2021.71.03.005>

73. Кошовий, М.Д., Ащепкова, Н.С., Лучко, А.С. (2021) Метод аналізу поточного стану інерційних характеристик автономного мобільного робота змінюваної конфігурації// Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – декабрь, 2021. – № 1(5). – С. 86 – 99. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2021.02.03>
74. Ashhepkova, N. (2020). Analysis of separate channels in a multi-connected control system. Technology Audit and Production Reserves, Vol.56. № 6–2. – P. 60–65. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.220979>
75. Ashhepkova, N. (2022). Analysis of the inertia tensor of autonomous mobile robot. Technology Audit and Production Reserves, Vol.63. № 1–2. – P. 24 – 34. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252712>
76. Мікроконтролер ESP-32 DevKit V1 <https://arduino.ua/prod3990-wi-fi-modul-devkit-v1-s-esp-32>
77. Мотор-редуктор з колесом, <https://diylab.com.ua/p64047459-motor-reduktor-kolesom.html>
78. Драйвер двох двигунів на базі L298N, <https://diylab.com.ua/p64046654-drajver-l298n-dlya.html>
79. Стабілізатор напруги L7805, L7805 Стабілізатор напруги на 5 Вольт
80. Резистивний датчик згину flex sensor 2.2", <https://diylab.com.ua/p147882681-rezistivnij-datchik-zginu.html>
81. Mohod A.V., Momotko M., Shah N.S., Marchel M., Imran M., Kong L., Boczkaj G. Degradation of rhodamine dyes by advanced oxidation processes (AOPs) – Focus on cavitation and photocatalysis – A critical review // Water Resources and Industry. – 2023. – Vol. 30. – Article ID 100220.
82. Zawadzki P., Deska M. Degradation efficiency and kinetics analysis of an advanced oxidation process utilizing ozone, hydrogen peroxide and persulfate to degrade the dye Rhodamine B // Catalysts. – 2021. – Vol. 11. – No. 8. – Article ID 974.
83. Pandis P.K., Kalogirou C., Kanellou E., Vaitsis C., Savvidou M.G., Sourkouni G., Zorpas A.A., Argirusis C. Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review // ChemEngineering. – 2022. – Vol. 6. – No. 8.
84. Babuponnusami A., Muthukumar K. A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 2. – pp. 557-572.
85. Ollo K., Abollé A., Rodrigue K.A., Eudoxie K.A., Sylvestre K.K., Etienne K.K., Jocelin K.K., Souleymane K., Lassiné O. Oxidation of rhodamine B using the Fenton process: optimization, kinetics and inorganic ions studies // J. Soc. Ouest-Afr. Chim. – 2022. – Vol. 051. – pp. 45-55.

86. Ghribi A., Bagane M. Removal of congo red and rhodamine B dyes from aqueous solution by Fenton process: Optimization of operational parameters // Iran. J. Chem. Chem. Eng. – 2023. – Vol. 42. – No. 3. – pp. 801-809.
87. Aliasgharlou N., Bahram M., Zolfaghari P., Mohseni N. Modeling and optimization of simultaneous degradation of rhodamine B and acid red 14 binary solution by homogeneous Fenton reaction: a chemometrics approach // Turkish Journal of Chemistry. – 2020. – Vol. 44. – pp. 987-1001.
88. Gayathri P.V., Joseph S., Yesodharan S., Yesodharan E.P. Fenton and solar Fenton processes: inexpensive green technologies for the decontamination of wastewater from toxic Rhodamine B dye pollutant // Water Practice and Technology. – 2023. – Vol. 18. – pp. 1938-1958.
89. Hou M.-F., Liao L., Zhang W.-D., Tang X.-Y., Wan H.-F., Yin G.-C. Degradation of rhodamine B by Fe(0)-based Fenton process with H₂O₂ // Chemosphere. – 2011. – Vol. 83. – pp. 1279-1283.
90. Liang L., Cheng L., Zhang Y., Wang Q., Wu Q., Xue Y., Meng X. Efficiency and mechanisms of rhodamine B degradation in Fenton-like systems based on zero-valent iron // RSC Adv. – 2020. – Vol. 10. – pp. 28509-28515.
91. Cui W., Fang J., Wan Y., Tao X., Guo L., Feng Q. Fast degradation of rhodamine B by in situ H₂O₂ Fenton system with Co and N co-doped carbon nanotubes // Materials. – 2023. – Vol. 16. – Article ID 2606.
92. Zhang X., Ma D., Zhu X. Insights into bicarbonate enhanced heterogeneous Fenton catalyzed by Co/Cu/zeolite for degradation of rhodamine B // Environmental Engineering Research. – 2024. – Vol. 29. – Article ID 230095.
93. Thao N.T., Nga H.T.P., Vo N.Q., Nguyen H.D.K. Advanced oxidation of rhodamine B with hydrogen peroxide over Zn–Cr layered double hydroxide catalysts // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2017. – Vol. 2. – No. 3. – pp. 317-325.
94. Zhou P., Dai Z., Lu T., Ru X., Ofori M.A., Yang W., Hou J., Jin H. Degradation of rhodamine B in wastewater by iron-loaded attapulgite particle heterogeneous Fenton catalyst // Catalysts. – 2022. – Vol. 12. – Article ID 669.
95. Yang J., Jia K., Lu S., Cao Y., Boczkaj G., Wang C. Thermally activated natural chalcopyrite for Fenton-like degradation of Rhodamine B: Catalyst characterization, performance evaluation, and catalytic mechanism // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 12. – Article ID 111469.
96. Du Z. Research progress on degradation of organic pollutants based on metal–organic frameworks materials // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 385. – Article ID 04035.

97. Kong H., Li H., Wang H., Li S., Lu B., Zhao J., Cai Q. Fe-Mo-O doping g-C₃N₄ exfoliated composite for removal of rhodamine B by advanced oxidation and photocatalysis // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 610. – Article ID 155544.
98. Rashad M.M., Ibrahim A.A., Rayan D.A., Sanad M.M.S., Helmy I.M. Photo-Fenton-like degradation of Rhodamine B dye from waste water using iron molybdate catalyst under visible light irradiation // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. – 2017. – Vol. 8. – pp. 175-186.
99. Khan A., Valicsek Z., Horváth O. Photocatalytic degradation of rhodamine B in heterogeneous and homogeneous systems // *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*. – 2021. – Vol. 49. – No. 1. – pp. 9-16.
100. Łoński S., Łoński W., Babilas R., Barbusiński K. Photocatalytic decolourization of rhodamine B by modified photo-Fenton process with quasicrystals – preliminary research // *Architecture Civil Engineering Environment*. – 2023. – No. 2. – pp. 171-176.
101. Wang S., Jia Y., Song L., Zhang H. Decolorization and mineralization of Rhodamine B in aqueous solution with a triple system of Cerium(IV)/H₂O₂/hydroxylamine // *ACS Omega*. – 2018. – Vol. 3. – No. 12. – pp. 18456-18465.
102. Akram M., Chowdhury A., Chakrabarti S. Removal of rhodamine B dye from wastewater by ultrasound-assisted Fenton process: A comparison between bath and probe type sonicators // *Environmental Science: An Indian Journal*. – 2016. – Vol. 12. – Article ID 115.
103. Xu Y., Komarov S., Yamamoto T., Kutsuzawa T. Enhancement and mechanism of rhodamine B decomposition in cavitation-assisted plasma treatment combined with Fenton reactions // *Catalysts*. – 2022. – Vol. 12. – Article ID 1491.
104. Boulahbel I., Bechiri O., Meddah S., Samar M.E. Degradation of Rhodamine B dye in aqueous medium using electro-Fenton and sono-electro-Fenton process // *Desalination and Water Treatment*. – 2022. – Vol. 271. – pp. 297-306.
105. Li Q., Huo Y., Wu H., Li F., Zhang L. Study on the degradation of rhodamine B by the cavitation impinging stream-fenton // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 392. – Article ID 062098.
106. Eslami A., Lachini S.A., Shaterian M., Karami M., Enhessari M. Synthesis, characterization, and hydrogen storage capacity of MgMn₂O₄ spinel nanostructures // *Inorg. Chem. Commun.* – 2023. – Vol. 154. – Article ID 110875.
107. Закон України № 2145-VIII “Pro osvitu”. — Kyiv. - 2017.

108.

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D0%B6%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BE%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%BF%D1%96%D0%B0%D0%B4%D0%B0

109. Kontsepsiia rozvytku pryrodnycho-matematychnoi osvity (STEM-osvity) v Ukraini. — 2020.

110. Innovatsiini transformatsii v suchasni osviti: vyklyky, realii, stratehii / Zbirnyk materialiv III Vseukrainskoho vidkrytoho naukovo praktychnoho onlain-forumu (Kyiv, 15–16 chervnia 2021 roku) / za zah. Red. I.M. Savchenko, V.V. Yemets. — Kyiv. - Natsionalnyi tsentr «Mala akademiia nauk Ukrainy». - 2021. – 414 s.

111. Sait MON Ukrainy: Rezultaty Vseukrainskykh uchnivskykh olimpiad z khimii. - 2018–2025.

112. Pidhotovka maibutnikh uchyteliv fizyky, khimii, biolohii ta pryrodnychych nauk u konteksti vymoh Novoi ukrainskoi shkoly : materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (20 travnia 2021 r., m. Ternopil) - Ternopil : TNPU im. V. Hnatiuka, 2021.- 332 s.

113. Pidhotovka maibutnikh uchyteliv fizyky, khimii, biolohii ta pryrodnychych nauk u konteksti vymoh Novoi Ukrainskoi Shkoly: Materialy V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. 18-19 travnia 2023 r., m. Ternopil. – 310 s.

114. Bukliv R., Buchok O., Buchok L. Do pytannia metodyky provedennia uroku khimii po temi "Osnovy, yikh klasyfikatsiia, sklad i nazvy, fizychni vlastyvosti osnov". - Boston: Primedia eLaunch, 2022. – s. 276-285, DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.PED.4

115. Bukliv Roksoliana, Komarenska Zoryana, Oliynyk Lilianna. Current issues related to the study of chemistry at school. – Boston: Primedia eLaunch, 2023.– c. 68-77. ISBN – 979-8-89074-563-7, DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.4

116. <https://lpnu.ua/news/v-ikhkht-vidbuvsia-intelektualnyi-konkurs-khimiia-dlia-maibutnoho-ukrainy-sered-uchniv-shkil>

117. Типи ліцензій на програмне забезпечення URL: <https://www.juscutum.com/news/tipi-licenziy-na-programne-zabezpechennya>

118. Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях URL: <https://csd.karazin.ua/wp-content/uploads/2025/05/csd.karazin.ua-maket-kmnt-2024.pdf>

119. Встановлення ліцензій – локальне ліцензування / мережеве ліцензування. URL: <https://docs.sentinel.thalesgroup.com/softwareandservices/ems/EMSdocs/Prescriptive/Perpetual/license-installation.htm>

120. Група розробників PostgreSQL. Висока доступність, балансування навантаження та реплікація. URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/different-replication-solutions.html>
121. Перевірки працездатності контейнерів: liveness, readiness та startup-проби. URL: <https://kubernetes.io/docs/concepts/workloads/pods/pod-lifecycle/#container-probes>
122. Відмовостійкість URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Відмовостійкість>
123. Висока доступність. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/High_availability
124. Архітектура зон доступності та регіонів AWS. URL: <https://aws.amazon.com/about-aws/global-infrastructure/>
125. Моніторинг систем та експортування метрик у Prometheus. URL: <https://prometheus.io/docs/introduction/overview/>
126. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5. URL: https://www.google.com/search?sca_esv=27d6f893a4629adc&sxsrf=AE3TifNGG1bE EalHcvboDWeVw-mHqijUXA:1764956442001&udm=2&fbs=AIJpHxGgTawHiLHwN-1vid417oltX14YMUKhf-VEoJ5NVDNAZhrLFjy0gKnRAAt8EMO49IIP4cQ0qBNVMskS6__RG7QKtqp60qP Wc8UPDZKG19xx2b_U3A2fKKHuYQ3mpZGRdTPnT8Kjms2JXWqzDq-3yPva2k-0rnsaKoVlrdB68izjOEybwPKmNNxbkXIdGR1GS0uVGd_2waphhTUEUWKD_jm DLmCZuWZgzX8o_KXEPz9GgNw_5HZ2NN_xhQuFk9WtKfz_GwkHH--qI3NXWCyZVOixAvU3Mg&q=Raspberry+Pi+5&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwitq ZOO_6aRAxUrS_EDHXMALEMQtKgLegQIH BAB&biw=1920&bih=945&dpr=1#sv=CAMSVhoyKhBILW82RTNieFVyYlIUdFINMg5vNkUzYnhVcmJZVHRZTTToO WmxiSW9YTS14ZVlaTE0gBCocCgZtb3NhaWMSEGUtbzZFM2J4VXJiWVR0WU 0YADABGAcg75vz8g8wAkoKCAIQAhgBIAIoAQ
127. Промисловий корпус (міні-ПК) GEEKOM IT13 Mini PC. URL: https://www.google.com/search?sca_esv=27d6f893a4629adc&sxsrf=AE3TifN-fTd4YYnNNkOxkThaVl56l6FijA:1764956542210&udm=2&fbs=AIJpHxbfFMARg kaDMT9Pr_FGhQtRyzwzNA3PsepdmlBhm8e-B46BPula8tnAK262hSyeEqEPyVaRiMZKgu0dgrHmzlRW_W0G1H4S2QVtxP4Wi qhL1HSsGVIPeg47HNFJQND4dZiI2pePi-Tvrg5dpX06r7swZ4ZqQ4_adi8nT2j4Y0Mv0P5L8QBoL6L0I1hikBTyzFSGyDJ8SN C2bDtB4qA1z2ZHv8i0RUmrLkgmJX8aA_IF68ohBDDFHuelrePEd96EDhKYSFdk ysTtsvQiKMo7bTfxQgCyg&q=GEEKOM+IT+13+Mini+PC&sa=X&ved=2ahUKE win9_a9_6aRAxWDT1UIHRxfAywQtKgLegQIFRAB&biw=1920&bih=945&dpr=1 #sv=CAMSVhoyKhBILXVkTTBLOEFkYlpFaGRNMg51ZE0wSzhBZGJaRWhkTT oOWjVNSzh2TkdfEXhnQ00gBCocCgZtb3NhaWMSEGUtdWRNMEs4QWRiWkV oZE0YADABGAcgy6LIgAgwAkoKCAIQAhgBIAIoAQ
128. Теплові характеристики та охолодження Raspberry Pi 5. URL: <https://www.raspberrypi.com/news/thermal-testing-raspberry-pi-5/>

129. Технічна специфікація NEO-M8 / NEO-8M GNSS-модулів URL: https://www.google.com/search?sca_esv=27d6f893a4629adc&sxsrf=AE3TifPd6wD3G65F1uzsBEuQjSlyZAIapg:1764956772046&udm=2&fbs=AIJpHyAMztis4jOUb7M4CnKgkdKDDNv9g0sZllfStUILT-jhmIMg9wf05HV5mEnOWLXp3-PwuGvr8L_S9MfTQCqz42VOGcVooM9m-XCTyjZ4KbvshlrXBKD3_jnIkCGeYy826iLQ9NakdBuXER0z8OwFxx_WtmDn9H1VrDsUwd-ySr9e_vfkIDBFwGaZypvMCxzYA1tkvh-g0ERTs2DcCWpLxU7U5B7YPpQ2K2sXfc3218CO4cprbAaTMufZXMYJOWsN044Tt2e0qbSo45bvySFsQAZ4I3gTA&q=NEO-8M&sa=X&ved=2ahUKEwi1h8SrgKeRAxW9AhAIHdcJBv0QtKgLegQIGRAB&biw=1920&bih=945&dpr=1#sv=CAMSVhoyKhBILU9IU0J0LUs0cWkzeHhNMg5PZVNCdC1LNHFpM3h4TTToOQ2xITG1McS1uZFRub00gBCocCgZtb3NhaWMSEGUtT2VTQnQtSzRxaTN4eE0YADABGAcgrLCVqgUwAkoKCAIQAhgBIAIoAQ
130. Шлюз API: архітектура, шаблони та найкращі практики URL: <https://www.tokenmetrics.com/blog/api-gateway-architecture-patterns>
131. Ідемпотентність запитів та механізми повторів у платіжних операціях URL: <https://stripe.com/docs/idempotency>
132. Безпечне зберігання та керування секретами у Vault. URL: <https://developer.hashicorp.com/vault/docs/secrets>
133. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: колективна монографія / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 с. 6.
134. Vozniuk L. I., Babyak V. I., Gladyshev D. G., Zaulychna I. IN. Project of post-war reconstruction of a school in the city of Irpin // System analysis and intelligent systems for management: proceedings of the 17th International scientific and practical conference, Ankara, Turkey, May 02–05, 2023. – 2023. – С. 27–30.
135. Baziuk D.I., Babyak V.I., Vozniuk L.I. Rekonstruktsiia nediuiuchykh promyslovykh ob'iektiv ta zmina yikhnoho funktsional'noho pryznachennia. Scientific review, №3(66), 2020.
136. Demchyna B., Vozniuk L., Surmai M. (2019). Conditions of existing residential buildings 50–60 years and mistakes of their construction. Theory and Building Practice, Lviv, Vol.1, No.1, 43–49. <https://doi.org/10.23939/jtbp2019.02.043>.
137. Demchyna B., Vozniuk L. (2020). Emergency condition of loggies in buildings with supporting brick walls. Theory and Building Practice, Lviv, Vol.2, No.2, 28–34. <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.028>.
138. Babyak V., Vozniuk L., Bebkko S. Architectural methods of designing specialized dwellings for underutilized blank facades // Архітектурні дослідження. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 128–134

139. Hladyshev D. Modern science: theory, practice, evolution / D. Hladyshev, U. Ivanochko, L. Lisnykh, L. Vozniuk, V. Babyak, Y. Merezhko, O. Hryb, R. Petryshyn, D. Serban, O. Podra, N. Petryshyn, Л., R. Zhelizniak and others – : Staten House LLC, 2025. – 300 c.
140. Hladyshev D. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development: колективна монографія / D. Hladyshev, L. Vozniuk, V. Babyak, A. Smaliychuk, D. Mazur, S. Leibych, S. Kiiko, Y. Ivaskiv, O. Hehedosh, V. Chereshnya, A. Zastrzhnyi, O. Mytsyk, V. Ivaskiv, K. Demchyna, V. Artemenko, Y. Dragun, T. Rymar. – Boston: Primedia eLaunch, 2024. – 418 c.
141. Babyak V. Improvement of scientific approaches to the development of engineering: collective monograph / V. Babyak, D. Hladyshev, L. Vozniuk, I. Mysak, P. Mysak, V. Orel, I. Popadiuk, I. Marlai, B. Pitsyshyn and others – Boston: Primedia eLaunch, 2022. – 562 c.
142. Hladyshev D. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: collective monograph / D. Hladyshev, M. Brodskyi, L. Lisnykh, L. Vozniuk, K. Horbatiuk, O. Sarvadi, M. Haints, A. Hetman, I. Mysak, P. Mysak. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 461 c.
143. Fortinet. (2025). Statystyka kiberbezpeky 2025: Zrostannia zahroz ta vplyv na haluz [Cybersecurity statistics 2025: Growth of threats and impact on the industry]. <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/cybersecurity-statistics>
144. PwC. (2025). Rozbudova kiberbezpeky zavdiaky spivpratsi topmenedzhmentu. Rezultaty “Mizhnarodnoho analitychnoho doslidzhennia doviry do tsyfrovyykh tekhnolohii, 2025” dlia rehionu TsSE [Building cybersecurity through top management cooperation. Results of the “Global Digital Trust Insights Survey 2025” for the CEE region]. <https://www.pwc.com/ua/uk/survey/2025/cee-findings-from-the-2025-global-digital-trust-insights-survey.html>
145. Eling, M., & Schnell, W. (2016). Ten key questions on cyber risk and cyber risk insurance. Technical Report 2016. The Geneva Association, Zurich.
146. Strupczewski, G. (2021). Defining cyber risk. Safety Science, 135, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105143>
147. Almerza, N., Childs, J. S., & Hogg, J. (2022). Replication study: Defining cyber risk. Computer Science, Law.
148. Bahmanova, A., & Lace, N. (2024). Cyber risks: Systematic literature analysis. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, 22(2), 37–47. <https://doi.org/10.54808/JSCI.22.02.37>

149. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Spasiteleva, S., & Skladannyi, P. (2020). Provedennia SWOT-analizu otsiniuvannia informatsiinykh ryzykiv yak zasib formuvannia praktychnykh navychok studentiv spetsialnosti 125 Kiberbezpeka [Conducting SWOT analysis of information risk assessment as a tool for forming practical skills of cybersecurity students]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(10), 158–168. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.10.158168>
150. Orlovskiy, B. M. (2025). Suchasni kiberryzyky: yikh poniattia, struktura ta zastosuvannia u sferi torhivelnoho moreplavstva [Modern cyber risks: Their concept, structure, and application in maritime trade]. *Pravova derzhava*, 58, 210–219. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2025.58.331007>
151. National Bank of Ukraine. (2024). Pro zatverdzhennia Instruktsii z otsiniuvannia na vidpovidnist mizhnarodnym standartam oversaitu sub'ektiv... [On approval of the Instruction on compliance assessment with international standards of oversight of entities performing functions of central securities depository, central counterparty, trade repository, and securities settlement system in Ukraine]. Resolution No. 38, April 5, 2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/v0038500-24>
152. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Skladannyi, P., & Petrenko, T. (2024). Nechitki kohnityvni karty yak instrument vizualizatsii stsenariiv reahuvannia na intsydenty v systemakh bezpeky [Fuzzy cognitive maps as a tool for visualizing incident response scenarios in security systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(26), 417–429. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.707>
153. Castro, J. P. (2024). From reactive to proactive: Leveraging cyber scenarios for resilient cybersecurity. <https://cybersecuritycompass.org/from-reactive-to-proactive-leveraging-cyber-scenarios-for-resilient-cybersecurity-feb86be196f8>
154. Lee, Y.-J. (2024). A study on a scenario-based security incident prediction system for cybersecurity. *Applied Sciences*, 14(24), 11836. <https://doi.org/10.3390/app142411836>
155. Kim, D., Jeon, S., Kim, K., et al. (2024). Guide to developing case-based attack scenarios and establishing defense strategies for cybersecurity exercise in ICS environment. *Journal of Supercomputing*, 80, 21642–21675. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06273-9>
156. Ciccaglione, M., Bracciale, L., Loreti, P., & Miraval Zanon, A. (2025). Cyber range for space systems: Training scenarios for satellite cybersecurity preparedness. In *Joint Proceedings of IS-EUD 2025: 10th International Symposium on End-User Development* (pp. 16–18). Munich, Germany.
157. Kaffenberger, L., & Kopp, E. (2019). Cybersecurity and the financial system. In *Cyber risk scenarios, the financial system, and systemic risk assessment* (pp. v–v). Carnegie Endowment for International Peace. <http://www.jstor.org/stable/resrep20985.3>

158. Keyun, R. (2020). Digital asset valuation and cyber risk measurement: Principles of cybernomics. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367857561>
159. Dictionary of education terms. (n.d.). <https://minicoursegenerator.com/dictionary-of-education-terms/en/letter/a>
160. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., & Harkushenko, A. (2025). Kohnityvnyi pidkhid v informatsiinii ta kiberbezpetsi [Cognitive approach in information and cybersecurity]. Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika, 1(29), 854–866. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.945>
161. Saliieva, O. V., & Yaremchuk, Yu. Ye. (2020). Kohnityvna model dlia doslidzhennia rivnia zakhyshchenosti ob'ekta krytychnoi infrastruktury [Cognitive model for studying the security level of a critical infrastructure object]. Bezpeka informatsii, 26(2), 64–73.
162. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Shevchenko, H., Nehodenko, O., & Spasiteleva, S. (2023). Information security risk management using cognitive modeling. In Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (Vol. 3550, pp. 297–305). ISSN 1613-0073.
163. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Kryvytska, O., Shevchenko, H., & Spasiteleva, S. (2024). Fuzzy cognitive mapping as a scenario approach for information security risk analysis. In Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (Vol. 3826, pp. 356–362). ISSN 1613-0073.
164. Nápoles, G., et al. (2018). FCM expert: Software tool for scenario analysis and pattern classification based on fuzzy cognitive maps. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 27(7), 1860010. <https://doi.org/10.1142/S0218213018600102>
165. EMOTIV. Emotiv EPOC X Mobile 14-Channel EEG Headset : офіційне зображення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.emotiv.com/epoc-x> – Назва з екрану
166. Romanyuk O., Kovalova Yu. Neural interfaces and EEG-based control systems in applied medicine. In: Modern Aspects of Science and Education. Sherman Oaks, California: GS Publishing Services, 2025. pp. 30–48
167. Romanyuk ON, Shenshin OO Methods of EEG-monitoring for cognitive load assessment in neuro-headset systems. In: Applied Computer Engineering. Vinnytsia: VNTU, 2024. pp. 115–128.
168. Yuste R., Goering S., Arcas B., et al. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. Nature. 2021. Vol. 587. pp. 29–31.
169. Cassim F., Houdayer E., Bourriez JL, Derambure P. Nonlinear analysis of EEG and its clinical applications. Clinical Neurophysiology. 2020. Vol. 131. pp. 2181–2195.
170. Tachtsidis I., Scholkmann F. fNIRS in neuroscience: A review of methods and applications. NeuroImage. 2023. Vol. 265. 119902.

171. Dias D., Cunha JPS Wearable health devices—vital sign monitoring, systems and technologies. *Sensors*. 2020. Vol. 20. 13–28.
172. Schleiger E., Sheikh N., Rowland T. Quantitative EEG measures in neurometabolic and genetic disorders: diagnostic perspectives. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 2021. Vol. 38(4). pp. 291–302.
173. Guerrini R., et al. Genetic epileptic encephalopathies: EEG biomarkers and early diagnosis. *Epilepsy Research*. 2022. Vol. 185. 106979.
174. Kirmizi-Alsan E., Uslu A. Early detection of neurodevelopmental disorders using EEG and machine learning. *Frontiers in Neuroscience*. 2023. Vol. 17. 1124872.
175. Pascual-Marqui R. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): methods and applications. *Brain Topography*. 2020. Vol. 34. pp. 20–35.
176. Romanyuk O. N., Pavlov S. V. Development of implantable neurointerfaces. Collection of abstracts of the IV International scientific and technical conference "Prospects for the development of mechanical engineering and transport. - 2025": Collection of abstracts. [Electronic edition] - Vinnytsia: VNTU. - 2025.- P. 403-405.
177. Romanyuk O., Pavlov V., Titova N., Romanyuk S., and Maidanyuk V. Use of neurosets for the diagnosis of diseases, *Opt-el. inf-energ. tech.*, vol. 49, vol. 1, pp. 168–177, 2025.
178. Шишацький А. В., Башкиров О. М., Костина О. М. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил. // Науково-технічний журнал "Озброєння та військова техніка". 2015. № 1(5). С. 35–40.
179. V. Dudnyk, Yu. Sinenko, M. Matsyk, Ye. Demchenko, R. Zhyvotovskiy, Iu. Repilo, O. Zabolotnyi, A. Simonenko, P. Pozdniakov, A. Shyshatskyi. Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. No. 2 (105). 2020. pp. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>.
180. Sova, O., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., & Hrokholskyi, Y. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2021, No. 4, pp. 30-40. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940>.
181. Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., and Shyshatskyi, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. *EUREKA: Physics and Engineering*, No. (4), pp. 78-89. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>.

182. P. Zuiev, R. Zhyvotovskiy, O. Zvieriev, S. Hatsenko, V. Kuprii, O. Nakonechnyi, M. Adamenko, A. Shyshatskyi, Y. Neroznak, V. Velychko. Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 4, No. 9 (106), pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>.
183. A. Shyshatskyi, O. Zvieriev, O. Salnikova, Ye. Demchenko, O. Trotsko, Ye. Neroznak. Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Vol. 9, No. 4, pp. 5583–5590 DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>.
184. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 31–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
185. Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A., Nalapko, O., Shknai, O., Zhyvylo, Y., Yerko, V., Kreminskyi, B., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Improvement of the optimization method based on the cat pack algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No.9 (121), pp. 41–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273786>.
186. Шишацький А. В., Зайцев М. М., Гаценко С. С. Аналіз характеру сучасних воєнних конфліктів Україна в умовах сучасних викликів та загроз: глобальний та національний виміри: матеріали наук.-практ. семінару (Київ, 17 лют. 2023 р.) / за ред. Г. П. Ситника, Л. М. Шипілової. Київ: На-вч.-наук. ін-т публ. упр. та держ. служби Київ. нац.ун-ту імені Тараса Шевченка, 2023. С.46–49.
187. A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskiy, Y. Prokopenko, T. Hurskyi, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskyi. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 9 (101). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.
188. Mahdi Q. A., Shyshatskyi A., Prokopenko Y., Ivakhnenko T., Kupriyenko D., Golian V., Lazuta R., Kravchenko S., Protas N. & Momit A.. Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 3, No. 9(111), pp. 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>.
189. Shyshatskyi, A., Tiurnikov, M., Suhak, S., Bondar, O., Melnyk, A., Bokhno, T., & Lyashenko, A.. Методика оцінки ефективності системи зв'язку оперативного угруповання військ. Сучасні інформаційні системи. 2020. Том 4, № 1, с. 107–112. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>.

190. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., & Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol 2, No. 4 (122), pp. 31–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
191. Tarkhan, A. B., Zhuravskyi, Y., Shyshatskyi, A., Pluhina, T., Dudnyk, V., Kiris, I., Nalapko, O., Protas, N., Neronov, S., & Nechyporuk, V. (2023). Development of a solution search method using an improved fish school algorithm . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4, No. 4 (124), pp. 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284315>.
192. Koval, V., Shyshatskyi, A., Ransevykh, R., Gura, V., Nalapko, O., Shypilova, L., Protas, N., Volkov, O., Stanovskyi, O., & Chaikovska, O. (2023). Development of a method for the search of solutions in the sphere of national security using bio-inspired algorithms. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280355>
193. Koval M., Sova O., Shyshatskyi A., Orlov O., Artabaiev Yu., Shknai O., Veretnov A., Koshlan O., Zhyvylo Ye., Zhyvylo I. Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. Eastern-european journal of enterprise technologies, 2022, Vol 5, No 9 (119), pp.34–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266009.
194. Налапко О. Л. Analysis of technical characteristics of the network with possibility to self-organization / О. Л. Налапко, А. В. Шишацький. // Сучасні інформаційні системи. – Харків, 2018. – №4, Том 2. – С. 78–86.
195. Nina Kuchuk, Amin Salih Mohammed, Andrii Shyshatskyi and Oleksii Nalapko. The Method of Improving the Efficiency of Routes Selection in Networks of Connection with the Possibility of Self-Organization (Scopus). International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2019. – №1.2., Volume 8. – С. 1–6. DOI: 10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.
196. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / O.Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
197. O. Nalapko, A. Shyshatskyi, V. Ostapchuk, Qasim Abbood Mahdi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk, Ye. Lebel, S. Diachenko, V. Velychko, I. Poliak Development of a method of adaptive control of military radio network parameters. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 9 – 2021. – № 1(109). – С. 18–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225331.

198. I. Alieinykov, K. A. Thamer, Y. Zhuravskiy, O. Sova, N. Smirnova, R. Zhyvotovskiy, S. Hatsenko, S. Petruk, R. Pikul, A. Shyshatskiy. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 2 (102). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>.
199. Shyshatskiy A. Method of multicriterial evaluation of the state of the special purposes of radio communication system channels / A. Shyshatskiy, O. Zhuk, R. Zhyvotovskiy, P. Zhuk // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. - 2017. - № 4. - С. 75-83. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_4_12.
200. Shyshatskiy, A., Sova, O., Zhuravskiy, Y., Zhyvotovskiy, R., Lyashenko, A., Cherniak, O., Zinchenko, K., Lazuta, R., Melnyk, A., & Simonenko, A. (2019). Development of resource distribution model of automated control system of special purpose in conditions of insufficiency of information on operational development. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 1, No 2(51), pp. 35–39. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198082>.
201. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskiy, A., Protas, N., Kravchenko, S., Solomakha, A., Neroznak, Y., Gaman, O., Merkotan, D., & Miahkykh, H. (2021). Analysis of methods for increasing the efficiency of dynamic routing protocols in telecommunication networks with the possibility of self-organization. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5, No. 2(61), pp. 44–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239096>.
202. Minochkin, A., Shyshatskiy, A., Hasan, V., Hasan, A., Opalak, A., Hlushko, A., Demchenko, O., Lyashenko, A., Havryliuk, O., & Ostapenko, S. (2021). The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No.2(60), pp. 22–27. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.
203. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskiy, Dmytro Shevchenko, Bohdan Molodetskiy, Vitalii Stryhun, Yurii Yivzhenko, Yevhen Stepanenko, Nadiia Protas, & Oleksii Nalapko. (2022). Development of the method of increasing the efficiency of information transfer in the special purpose networks. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 3(4 (117)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259727>.
204. Sova, O., Zhuravskiy, Y., Vakulenko, Y., Shyshatskiy, A., Salnikova, O., & Nalapko, O. (2022). Development of methodological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 159-166. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002434>.

205. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Pavel Shvets, Valentyna Tkachenko, Serhii Nevhad, Oleksandr Zhuk, Serhii Kravchenko, Bohdan Molodetskyi, & Hennadii Miahkykh. (2022). Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122>.
206. Шишацький А.В., Сова О.Я., Журавський Ю.В., Троцько О.О. Методологічні засади інтелектуальної обробки даних в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph* / Beresjuk O., Lemeschew M., Stadnijtschuk M., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. 543 p. Available at :DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>
207. Романов О. М., Шишацький А. В., Налапко О. Л. Розробка методу підвищення оперативності передачі інформації в мережах спеціального призначення. *Modernn aspekty vědy: XXI. Dñl mezinñrodnñ kolektivnñ monografie / Mezinñrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o.. Āeskñ republika: Mezinñrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o.*, 2022. С. 381–403.
208. Sova, O., Zhuravskyi, Y., Zaitsev, M., Shyshatskyi, A., Andriishena, H. (2022). Development of an approach to the creation of an intellectual system of national security management. *ScienceRise*, No. 6, pp. 18–24. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002811>.
209. Shyshatskyi, A., Hurskyi, T., Vdovytskyi, Y., Vozniak, R., Nalapko, O., Andriishena, H., Shabanova-Kushnarenko, L., Protas, N., Vakulenko, Y., & Pyvovarchuk, S. (2023). Development of method for the identification of hybrid challenges and threats in the national security management system. *Technology Audit and Production Reserves*, No. 2(70), pp. 16–19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276544>.
210. Bezuhlyi, V., Oliynyk, V., Romanenko I., Zhuk, O., Kuzavkov, V., Borysov, O., Korobchenko, S., Ostapchuk, E., Davydenko, T., & Shyshatskyi, A. (2021). “Development of object state estimation method in intelligent decision support systems”. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 3 (113), pp. 54–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239854>.
211. Voznytsia, A., Sharonova, N., Babenko, V., Ostapchuk, V., Neronov, S., Feoktystov, S., Chetverikov, R., Prokopenko, O., Starynskyi, I., & Stoichev, M. (2025). Development of methods for intelligent assessment of parameters in decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (136), pp. 73–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337528>.

212. Shyshatskyi, A., Plekhova, G., Odarushchenko, E., Miahkykh, H., Feoktystova, O., Shostak, I., Honcharuk, D., Lytvynenko, O., Lyashenko, A., & Kapran, Y. (2025). Development of a polymodel complex of information systems resource management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (136), pp. 58–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335688>.
213. Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). *Information and control systems: modelling and optimizations*. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC. 232p. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>.
214. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Tulenko, I., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (134), pp. 23–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102>.
215. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Babenko, V., Bieliakov, R., Odarushchenko, E., Protas, N., Stasiuk, T., Rukavyshnikov, Y., Miziak, I., & Lantrat, O. (2024). Development of a solution search method using artificial intelligence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (128), pp. 38–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300261>.
216. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / O.Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
217. S. Kalantaievska, H. Pievtsov, O. Kuvshynov, A. Shyshatskyi, S. Yarosh, S. Gatsenko, H. Zubrytskyi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk and V. Zuiko. Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 5, No 9 (95) (2018): pp. 60–76. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144085>.
218. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Hasan, A., Velychko, V., Trotsko, O., Merkotan, D., Protas, N., Lazuta, R., & Yakovchuk O. (2021). Analysis of mathematical models of mobility of communication systems of special purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No. 2(60), pp. 39–44. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237433>.
219. Shyshatskyi, A., Ovchynnyk, V., Momotov, A., Protas, N., & Solomakha, A. (2021). Development of a mathematical model of radio resource management of special purpose radio communication systems based on an evolutionary approach. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 1, No. 63, pp. 15–20. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.251918>.

220. Koval, M., Sova, O., Orlov, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Shknai, O., Veretnov, A., Koshlan, O., Zhyvylo, Y., & Zhyvylo, I. (2022). Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 9(119), pp. 34–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266009>.
221. Fedoriienko, V., Koshlan, O., Kravchenko, S., Shyshatskyi, A., Vasiukova, N., Trotsko, O., Havryliuk, O., Sovik, O., Alieinik, O., & Svyryda, Y. (2021). Development of a methodological approach for processing different types of data in systems of special purpose. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 6, No. 2(62), pp. 18–24. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.243950>.
222. Abed, A. A., Repilo, I., Zhyvotovskiy, R., Shyshatskyi, A., Hohoniants, S., Kravchenko, S., Zhyvylo, I., Dieniezhkin, M., Protas, N., & Shcheptsov, O. (2021). Improvement of the method of estimation and forecasting of the state of the monitoring object in intelligent decision support systems . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vo. 4, No. 3(112), pp. 43–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237996>.
223. Koval, M., Sova, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Garashchuk, N., Yivzhenko, Y., Luscschay, Y., Dovhopoliuk, L., Haidenko, O., & Dorofeev, M. (2022). Improving the method for increasing the efficiency of decision-making based on bio-inspired algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 4 (120), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268621>.
224. Шишацький А. В., Башкиров О. М., Костина О. М. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил. // Науково-технічний журнал “Озброєння та військова техніка”. 2015. № 1(5). С. 35 –40.
225. V. Dudnyk, Yu. Sinenko, M. Matsyk, Ye. Demchenko, R. Zhyvotovskiy, Iu. Repilo, O. Zabolotnyi, A. Simonenko, P. Pozdniakov, A. Shyshatskyi. Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. No. 2 (105). 2020. pp. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>.
226. Sova, O., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., & Hrokholskyi, Y. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2021, No. 4, pp. 30-40. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940>.
227. Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., and Shyshatskyi, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. *EUREKA: Physics and Engineering*, No. (4), pp. 78-89. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>.

228. P. Zuiev, R. Zhyvotovskiy, O. Zvieriev, S. Hatsenko, V. Kuprii, O. Nakonechnyi, M. Adamenko, A. Shyshatskyi, Y. Neroznak, V. Velychko. Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 4, No. 9 (106), pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>.
229. A. Shyshatskyi, O. Zvieriev, O. Salnikova, Ye. Demchenko, O. Trotsko, Ye. Neroznak. Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Vol. 9, No. 4, pp. 5583–5590 DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>.
230. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 31–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
231. Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A., Nalapko, O., Shknai, O., Zhyvylo, Y., Yerko, V., Kreminskyi, B., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Improvement of the optimization method based on the cat pack algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No.9 (121), pp. 41–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273786>.
232. Шишацький А. В., Зайцев М. М., Гаценко С. С. Аналіз характеру сучасних воєнних конфліктів Україна в умовах сучасних викликів та загроз: глобальний та національний виміри: матеріали наук.-практ. семінару (Київ, 17 лют. 2023 р.) / за ред. Г. П. Ситника, Л. М. Шипілової. Київ: На-вч.-наук. ін-т публ. упр. та держ. служби Київ. нац.ун-ту імені Тараса Шевченка, 2023. С.46–49.
233. A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskiy, Y. Prokopenko, T. Hurskyi, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskyi. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 9 (101). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.
234. Mahdi Q. A., Shyshatskyi A., Prokopenko Y., Ivakhnenko T., Kupriyenko D., Golian V., Lazuta R., Kravchenko S., Protas N. & Momit A.. Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 3, No. 9(111), pp. 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>.
235. Shyshatskyi, A., Tiurnikov, M., Suhak, S., Bondar, O., Melnyk, A., Bokhno, T., & Lyashenko, A.. Методика оцінки ефективності системи зв'язку оперативного угруповання військ. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Том 4, № 1, с. 107–112. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>.

236. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., & Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol 2, No. 4 (122), pp. 31–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
237. Tarkhan, A. B., Zhuravskyi, Y., Shyshatskyi, A., Pluhina, T., Dudnyk, V., Kiris, I., Nalapko, O., Protas, N., Neronov, S., & Nechyporuk, V. (2023). Development of a solution search method using an improved fish school algorithm . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4, No. 4 (124), pp. 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284315>.
238. Koval, V., Shyshatskyi, A., Ransevykh, R., Gura, V., Nalapko, O., Shypilova, L., Protas, N., Volkov, O., Stanovskyi, O., & Chaikovska, O. (2023). Development of a method for the search of solutions in the sphere of national security using bio-inspired algorithms. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280355>
239. Koval M., Sova O., Shyshatskyi A., Orlov O., Artabaiev Yu., Shknai O., Veretnov A., Koshlan O., Zhyvylo Ye., Zhyvylo I. Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. Eastern-european journal of enterprise technologies, 2022, Vol 5, No 9 (119), pp.34–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266009.
240. Налапко О. Л. Analysis of technical characteristics of the network with possibility to self-organization / О. Л. Налапко, А. В. Шишацький. // Сучасні інформаційні системи. – Харків, 2018. – №4, Том 2. – С. 78–86.
241. Nina Kuchuk, Amin Salih Mohammed, Andrii Shyshatskyi and Oleksii Nalapko. The Method of Improving the Efficiency of Routes Selection in Networks of Connection with the Possibility of Self-Organization (Scopus). International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2019. – №1.2., Volume 8. – С. 1–6. DOI: 10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.
242. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / O.Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
243. O. Nalapko, A. Shyshatskyi, V. Ostapchuk, Qasim Abbood Mahdi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk, Ye. Lebel, S. Diachenko, V. Velychko, I. Poliak Development of a method of adaptive control of military radio network parameters. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 9 – 2021. – № 1(109). – С. 18–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225331.

244. I. Alieinykov, K. A. Thamer, Y. Zhuravskiy, O. Sova, N. Smirnova, R. Zhyvotovskiy, S. Hatsenko, S. Petruk, R. Pikul, A. Shyshatskiy. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 2 (102). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>.
245. Shyshatskiy A. Method of multicriterial evaluation of the state of the special purposes of radio communication system channels / A. Shyshatskiy, O. Zhuk, R. Zhyvotovskiy, P. Zhuk // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. - 2017. - № 4. - С. 75-83. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_4_12.
246. Shyshatskiy, A., Sova, O., Zhuravskiy, Y., Zhyvotovskiy, R., Lyashenko, A., Cherniak, O., Zinchenko, K., Lazuta, R., Melnyk, A., & Simonenko, A. (2019). Development of resource distribution model of automated control system of special purpose in conditions of insufficiency of information on operational development. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 1, No 2(51), pp. 35–39. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198082>.
247. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskiy, A., Protas, N., Kravchenko, S., Solomakha, A., Neroznak, Y., Gaman, O., Merkotan, D., & Miahkykh, H. (2021). Analysis of methods for increasing the efficiency of dynamic routing protocols in telecommunication networks with the possibility of self-organization. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5, No. 2(61), pp. 44–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239096>.
248. Minochkin, A., Shyshatskiy, A., Hasan, V., Hasan, A., Opalak, A., Hlushko, A., Demchenko, O., Lyashenko, A., Havryliuk, O., & Ostapenko, S. (2021). The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No.2(60), pp. 22–27. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.
249. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskiy, Dmytro Shevchenko, Bohdan Molodetskiy, Vitalii Stryhun, Yurii Yivzhenko, Yevhen Stepanenko, Nadiia Protas, & Oleksii Nalapko. (2022). Development of the method of increasing the efficiency of information transfer in the special purpose networks. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 3(4 (117)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259727>.
250. Sova, O., Zhuravskiy, Y., Vakulenko, Y., Shyshatskiy, A., Salnikova, O., & Nalapko, O. (2022). Development of methodological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 159-166. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002434>.

251. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Pavel Shvets, Valentyna Tkachenko, Serhii Nevhad, Oleksandr Zhuk, Serhii Kravchenko, Bohdan Molodetskyi, & Hennadii Miahkykh. (2022). Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122>.
252. Шишацький А.В., Сова О.Я., Журавський Ю.В., Троцько О.О. Методологічні засади інтелектуальної обробки даних в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Beresjuk O., Lemeschew M., Stadnijtschuk M., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. 543 p. Available at :DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>*
253. Романов О. М., Шишацький А. В., Налапко О. Л. Розробка методу підвищення оперативності передачі інформації в мережах спеціального призначення. *Modernn aspekty vědy: XXI. Dñl mezinñrodnñ kolektivnñ monografie / Mezinñrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o.. Āeskñ republika: Mezinñrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o., 2022. С. 381-403.*
254. Sova, O., Zhuravskyi, Y., Zaitsev, M., Shyshatskyi, A., Andriishena, H. (2022). Development of an approach to the creation of an intellectual system of national security management. *ScienceRise*, No. 6, pp. 18–24. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002811>.
255. Shyshatskyi, A., Hurskyi, T., Vdovytskyi, Y., Vozniak, R., Nalapko, O., Andriishena, H., Shabanova-Kushnarenko, L., Protas, N., Vakulenko, Y., & Pyvovarchuk, S. (2023). Development of method for the identification of hybrid challenges and threats in the national security management system. *Technology Audit and Production Reserves*, No. 2(70), pp. 16–19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276544>.
256. Bezuhlyi, V., Oliynyk, V., Romanenko I., Zhuk, O., Kuzavkov, V., Borysov, O., Korobchenko, S., Ostapchuk, E., Davydenko, T., & Shyshatskyi, A. (2021). “Development of object state estimation method in intelligent decision support systems”. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 3 (113), pp. 54–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239854>.
257. Voznytsia, A., Sharonova, N., Babenko, V., Ostapchuk, V., Neronov, S., Feoktystov, S., Chetverikov, R., Prokopenko, O., Starynskyi, I., & Stoichev, M. (2025). Development of methods for intelligent assessment of parameters in decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (136), pp. 73–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337528>.

258. Shyshatskyi, A., Plekhova, G., Odarushchenko, E., Miahkykh, H., Feoktystova, O., Shostak, I., Honcharuk, D., Lytvynenko, O., Lyashenko, A., & Kapran, Y. (2025). Development of a polymodel complex of information systems resource management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (136), pp. 58–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335688>.
259. Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). *Information and control systems: modelling and optimizations*. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC. 232p. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>.
260. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Tulenko, I., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (134), pp. 23–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102>.
261. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Babenko, V., Bieliakov, R., Odarushchenko, E., Protas, N., Stasiuk, T., Rukavyshnikov, Y., Miziak, I., & Lantrat, O. (2024). Development of a solution search method using artificial intelligence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (128), pp. 38–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300261>.
262. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / O.Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
263. S. Kalantaievska, H. Pievtsov, O. Kuvshynov, A. Shyshatskyi, S. Yarosh, S. Gatsenko, H. Zubrytskyi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk and V. Zuiko. Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 5, No 9 (95) (2018): pp. 60–76. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144085>.
264. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Hasan, A., Velychko, V., Trotsko, O., Merkotan, D., Protas, N., Lazuta, R., & Yakovchuk O. (2021). Analysis of mathematical models of mobility of communication systems of special purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No. 2(60), pp. 39–44. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237433>.
265. Shyshatskyi, A., Ovchynnyk, V., Momotov, A., Protas, N., & Solomakha, A. (2021). Development of a mathematical model of radio resource management of special purpose radio communication systems based on an evolutionary approach. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 1, No. 63, pp. 15–20. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.251918>.

266. Koval, M., Sova, O., Orlov, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Shknai, O., Veretnov, A., Koshlan, O., Zhyvylo, Y., & Zhyvylo, I. (2022). Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 9(119), pp. 34–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266009>.
267. Fedoriienko, V., Koshlan, O., Kravchenko, S., Shyshatskyi, A., Vasiukova, N., Trotsko, O., Havryliuk, O., Sovik, O., Alieinik, O., & Svyryda, Y. (2021). Development of a methodological approach for processing different types of data in systems of special purpose. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 6, No. 2(62), pp. 18–24. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.243950>.
268. Abed, A. A., Repilo, I., Zhyvotovskiy, R., Shyshatskyi, A., Hohoniants, S., Kravchenko, S., Zhyvylo, I., Dieniezhkin, M., Protas, N., & Shcheptsov, O. (2021). Improvement of the method of estimation and forecasting of the state of the monitoring object in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 3(112), pp. 43–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237996>.
269. Koval, M., Sova, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Garashchuk, N., Yivzhenko, Y., Luscschay, Y., Dovhopoliuk, L., Haidenko, O., & Dorofeev, M. (2022). Improving the method for increasing the efficiency of decision-making based on bio-inspired algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 4 (120), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268621>.
270. Haasis G. Möglichkeiten der Optimierung beim Honen. *Werkst. u. Betr.* 108 (1975) 2, S. 95-107/
271. Haasis G. Neue technologische Gesichtspunkte beim Langhubhonen von Bohrunge. *Techn. Mitt. HdT.* 71 (1978) 5, S. 253-262.
272. Klink U., Floves G. Honen (Jahresübersicht). *VDI 121* (1979) 10, S. 543-554.
273. Haasis G. Honen mit Diamant-und CBN-Werkzeugen. *VDI-Z.* 120 (1978) 24, S.96-103.
274. Fritz Klocke Manufacturing processes. Grinding honing, lapping/ RWTH AACHEN University/ RWTH edition/ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
275. Davim, J.P. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*; Springer: London, UK, 2008.
276. Gruszka, J.; Suchecki, A. Nowe metody kształtowania powierzchni cylindrów silników spalinowych. *Siln. Spalinowe* 2007, 46, 27–35.
277. ISO 13565-2:1996; Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method. Surfaces Having Stratified Functional Properties—Part 2: Height Characterization Using the Linear Material Ratio Curve; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.

278. ISO 13565-3:1998; Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method. Surfaces Having Stratified Functional Properties—Part 3: Height Characterization Using the Material Probability Curve; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1998.
279. ISO 13565-1:1996; Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method. Surfaces Having Stratified Functional Properties—Part 1: Filtering and General Measurement Conditions; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
280. Wang, D.; Wang, L.; Wu, J. Physics-based mechatronics modeling and application of an industrial-grade parallel tool head. *Mech. Syst. Signal Process.* 2020, 148, 107158.
281. Jatti, P.; Mench, R.G. Developing an auto sizing system for vertical honing machine. *Int. J. Recent Res. Civ. Mech. Eng.* 2015, 1, 6–15.
282. Pawlus, P.; Reizer, R. Functional importance of honed cylinder liner surface texture: A review. *Tribol. Int.* 2021, 167, 107409.
283. Sender, P. Analysis of Honing of Cylindrical Holes with Variable Kinematics Conditions. Ph.D. Thesis, Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland, 2021
284. Підгаєцький М.М. Особливості регулювання радіального розміру відділових різальних інструментів з допомогою оболонкової форми під дією гідростатичного тиску/ М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузева машинобудування, автоматизація. / Вип. 24 Ч.2 – Кіровоград: КНТУ, 2011. – с. 136-140.
285. Підгаєцький М.М. Продукційний хонінгувальний верстат з адаптивно-програмним керуванням/ М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина, О.В. Лобода // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузева машинобудування, автоматизація. / Вип. 25 – Кіровоград: КНТУ, 2012.
286. Підгаєцький М.М. Хонінгування отворів великих діаметрів // М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина, Л.В. Копосова // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузева машинобудування, автоматизація. / Вип. 25 – Кіровоград: КНТУ, 2012.
287. Підгаєцький М.М. Адаптивне керування системами регулювання радіального розміру алмазно-абразивного інструменту // М.М. Підгаєцький, М.І. Черновол, К.К. Щербина // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин/ Вип. 42 ч. I. – Кіровоград: КНТУ, 2012.

288. Підгаєцький М.М. Утворення складної траєкторії руху зерна при хонінгуванні отворів // М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина // Вісник Чернігівського державного технологічного університету «Технічні науки», №3 (59), 2012 р.
289. Підгаєцький М.М. Гідростатичний хон для обробки отворів малих діаметрів // М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Збірник наукових праць./ Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012 - №53 с3-10.
290. Підгаєцький М.М. Аналіз впливу попередньої макронерівності в процесі хонінгування прецензійних отворів // М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин/ Вип. 26. – Кіровоград: КНТУ, 2013.
291. Петраков Ю.В. Автоматизоване управління процесами обробки матеріалів різанням. К. : 2004. 384с.
292. Lawrence, K.D.; Ramamoorthy, B. Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines. Appl. Surf. Sci. 2016, 365, 19-30.
293. Demirci, I.; Mezghani, S.; Yousfi, M.; El Mansori, M. Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance. Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol. 2015, 230, 1030-1037.
294. Deshpande, A.K.; Bhole, H.A.; Choudhari, L.A. Analysis of Super-Finishing Honing Operation with Old and New Plateau Honing Machine Concept. Int. J. Eng. Res. Gen. Sci. 2015, 3, 812-818.
295. Paswan, S.K.; Bedi, T.S.; Singh, A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process. Wear 2017, 376-377, 1207-1221.
296. Arantes, L.J.; Fernandes, K.A.; Schramm, C.R.; Silveira Leal, J.E.; Piratelli-Filho, A.; Franco, S.D.; Arencibia, R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017, 93, 635-649.
297. Gehring-group: веб-сайт. URL: <https://gehring-group.com/en/honing/tools/> дата звернення 12.10.2025
298. К.К. Щербина, А.І. Гречка В.А. Мажара, Т.В. Дяченко Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип.50. – С.159-164

299. Підгаєцький М. М. Гідростатичний хон для обробки отворів малих діаметрів / М. М. Підгаєцький, К. К. Щербина // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 53(959). – С. 3–10.
300. Спосіб регулювання радіального розміру при обробці отворів та інструмент для його здійснення : пат. на винахід № 101595 Україна, МПК В23D 77/00, В24В 33/00 / М. М. Підгаєцький, К. К. Щербина ; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – № u201102968; заявл. 14.03.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. – 6 с. : іл.
301. K. Scherbyna Mechanics of contact interaction of elastic helical hone and machining surface / K. Scherbyna // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2019. – №4 (275). – С.15-21.
302. М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина, В.А. Мажара, Т.В. Дяченко Динамічний аналіз традиційної кінцевої ланки хонінгувальної головки Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2019. – Вип.49. – С.194-200. (Index Copernicus, Word Cat, CrossRef, ResearchBib, Google Scholar).
303. Щербина К.К. Експериментальне дослідження деформації пружно-гвинтового хона / К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, В.А. Мажара, А.І. Гречка, Т.В. Дяченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.
304. Динамічний аналіз кільково-клинового хону в зоні малих переміщень / К.К. Щербина, В.А. Мажара, Д.Р. Торчілов, С.М. Заїка, В.М. Масляніков / Вісник Хмельницького національного університету, No3,Т.2,2024(337) с. 250-254 <https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/138/278>
305. Tian, C.; Li, X.; Chen, Z.; Guo, G.; Wang, L.; Rong, Y. Study on formability, mechanical property and finite element modeling of 3D-printed composite for metal-bonded diamond grinding wheel application. J. Manuf. Process. 2020, 54, 38–47.
306. Grech MR. Fatigue Risk Management: A Maritime Framework. Int J Environ Res Public Health. 2016 Jan 29;13(2):175. doi: 10.3390/ijerph13020175. PMID: 26840326; PMCID: PMC4772195.
307. International Labour Organization. Maritime Labour Convention. ILO; Geneva, Switzerland: 2006.
308. International Maritime Organization. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers. IMO; London, UK: 1978. 1978 as Amended.
309. Allen P., Wadsworth E., Smith A. Seafarers' fatigue: A review of the recent literature. Int. Marit. Health. 2008;591:81–92.

310. Allen P., Wellens B.T., McNamara R., Smith A. Contemporary Ergonomics. Taylor & Francis; London, UK: 2005. It's not all plain sailing. Port turn-arounds and seafarers' fatigue: A case study; pp. 563–567.
311. Oldenburg M., Hogan B., Jensen H.J. Systematic review of maritime field studies about stress and strain in seafaring. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 2013;86:1–15. doi: 10.1007/s00420-012-0801-5.
312. Akhtar J., Utne I.B. Fatigue at sea—A manning problem. *J. Marit. Res.* 2014;11:27–42.
313. Wadsworth E.J.K., Allen P.H., Wellens B.T., McNamara R.L., Smith A.P. Patterns of fatigue among seafarers during a tour of duty. *Am. J. Ind. Med.* 2008;49:836–844. doi: 10.1002/ajim.20381.
314. Arendt J.B., Middleton P., Williams G.F., Luke C. Sleep and circadian phase in a ship's crew. *J. Biol. Rhythm.* 2006;21:214–221. doi: 10.1177/0748730405285278.
315. Calhoun S.R. Human Factors in Ship Design: Preventing and Reducing Shipboard Operator Fatigue. University of Michigan; Ann Arbor, MI, USA: 2006.
316. Louie V.W., Doolen T.L. A study of factors that contribute to maritime fatigue. *Mar. Technol.* 2007;44:82–92.
317. Härmä M., Partinen M., Repo R., Sorsa M., Siivonen P. Effects of 6/6 and 4/8 watch systems on sleepiness among bridge officers. *Chronobiol. Int.* 2008;25:413–423. doi: 10.1080/07420520802106769.
318. Phillips R.O. An Assessment of Studies of Human Fatigue in Land and Sea Transport. Institute of Transport Economics (TØI); Oslo, Norway: 2014. 1354/2014.
319. Phillips R.O., Nævestad T.O., Bjørnskau T. Fatigue in Operators of Land- and Sea-Based Transport Forms in Norway: Literature Review and Expert Opinion. Institute of Transport Economics; Oslo, Norway: 2015. 1395/2015.
320. Шумілова К., Шумілов Д. Технологічні ризики при маневруванні морського судна в рейсовому циклі. Monograph. – Primedia eLaunch, Boston, USA, 2024. – 203 p. URL: <https://isg-konf.com/979-8-89480-695-2/>
321. Шумілова К. В., Мальцев А. С. Управління індивідуальними навігаційними ризиками рейсового циклу морського судна. Судноводіння. – Одеса: НУОМА, 2022, Вип. 33. – С. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.33.2022.128-142>
322. Shumilova, K., Shumilov, D., & Maltsev, A. (2024). Classification of Cyber Risks for Sea Vessel's Voyage Cycle. *Transactions on Maritime Science*, 13(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n01.w20>
323. Maltsev, A., Muravyov, G., & Shumilova, K. (2025). Intelligent systems for planning the path and controlling the movement of autonomous vessels in extensive shallow water in case of cyber-attacks. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 4(1), 122–140. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.11>

324. Bolbot, V., Kulkarni, K., Brunou, P., Banda, O. V., & Musharraf, M. (2022). Developments and research directions in maritime cybersecurity: A systematic literature review and bibliometric analysis. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 39, Article 100571. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100571>
325. Androjna, A. and Perković, M. (2021). Impact of Spoofing of Navigation Systems on Maritime Situational Awareness. *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 10(2), pp. 361–373. doi: 10.7225/toms.v10.n02.w08.
326. Sciancalepore, S., Tedeschi, P., Aziz, A. and Pietro, R. Di. (2021). Auth-AIS: Secure, Flexible, and Backward-Compatible Authentication of Vessels AIS Broadcasts. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 1 p. doi: 10.1109/TDSC.2021.3069428.
327. Caprolu, M., Pietro, R. D., Raponi, S., Sciancalepore, S. and Tedeschi, P. (2020). Vessels Cybersecurity: Issues, Challenges, and the Road Ahead. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 58, No. 6, pp. 90-96. doi: 10.1109/MCOM.001.1900632.
328. Шумілова К. В. Реалізація стратегії кібербезпеки в системі управління безпекою судна. *Судноводіння*. – Одеса: НУ «ОМА», 2021, Вип. 31. – С. 99-107. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.99-107>
329. Шумілова К. В., Мальцев А. С., Волков О. М., Шумілов Д. І. Розрахунок індивідуальних параметрів навігаційної безпеки морської операції маневрування судна, з урахуванням мілководдя та навігаційних і кібернетичних ризиків. Monograph. – «Modern aspects of science», 56-th volume of the international collective monograph. – Publishing Group «Scientific Perspectives», International Economic Institute s.r.o., Czech Republic, 2025. – P. 221-295. <https://doi.org/10.52058/56-2025>
330. MSC-FAL.1/Circ3, Guidelines on maritime cyber risk management. URL: <https://surl.li/jvgsjw>
331. IACS unified requirements for cyber security mandatory from 1 January 2024. URL: <https://surl.li/meoits>
332. Guidelines on Cyber Security on board Ships issued by ICS, IUMI, BIMCO, OCIMF, INTERTANKO, INTERCARGO, InterManager, WSC and SYBAss. URL: <https://surli.cc/crlabo>
333. IACS. Recommendations. 161-180. URL: <https://surl.li/vxulbc>
334. MSC.428(98) – International Maritime Organization. URL: <https://surl.lu/yvkasv>
335. Мальцев А. С. Інформаційна безпека судна / А. С. Мальцев, Г. Б. Вільський, Т. Ф. Шон. // Всеукраїнська науково-практична конференція «Стан та вдосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем. Збірник наукових праць. Спец. вип. – Миколаїв: НПІ, 2009. – С. 24-26.

336. Onishchenko O., Shumilova K., Volyansky S., Volyanskaya Y., Volianskyi Y.: Ensuring Cyber Resilience of Ship Information Systems. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 16, No. 1, doi:10.12716/1001.16.01.04, pp. 43-50, 2022
337. Вільський Г. Б., Мальцев А. С., Бездольний В. В., Гончаров Є. І. Навігаційна безпека при лоцманській проводці суден. – Одеса: Фенікс, 2007. – 330 с.
338. Мальцев А. С. Теорія та практика безпечного управління судном під час маневрування: дисертація д-ра техн. наук: 05.22.16. Одеса, 2007. 395 с.
339. Шумілова, К. (2022). Навігаційні ризики в аспекті кібербезпеки транспортних суден і військових кораблів. *Scientific Collection «InterConf+»*, (24(121), 391–408. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.08.2022.037>
340. Г. Б. Вільський і М. М. Надич, «Моделювання інформаційної безпеки судна», *Вісник ВПІ*, вип. 4, с. 149-153, Листоп. 2010.
341. Шумілов Д. І., Шумілова К. В., Мальцев А. С. Система аварійного управління маневруванням морського судна в умовах кібернетичних атак : пат. МПК G08G3/02 ; № a202404034 ; заявл. 12.08.2024 ; опубл. 16.04.2025, Бюл. № 16/2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1814442/>
342. Мальцев А. С., Шумілова К. В., Шумілов Д. І., Муравйов Г. М. Система управління кібербезпекою маневрування морського судна при рейсовому циклі : пат. МПК G08G 3/02 (2006.01) ; № a202300014 ; заявл. 03.01.2023 ; опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32, стор. 139-140. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1722440/>
343. Sciancalepore, S., Tedeschi, P., Aziz, A. and Pietro, R. Di. (2021). Auth-AIS: Secure, Flexible, and Backward-Compatible Authentication of Vessels AIS Broadcasts. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 1 p. doi: 10.1109/TDSC.2021.3069428
344. Шумілова К. В. Моніторинг кіберстійкості систем управління суднами. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології засобів транспорту», 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород: УкрДУЗТ, 2021. – С. 52-53. http://ptzt.kart.edu.ua/images/filePTZT/PTZT_2021.pdf
345. Шумілова К. В. Реалізація стратегії кібербезпеки в системі управління безпекою судна. *Судноводіння*. – Одеса: НУОМА, 2021, Вип. 31. – С. 99-107. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.99-107>
346. Maurantonio Caprolu, Roberto Di Pietro and Simone Raponi et al. Vessels Cybersecurity: Issues, Challenges, and the Road Ahead. *IEEE Commun. Mag.* 2020. Vol. 58(6):90-96. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900632
347. Вільський Г. Б. Інформаційна безпека в управлінні судном / Г. Б. Вільський, А. С. Мальцев // *Рибне господарство*. – 2010. – № 3 (68). – С. 24-26.

348. Shumilov, D. (2024). Collision avoidance of the sea vessels during cyber attacks in the voyage cycle. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(4), 115–129. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240304.12>
349. Shumilov, D. (2024). Searching for emergency-dangerous sections of the vessel's voyage cycle during route planning with an improved content model. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(6), 130–153. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.13>