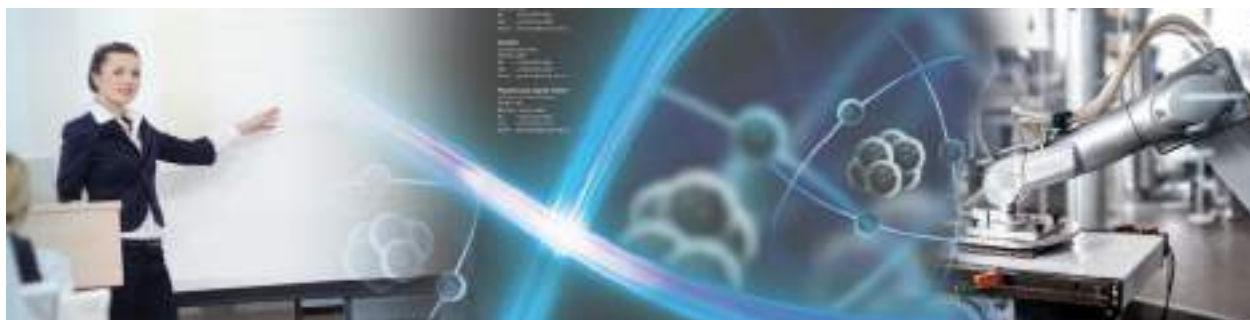


Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

**IX Міжнародна Конференція
ВИРОБНИЦТВО
&
МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2025**



**IX International Conference
MANUFACTURING
&
MECHATRONIC SYSTEMS 2025**

M&MS

2025

IX International Conference

25-26 October

Kharkiv

M&MS 2025, 24-25 October, Kharkiv, UKRAINE

УДК: 005:004.896:62-65:338.3

Виробництво & Мехатронні Системи 2025: матеріали IX-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2025 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2025. – 115 с.

У збірник включені тези доповідей, які присвячені сучасним тенденціям розвитку технологій та засобів виробництва та мехатронних систем, передовому досвіду та впровадженню їх в галузях систем промислової автоматизації та керування виробництвом; системній інженерії; CAD/CAM/CAE системах; мехатроніці (електро-механічних системах, електронних інструментах систем керування, механічних CAD системах); робототехніці та засобах інтелектуалізації; MEMS (сучасних матеріалів та технологіях виготовлення MEMS) та компонентах і технологіях автоматизації видобутку, переробки та транспортування нафти та газу.

Редакційна колегія: І.Ш. Невлюдов, В.В. Євсєєв.

Manufacturing & Mechatronic Systems 2025: Proceedings of IX st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2025: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2025. - 115 p.

The collection includes the theses of reports on modern trends in the development of technologies and means of production and mechatronic systems, top experience and implementation of them in fields of: industrial automation and production management systems; systems engineering; CAD/CAM/CAE systems; mechatronics (electrical and mechanical systems, electronic control tools, mechanical CAD systems); robotics and intellectual tools; MEMS (modern materials and manufacturing technologies MEMS) and components and technologies for the automation of oil, gas and oil extraction, processing and transportation.

Editorial board: Igor.Sh. Nevlyudov, Vladyslav.V. Yevsieiev

© Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAP), ХНУРЕ, 2025

Міністерство освіти і науки України (МОНУ)
Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ)
Варшавський університет сільського господарства (WULS - SGGW)
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості
Національний університет «Львівська політехніка»
Festo Didactic Україна
Jabil Circuit Ukraine Limited
ТОВ «Науково-виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»»
Факультет автоматики і комп'ютеризованих технологій (АКТ)
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР),
Державне підприємство «Харківський науково-дослідний інститут технології
машинобудування»
Державне підприємство «Південний державний проектно-конструкторський та
науково-дослідний інститут авіаційної промисловості»

МАТЕРІАЛИ

IX-ої Міжнародної Конференції

ВИРОБНИЦТВО & МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2025

(25-26 жовтня 2023)
Харків, Україна

ОРГАНІЗАТОРИ



Міністерство
освіти і науки
України

Міністерство освіти і науки України (МОНУ)
The Ministry of Education and Science of Ukraine



NURE
Kharkiv National University
of Radioelectronics

Харківський національний університет
радіоелектроніки (ХНУРЕ)

Kharkiv National University of Radioelectronics



**WARSAW UNIVERSITY
OF LIFE SCIENCES
- SGGW**

Варшавський університет сільськогосподарства (WULS - SGGW)

Warsaw University of Life Sciences WULS - SGGW



Азербайджанський державний університет
нафти і промисловості

Azerbaijan State Oil and Industry University



Festo Didactic Україна

Festo Didactic Ukraine



ТОВ «Науково-виробниче підприємство
«УКРІНТЕХ»»

Research and Production Enterprise
"UKRINTECH" Ltd



Національний університет «Львівська
політехніка»

National University Lviv Polytechnic

Державне підприємство «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування», м. Харків, Україна

State Enterprise «Kharkiv Scientific-Research
Institute of Mechanical Engineering Technology»,
Kharkiv, Ukraine



Державне підприємство «Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості»,
м. Харків, Україна

State Enterprise «National Design & Research
Institute of Aerospace Industries», Kharkiv, Ukraine



Jabil Circuit Ukraine Limited

КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Ігор Шакирович Невлюдов** голова комітету конференції, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна
- Олександр Іванович Филипенко** заступник голови комітету конференції, доктор технічних наук, професор, декан факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій (АКТ), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна.
- Мурад Анвер огли Омаров** доктор технічних наук, професор, проректор з міжнародного співробітництва, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна
- Владислав В'ячеславович Євсєєв** секретар, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна.
- Andrzej Chochowski** доктор технічних наук, професор Варшавського університету сільського господарства (WULS - SGGW), Польща
- Pawel Obstawski** доктор технічних наук, професор Варшавського університету сільського господарства (WULS - SGGW), Польща.
- Сергій Богомолів** лектор/доцент, доктор філософії (комп'ютерні науки), Дослідницька школа комп'ютерних наук, Коледж інженерії та комп'ютерних наук, Австралійський національний університет, Австралія.
- Микола Васильович Замірець** доктор технічних наук, професор, директор Державного підприємства Науково-дослідного технологічного інституту приладобудування, Україна
- Михайло Васильович Лобур** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка», Україна.
- Євген Сергійович Риженко** керівник відділу дидактики ДП «Фесто», Україна
- Сергій Володимирович Демченко** директор ТОВ «Науково-виробничого підприємства «УКРІНТЕХ», Україна.

Самед Імамалі огли Юсіфов	кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій та управління, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Азербайджан.
Фарід Гаджі огли Агаєв	кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри управління та системної інженерії, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Азербайджан.
Віктор Васильович Косенко	доктор технічних наук, доцент, директор Державного підприємства «Харківського науково-дослідного інституту технології машинобудування», Україна.
Володимир Вікторович Козирський	доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики та енергозбереження, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.
Віталій Пилипович Лисенко	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.
Юрій Францевич Зінковський	доктор технічних наук, професор кафедри радіоконструювання і виробництва радіоапаратури, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.
Володимир Митрофанович Свищ	доктор технічних наук, професор, радник директора Державного науково-виробничого підприємства «Об'єднання Комунар», Україна.
Віталій Євгенович Овчаренко	доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна.
Лариса Сергіївна Глоба	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних мереж, Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.
Анатолій Олександрович Андрусевич	доктор технічних наук, професор, начальник Криворізького коледжу Національного авіаційного університету, Україна.
Роман Володимирович Артюх	кандидат технічних наук, доцент, директор Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський інститут авіаційної промисловості», Україна.

- Liu Shan** генеральний менеджер Titan Machinery Limited, Китай.
- Володимир Андрійович Павлиш** кандидат технічних наук, професор, перший проректор Національного університету «Львівська політехніка», Україна
- Сергій Іванович Осадчий** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна.
- Анатолій Афанасійович Єфіменко** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних засобів та інформаційно-комп'ютерних технологій, Одеський національний політехнічний університет, Україна
- Володимир Михайлович Решетюк** кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Олександр Михайлович Цимбал** заступник голови конференції з організаційних питань, доктор технічних наук, професор комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAP), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Сергій Павлович Новоселов** кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAP), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Євген Анатолійович Разумов-Фризюк** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAP), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Наталія Павлівна Демська** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAP), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

3MICT

Artem Lisovskyi

Using Digital Twins and Artificial Intelligence for the Synchronization of Physical and Virtual Collaborative Robots	11
--	----

Vladyslav Yevsieiev, Ihor Holod

Comparative Analysis of Neural Network Architectures for Intelligent Microclimate Control in Production	15
---	----

Elgun Jabrayilzade

Numerical Study of Algorithms to Construct Optimal Trajectories for Collaborative Robots in Industry 5.0 Manufacturing Scenarios	18
--	----

Vladyslav Yevsieiv

Mathematical Model of Adaptive Control of a Collaborative Mobile Manipulator in a Shared Working Environment	22
--	----

Maksym Moisieiev, Vladyslav Yevsieiv

Research on Methods for Controlling a Group of Mobile Robots Under Uncertainty	26
--	----

Denys Chebanchyk, Vladyslav Yevsieiv

Analysis of Object Identification Methods for FPV Drones	30
--	----

Leon Molozhanov, Dmytro Gurin

Analysis of Operator Identification Methods in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot	34
--	----

Anatolii Yechevskyi, Svitlana Maksymova, Svetlana Sotnik

Analysis of the Data Collection Process About Products at Different Stages of Production	38
--	----

Maksym Rudenko, Svetlana Sotnik

Classification of CRM Systems	42
-------------------------------------	----

Diana Sukhomlinova, Svetlana Sotnik

Optimization of drone trajectory algorithms	46
---	----

Alina Fesenko, Svetlana Sotnik

Review and Selection of Optimal Sensors for Building a Production Facility Microclimate Monitoring System	50
<i>Tymofii Cherednichenko, Svetlana Sotnik</i>	
Features of Automatic Working Time Control Systems	54
<i>Максим Лусун, Дмитро Нікітін</i>	
Конструкція та технологія LCD друку та основні параметри слайсерів для фотополімерного друку	58
<i>Микола Церцек, Дмитро Нікітін</i>	
Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку	62
<i>Anton Andreiev, Svetlana Sotnik</i>	
“Web application security: protection against modern cyber threats” Overview of key vulnerabilities (XSS, CSRF, SQL injections), protection methods, use of HTTPS, authentication, and authorization	66
<i>Ivan Dolhosheia, Oleksandr Tsymbal</i>	
Methods of Automated Monitoring and Control System of Greenhouse Complex	71
<i>Svitlana Maksymova, Pavlo Shakhov</i>	
Development of a Model for Decentralized Control of a Group of Collaborative Robot Manipulators	76
<i>Stetsenko Kateryna</i>	
Integration of Artificial Intelligence in Assistive Robots: Challenges and Opportunities	80
<i>Вадим Онищенко, Олександр Малий, Вадим Мірошніченко</i>	
Використання методів комп’ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації підготовки CAD-документації друкованих плат	83
<i>Дмитро Янушкевич, Леонід Іванов, Ігор Толкунов</i>	
Застосування інтелектуальних систем управління робототехнічними системами для досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування	88
<i>Vitalii Ovcharenko, Olena Tokarieva</i>	
	92

Digital Technologies for Monitoring the Dielectric Properties of Carbon-Carbon Composites

Olena Tokarieva, Vitalii Ovcharenko

Modeling the Effect of Porosity on the Effective Dielectric Permittivity of Carbon-Carbon Composites 95

Олена Чала, Михайло Красноп'ятов, Катерина Казановська

Автоматизація та динамічне планування робіт: концептуальні рішення для Індустрії 5.0 в автоматизації 98

Матвій Білоусов, Микола Стародубцев, Сергій Шибанов, Вікторія Невлюдова, Геннадій Макаренко

Оцінка технічного стану технологічного обладнання та діагностика неполадок у його роботі в умовах невизначеності 101

Дмитро Кухаренко, Сергій Середа

Комп'ютерні моделі, методи та інтелектуальні системи для віртуалізації та оптимізації медичних втручань у складних біологічних об'єктах 105

Макимова Світлана, Ліщевич Артем

Розробка компонентів системи моделювання технологічного процесу виготовлення радіоприладів 110

Наталія Фурманова, Олег Савченко, Сергій Малий

Інтелектуальна система підтримки проєктування модульних конфігурацій БПЛА з валідацією сумісності та аналізом характеристик 112

Using digital twins and artificial intelligence for the synchronization of physical and virtual collaborative robots

Artem Lisovskyi¹

1. Artificial Intelligence Department (AI) Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE, Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: artem.lisovskyi@nure.ua

Abstract: This study proposes an approach to synchronizing physical and virtual collaborative robots based on the concept of digital twins and artificial intelligence tools. The proposed mathematical models allow formalising the processes of reflecting the real state of robots in a digital environment and minimising synchronisation errors. Particular attention is paid to the use of prediction, data filtering, and reinforcement learning algorithms that ensure the adaptability and stability of the system. The paper analyses the advantages of direct, predictive, and hybrid synchronisation methods and evaluates their effectiveness in a multi-user environment. The use of artificial intelligence allows for an increase in the level of autonomy and safety of human-robot interaction. The results of the study demonstrate the promise of integrating digital twins into modern robotic systems and open up opportunities for creating scalable and flexible manufacturing solutions.

Keywords: digital twin, collaborative robot, artificial intelligence, synchronisation, reinforcement learning, POMDP, optimal control, fuzzy logic.

I. INTRODUCTION

The current development of Industry 5.0 requires integrating physical and virtual systems to enhance efficiency, safety, and adaptability in production processes. A key tool in this effort is the concept of a digital twin, which creates virtual replicas of real robotic systems and ensures their synchronization in real time. Collaborative robots that interact with humans and each other need a high level of coordination, especially in multi-user environments. Artificial intelligence enables more accurate prediction of robot behavior, optimization of movement paths, and dynamic control that considers external changes. The challenge is to develop mathematical models and algorithms that combine physical operational parameters with their virtual counterparts, minimizing delays and errors. Therefore, research into digital twins and artificial intelligence offers new possibilities in collaborative robotics, aimed at increasing flexibility, adaptability, and safety in production systems.

II. DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR THE SYNCHRONISATION OF DIGITAL TWINS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The dynamics model describes the evolution of the state of a physical robot and its virtual copy over discrete time. It

functions as the fundamental model for synchronization and divergence assessment. General overview of the model:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t \quad (1)$$

Where: $x_t \in \mathbb{R}^n$ - state vector of the robot at time t (position, velocity, joint angles, etc); $u_t \in \mathbb{R}^m$ - vector of control actions (commands to motors, forces, etc.); $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ - system dynamics matrix (how the state changes without control); $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ - matrix of control influence on the state; w_t - process noise (model of unaccounted influences), frequency; $w_t \sim \mathcal{N}(0, Q)$. Note: for nonlinear systems, replace with $x_{t+1} = f(x_t, u_t) + w_t$.

The measurement (observation) model is designed to link the values measured by sensors to the true state, which is necessary for updating the digital twin. The following model is proposed:

$$y_t = Cx_t + v_t \quad (2)$$

Where: $y_t \in \mathbb{R}^p$ - the vector of measured signals (sensors, cameras, IMU); $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ - the measurement matrix; v_t - the measurement noise, usually $v_t \sim \mathcal{N}(0, R)$.

The synchronization error measure (divergence norm) enables you to quantitatively evaluate the difference between a physical robot and its digital twin. It is used in adaptive algorithms to minimize divergences.

$$e_t = x_t^{real} - x_t^{digital}, E_t = e_t^T W e_t \quad (3)$$

Where: x_t^{real} - the state of the physical robot; $x_t^{digital}$ - the state of the digital twin; e_t - the synchronisation error vector; W - the weight matrix (emphasises the importance of individual components); E_t - the scalar error function that is minimised.

State estimation using the Kalman filter allows for the filtering of noisy measurements and real-time correction of the digital twin's state. Update model (filling + correction):
- forecast:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{t|t-1} &= A\hat{x}_{t-1|t-1} + Bu_{t-1} \\ P_{t|t-1} &= AP_{t-1|t-1}A^T + Q \end{aligned} \quad (4)$$

- update:

$$\begin{aligned} K_t &= P_{t|t-1} C^\top (C P_{t|t-1} C^\top + R)^{-1} \\ \hat{x}_{t|t} &= \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - C \hat{x}_{t|t-1}) \\ P_{t|t} &= (I - K_t C) P_{t|t-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Where: $\hat{x}_{t|t-1}$ - predicted state before measurement; P - covariance matrix of the estimation error; Q - covariance of process noise w_t ; R - covariance of measurement noise v_t ; K_t - Kalman gain.

POMDP formulation for partially observable scenarios makes it possible to formalize planning and decision-making when the state is not fully observable (e.g., partially hidden operator states):

- transition $T(\dot{s}|s, a)$ - probability of transition to state $\dot{s}$ after action a ;

- observation $O(o|s, a)$ - probability of obtaining an observation o ;

- reward $R(s, a)$.

Belief update (Bayesian state estimation):

$$\begin{aligned} b_{t+1}(\dot{s}) \\ = \eta O(o_{t+1}|\dot{s}, a_t) \sum_{s \in S} T(\dot{s}|s, a_t) b_t(s) \end{aligned} \quad (6)$$

Where: $b_t(s)$ - belief (probability distribution across states); η - normalisation factor.

The RL formulation for training synchronisation policies (MDP / Deep RL) allows us to find a policy for a digital twin/controller that minimises synchronisation error and/or energy consumption. The goal is to maximise the expected reward:

$$J(\pi) = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t \right] \quad (7)$$

where the instantaneous reward can be, for example:

$$r_t = -\alpha \|e_t\|^2 - \beta \|u_t\|^2 \quad (8)$$

Where: α, β - weight coefficients for error, energy and penalties (e.g. for security violations); $\gamma \in (0, 1]$ - discount factor. Note: for complex systems, Deep RL (e.g. DDPG, PPO) is used, where the state/observation is fed into a neural network.

The purpose of the prediction model with delays (time delay compensator) is to compensate for network delays between the physical robot and its digital twin using a model-based predictor or neural network.

Predictor model (several steps ahead):

$$x_{t+1|t} = f_\theta^{pred}(\hat{x}_{t|t}, u_{t:t+\tau-1}) \quad (9)$$

or in the linear case:

$$\hat{x}_{t+\tau|t} = A^\tau \hat{x}_{t|t} + \sum_{k=0}^{\tau-1} A^{\tau-1-k} B u_{t+k} \quad (10)$$

Where: τ - delay step (number of discrete steps); f_θ^{pred} - predictor (parameterised, for example, by a neural network with parameters θ).

Model predictive control (MPC) for bilateral synchronisation. The purpose of it is to optimally select a sequence of controls to minimise synchronisation error and resource consumption under imposed constraints.

MPC task (briefly):

$$\begin{aligned} \min_{u_{t:t+N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\|x_{t+k|t}^{digital} - x_{t+k|t}^{real}\|_Q^2 \right. \\ \left. + \|u_{t+k}\|_R^2 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

subject to:

$$\begin{aligned} x_{t+k+1|t} &= f(x_{t+k|t}, u_{t+k}) \\ u_{min} &\leq u_{t+k} \leq u_{max}, x \in \mathcal{X}_{safe} \end{aligned} \quad (12)$$

Where: N - optimisation horizon; $\|\cdot\|_Q^2$ - quadratic form with weights Q ; $\mathcal{X}_{safe}$ - set of safe states (e.g. minimum distance to a person)

Hybrid model (fuzzy + NN) for handling uncertainty. The purpose of it is to take into account fuzziness (uncertain, linearly indescribable phenomena) during synchronisation; to combine interpreted rules and training modules.

General structure:

- fuzzy part: a set of IF-THEN rules with fuzzy inputs $\mu_i(\cdot)$;

- learning component, which is a neural network $g_\phi(\cdot)$ that adjusts the parameters of the fuzzy system or issues corrections.

Output example:

$$\Delta u_t = \sum_{i=1}^M w_i(x_t) u_i(x_t) + g_\phi(x_t) \quad (13)$$

Where: $w_i(x_t)$ - fuzzy rule weights (dependent on the degree of truth); $u_i(x_t)$ - local control laws; g_ϕ - training compensator (neural network).

Consensus model for synchronising multiple workers (multi-agent). Its purpose is to synchronise a set of physical and virtual agents (robots) for coordinated actions/trajectories. Discrete consensus model:

$$\begin{aligned} x_{i,t+1} &= x_{i,t} + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_{j,t} - x_{i,t}) \\ &\quad + B_i u_{i,t} \end{aligned} \quad (14)$$

Where: $x_{i,t}$ - state of the i -th robot; $\mathcal{N}_i$ - neighbours in the interaction graph; a_{ij} - connection weights (adjacency matrix or Laplacian).

Stochastic reliability/failure model. Its purpose is to model the probability of robot component failures and take them into account in the digital twin. Markov failure process:

$$P(\text{FAIL in } \Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad (15)$$

Enables risks to be taken into account in planning and predictive maintenance.

The developed mathematical models provide a formalised approach to describing the interaction between a physical robot and its digital twin, which allows for high synchronisation accuracy. The use of state and observation dynamics models creates the basis for a realistic representation of robot behaviour in a virtual environment, while the application of filtering methods increases resilience to noise and sensor errors. The integration of artificial intelligence into the process of minimising synchronisation errors gives the system the ability to adapt to changing environments and uncertainty. The inclusion of predictive and optimisation models makes it possible to effectively compensate for delays in data transmission and forecast the future states of the robot. Models based on reinforcement learning and POMDP allow the system to independently develop a control policy focused on achieving long-term goals. Hybrid approaches combining fuzzy logic and neural networks provide flexibility in working with fuzzy or incomplete data. Altogether, these models form the foundation for a new generation of digital twins that not only reflect physical processes but also actively manage them in real time.

II. NUMERICAL SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED

To perform numerical modelling of the synchronisation of physical and virtual collaborative robots, a time interval of 0 to 10 seconds was used, which was discretised into 500 points to ensure smooth graphs and accurate calculations. The trajectory of the physical robot was modelled as a sinusoidal function with an amplitude of 1 and the addition of random noise with an intensity of 0.05, which simulates real fluctuations in sensor measurements. The virtual robot reproduced the same trajectory, but with a time shift of 0.2 seconds, which allows us to evaluate the system's ability to compensate for the delay between the physical and digital models. To analyse the synchronisation error, the difference between the states of the physical and virtual robots at each moment in time was used. The neural network received normalised time data in the range from 0 to 1 as input, which made it possible to avoid the influence of scale in the calculations. The network architecture consisted of a single hidden layer with 10 neurons, random weight coefficients were generated based on a normal distribution, and the ReLU activation function was used to model nonlinearity. The network output approximated the target sine function, which made it possible to evaluate the effectiveness of artificial intelligence in reproducing the robot's motion dynamics. Thus, the chosen numerical parameters ensured the reproduction of both the physical characteristics of the robot

and the process of its virtual synchronisation using a digital twin. The results of numerical modelling are presented in Figures 1-3.

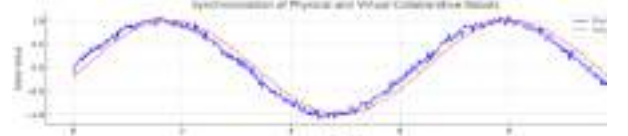


Figure 1. – Graph of Synchronization of Physical and Virtual Collaborative Robots

Synchronisation of Physical and Virtual Collaborative Robots (Fig. 1) shows the trajectories of physical and virtual collaborative robots, where their convergence and divergence in the synchronisation process can be seen.

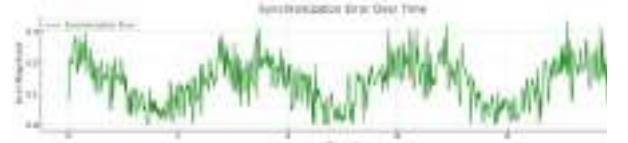


Figure 2. – Graph Synchronization Error Over Time

Synchronisation Error Over Time (Fig. 2) shows the change in synchronisation error over time, which allows us to assess the stability and efficiency of the robot motion coordination process.

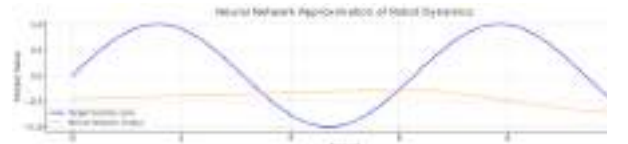


Figure 3. – Graph Neural Network Approximation of Robot Dynamics

Neural Network Approximation of Robot Dynamics (Fig. 3) demonstrates the operation of a simple neural network that approximates the dynamics of robot motion and allows modelling the behaviour of the system in real time.

III. CONCLUSION

The conducted study demonstrated that the use of digital twins in combination with artificial intelligence creates an effective tool for synchronising physical and virtual collaborative robots in dynamic conditions. Numerical modelling confirmed the possibility of accurately reproducing the movements of a physical robot in a virtual environment, taking into account time shifts and sensor errors, which significantly increases the accuracy and reliability of control. The use of neural networks has enabled adaptive learning of the system and the approximation of complex dynamic characteristics to real-world scenarios, which is key to working in Industry 5.0 conditions. The results demonstrated the ability to reduce the average synchronisation error and improve the stability of interaction between the real and digital environments. The proposed approaches can be applied to the development of integrated control systems capable of quickly responding to changes in external factors and human interaction. The use of mathematical models made it possible to analyse the main parameters of the system and determine the optimal operating

modes of digital twins. The obtained results form the basis for further research aimed at developing hybrid control architectures using artificial intelligence methods and multi-agent models.

REFERENCES

- [1] Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O., & Khudov, V. (2025). Image Segmentation Methods for Kamikaze FPV Drones Targeting to Aid Critical Energy National Infrastructure Assets Protection. In *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport* (pp. 139-151). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [2] Conejero, M. N., Montes, H., Bengochea-Guevara, J. M., Garrido-Rey, L., Andújar, D., & Ribeiro, A. (2025). A collaborative robotic fleet for yield mapping and manual fruit harvesting assistance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110351.
- [3] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [4] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [5] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [6] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [7] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [8] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [9] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [10] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [11] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [12] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [13] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [14] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [15] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [16] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [17] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [18] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [19] Chala, O., Ababneh, J., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2025). BIO-INSPIRED PRINCIPLES FOR MODELING INFORMATION COLLECTION IN COLLABORATIVE ROBOT ENVIRONMENTS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 9-18.
- [20] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [21] Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 1187-1202.

Comparative Analysis of Neural Network Architectures for Intelligent Microclimate Control in Production

Vladyslav Yevsieiev¹, Ihor Holod²

1. CITAR Dept., Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, Kharkiv, Nauki Avenue, 14, e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua

2. CITAR Dept., Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, Kharkiv, Nauki Avenue, 14, e-mail: ihor.holod@nure.ua

Abstract: A comparative analysis of neural network architectures (MLP, RNN, NNARX) for predicting microclimate parameters in industrial cyber-physical systems has been carried out. The advantages of NNARX in reproducing environmental dynamics are demonstrated, and its application for intelligent control is substantiated.

Keywords: microclimate, neural networks, NNARX, forecasting, control.

I. INTRODUCTION

Maintaining optimal microclimate parameters in industrial premises is a key condition for the stability of technological processes, ensuring high product quality, and creating safe and comfortable working conditions for personnel. Deviations in temperature, humidity, or air composition lead to reduced productivity, energy losses, and deterioration of equipment performance.

Traditional automatic control systems are mostly based on reactive principles and threshold algorithms, which activate actuators only after exceeding permissible limits. Such an approach often causes oscillations of parameters around the set values, delayed responses to changing conditions, and reduced energy efficiency. In addition, the interdependence between microclimate parameters and the presence of external disturbances (weather factors, heat from equipment, human presence) makes the control process even more complex and unpredictable [1].

The integration of cyber-physical systems opens new opportunities for intelligent microclimate control. The combination of sensor networks, actuators, and computational methods within a unified architecture enables data collection and analysis in real time. The use of neural networks as part of such systems allows a transition from static, reactive regulation to predictive and adaptive control, which increases the accuracy of parameter stabilization and ensures optimal use of energy resources [2].

The aim of this study is to improve the efficiency of intelligent microclimate control in industrial cyber-physical systems by performing a comparative analysis of neural network architectures (MLP, RNN, NNARX) and substantiating the choice of the most suitable model for forecasting and optimization of environmental parameters.

II. DECOMPOSITION OF THE MICROCLIMATE FORECASTING AND CONTROL PROBLEM

The task of intelligent microclimate control in industrial premises is complex due to the multifactorial and nonlinear nature of the processes. Environmental parameters (temperature, humidity, air composition, air velocity) are interdependent and are highly sensitive to both external influences (weather conditions, seasonal variations, solar

radiation) and internal factors (heat emissions from equipment, human presence, disturbances from production operations) [3].

For effective forecasting and control, the problem should be considered as two interrelated sub-tasks. The first concerns forecasting future microclimate states based on historical data and current measurements. The second involves forming control actions based on the forecasts to maintain parameters within permissible limits.

The general model of the microclimate can be represented as a multifactorial dependence:

$$MicroClim = f(T_{in}, T_{out}, H_{in}, H_{out}, Gas, N_{pip}, Act, Dist), \quad (1)$$

where T_{in}, T_{out} – indoor and outdoor temperature, H_{in}, H_{out} – indoor and outdoor humidity, Gas – concentration of the gas mixture, N_{pip} – number of people in the room, Act – state of actuators (heaters, fans, humidifiers), $Dist$ – disturbances (solar radiation, open doors, etc.).

Such a decomposition makes it possible to combine the tasks of time series forecasting with control tasks, where the key role is played by the choice of neural network architecture capable of accounting for both temporal dependencies and system nonlinearity [2].

III. FORMULATION AND MATHEMATICAL MODEL OF MICROCLIMATE FORECASTING

The problem of forecasting the microclimate in industrial premises is reduced to determining future values of environmental parameters based on their previous states and the influence of external and internal factors. This task can be formalized as a time series forecasting problem [4]

Let $y(t)$ denote the vector of output microclimate parameters (e.g., temperature, humidity), and $u(t)$ – the vector of control actions and external factors (actuators, disturbances, changes in the external environment). Then, the general forecasting equation can be expressed as:

$$y(t+1) = F(y(t), y(t-1), \dots, u(t), u(t-1), \dots), \quad (2)$$

where $F(\cdot)$ – is a nonlinear function of the previous values of outputs and inputs.

In the classical NNARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs) architecture, this function is approximated by a neural network, which takes into account both the autoregressive dependence on past states and the influence of exogenous variables. Such an approach allows the model to reproduce the inertia of the system and the interdependence between microclimate parameters.

In fact, the forecasting task in a cyber-physical system can be formulated as building the following mapping:

$$F : (Y_t, U_t) \rightarrow y(t+1), \quad (3)$$

where $Y_t = \{y(t), y(t-1), \dots, y(t-n)\}$ – is the vector of past system states, $U_t = \{u(t), u(t-1), \dots, u(t-m)\}$ – is the vector of exogenous inputs, $y(t+1)$ – is the predicted future state.

Thus, the mathematical model of microclimate forecasting is defined as the problem of approximating a nonlinear mapping between historical data and predicted values, where the key role is played by the choice of the neural network architecture.

IV. COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK ARCHITECTURES

To address the problem of forecasting microclimate parameters in industrial conditions, three main neural network architectures are considered: multilayer perceptron (MLP), recurrent neural networks (RNN), and neural networks of the NNARX type. Each of these approaches represents a different paradigm of neural modeling and has its own advantages and limitations that determine their applicability in dynamic and nonlinear industrial systems [5].

The MLP is one of the most widely used neural architectures due to its conceptual simplicity and universal approximation capability. It can successfully model nonlinear relationships between input and output variables, which makes it useful in many engineering applications. However, MLPs are static models that do not possess an inherent mechanism for handling temporal dependencies. For this reason, when applied to microclimate forecasting, MLPs require explicit construction of input vectors that include lagged variables or statistical features derived from time series. This preprocessing increases model complexity and reduces flexibility, especially when system dynamics change rapidly.

The RNN architecture was introduced as a natural extension of feedforward networks to sequential data. Through recurrent connections, RNNs are able to preserve internal states and thus capture temporal dependencies in dynamic processes. This makes them theoretically more powerful for time series forecasting tasks. Nevertheless, in practice, RNNs often face significant training difficulties. The vanishing and exploding gradient problems limit their ability to model long-term dependencies, which are essential for accurate forecasting of industrial microclimates influenced by both short-term fluctuations and long-term trends. Advanced variants such as LSTM or GRU partially solve these issues, but they introduce additional complexity and computational overhead.

The NNARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs) model is specifically designed for systems where both autoregressive terms and external factors play a crucial role. By explicitly incorporating past values of the system outputs along with exogenous inputs, NNARX networks are particularly well suited for modeling the inertia and multi-factor interactions inherent to industrial environments. This architecture allows the system to take

into account both the history of microclimate variables (e.g., temperature, humidity) and external influences such as outdoor conditions, equipment operation, or human activity. As a result, NNARX provides higher forecasting accuracy and robustness in dynamic, nonlinear production settings.

While MLPs and RNNs can serve as baseline forecasting models, NNARX is the most suitable for intelligent microclimate control in industrial cyber-physical systems. By integrating autoregressive dynamics with external inputs, it ensures accurate prediction and compatibility with adaptive control strategies.

Table 1 summarizes the comparison of these architectures and highlights their main strengths and weaknesses in the context of microclimate forecasting.

Table 1 – Comparison of Neural Network Architectures for Microclimate Forecasting

Architecture	Advantages	Disadvantages	Applicability to the microclimate task
MLP	Simple implementation, universality, high accuracy for static data	Lacks internal memory, requires formation of input vectors with delays	Can be applied for basic forecasts after special data preprocessing
RNN	Models temporal dependencies, ability to work with sequential data	Training instability (vanishing/exploding gradients), complex tuning	Suitable for short-term parameter forecasting
NNARX	Oriented towards time series, accounts for exogenous inputs, high forecasting accuracy, adaptability	Requires large amounts of training data, more computationally intensive	Most effective for dynamic and nonlinear industrial conditions

V. RATIONALE FOR CHOOSING NNARX

Among the analyzed neural network architectures, the most promising for forecasting microclimate parameters in industrial cyber-physical systems is the NNARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs) model. Its key feature is the ability to account simultaneously for both past system states and external factors, which makes it naturally suited for modeling dynamic and nonlinear processes [6].

Practical studies have demonstrated the high accuracy of NNARX-like models in microclimate forecasting. For example, Caixia Yan et al. reported coefficients of determination of $R^2 = 0.997$, for temperature and $R^2 = 0.996$ for humidity [7], confirming the architecture's ability to capture complex interdependencies between environmental parameters.

Another important advantage of NNARX is its adaptability to real production conditions. The autoregressive structure reflects system inertia, while exogenous inputs allow consideration of both external (outdoor temperature, solar radiation) and internal factors (heat emissions from equipment, human presence, actuator states). This ensures forecasts that more accurately reflect the real behavior of the production environment.

In the context of cyber-physical systems, NNARX can also be integrated with other intelligent approaches, such as fuzzy logic. This combination allows precise neural forecasts to be transformed into control actions understandable to actuators, enabling a shift from reactive to proactive microclimate control.

Thus, NNARX is a justified choice for intelligent microclimate control, as it combines high forecasting accuracy, the ability to consider multiple factors, and flexibility under industrial conditions.

VI. CONCLUSION

This study presents a comparative analysis of neural network architectures for forecasting microclimate parameters in industrial cyber-physical systems. It has been demonstrated that multilayer perceptrons (MLP) are suitable for approximating nonlinear dependencies between environmental variables; however, their effectiveness decreases when applied to tasks with pronounced temporal dynamics. Recurrent neural networks (RNN), on the other hand, are able to capture short-term dependencies and sequential patterns, yet they suffer from issues of training stability and limited scalability when applied to long-term or highly nonlinear processes.

The most promising architecture identified is NNARX, which integrates both autoregressive dynamics and exogenous inputs. This dual structure enables the model to accurately reproduce complex dependencies, capture system inertia, and reflect the influence of external factors such as outdoor temperature or human activity. NNARX-based models have already demonstrated strong performance in practical studies of microclimate forecasting, which confirms their suitability for solving industrial challenges where precision and adaptability are critical.

Therefore, the choice of NNARX as the baseline architecture is well justified for the development of intelligent microclimate control systems in industrial environments. Beyond forecasting, NNARX provides a foundation for creating predictive and adaptive control strategies that move beyond reactive approaches. Future research should focus on combining NNARX with fuzzy logic controllers, optimization algorithms, and online adaptive learning methods, in order to enhance energy efficiency, reduce operational costs, and ensure the stability of technological processes under varying production conditions.

REFERENCES

- [1] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile robot navigation system based on ultrasonic sensors. In *2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (Vol. 1, pp. 247–251). IEEE.
- [2] Addas, A. (2023). The concept of smart cities: a sustainability aspect for future urban development based on different cities. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1241593.
- [3] Nevliudov, I., Omarov, M., Yevsieiev, V., Bronnikov, A., & Lyashenko, V. (2020). Method of algorithms for cyber-physical production systems functioning synthesis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1679, 052030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052030>
- [4] Singh, S. (2025). Neuro-fuzzy architectures for interpretable AI: A comprehensive survey and research outlook. *Journal of Machine Learning Research*, 1, 11.
- [5] Pelissero, N., Laso, P. M., & Puentes, J. (2021, September). Model graph generation for naval cyber-physical systems. In *OCEANS 2021: San Diego-Porto* (pp. 1–5). IEEE.
- [6] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative language for cyber-physical production systems. *Journal of Mathematics and Computer Science*, 11(1), 520–542.
- [7] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [8] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520–542.
- [9] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465–7473.
- [10] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9–18.
- [11] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139–145.
- [12] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441–455.
- [13] Svitlana Maksymova, Vladyslav Yevsieiev, Igor Nevliudov, Oksana Bahlai, "Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050(GY-521)", 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp.39–42, 2024.

Numerical study of algorithms to construct optimal trajectories for collaborative robots in Industry 5.0 manufacturing scenarios

Elgun Jabrayilzade¹

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: vladyslav.yevsieiv@nure.ua

Abstract: This study considers the problem of numerical modeling of algorithms for constructing optimal trajectories for collaborative robots in Industry 5.0 production scenarios, where the key aspect is safe and effective interaction with a dynamic environment and humans. The developed mathematical models are based on potential function methods and multi-criteria optimization, which allows combining obstacle avoidance, energy consumption reduction, and task execution time minimization. Numerical modeling has shown that the actual trajectory of the robot remains convergent to the desired one even in the presence of obstacles, confirming the adaptability of the algorithms to unpredictable changes in the environment. Analysis of the time error showed its short-term increase during maneuvering and subsequent stabilization, which indicates the reliability of the proposed models. The study of the smoothness of movement confirmed the absence of sharp changes in the curvature of the trajectory, which ensures safety and comfort of operation in production processes. The results obtained prove the feasibility of using the developed approaches to create intelligent robotic systems capable of increasing production efficiency, reducing accident risks, and improving the quality of interaction between robots and humans in the Industry 5.0 concept.

Keywords: optimal trajectories, collaborative robots, numerical modeling, obstacle avoidance, adaptive control, Industry 5.0, multi-criteria optimization, trajectory planning, safe interaction.

I. INTRODUCTION

The current stage of robotics development in Industry 5.0 is characterized by the integration of intelligent control systems that ensure safe and effective interaction between humans and robots in a shared working environment. One of the key tasks in this regard is to construct optimal trajectories for collaborative robots, since it is the quality of trajectory planning that determines the level of productivity, the accuracy of production tasks, and the minimization of collision risks. The relevance of the research is determined by the need to adapt planning algorithms to dynamic and uncertain production scenarios, where there are moving objects, variable constraints, and humans as active participants in the process. Traditional methods of trajectory construction do not always guarantee the necessary level of flexibility and stability of the system, while the use of numerical methods and optimization algorithms allows to increase the efficiency of calculations and the accuracy of results. Therefore, the development and research of new approaches to optimal trajectory planning is an important

step in ensuring the adaptability and safety of collaborative robots, which determines the scientific and practical significance of this work.

II. MATHEMATICAL SUPPORT FOR NUMERICAL RESEARCH OF ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING OPTIMAL TRAJECTORIES FOR COLLABORATIVE ROBOTS

Kinematic model in configuration space. Let $q \in \mathbb{R}^n$ be the configuration vector (joint angles + base position) at time moment t . Then the position of the end effector in the workspace is given by the mapping $p(t) = f(q(t))$, where $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$. The Jacobian is defined as $J(q) = \frac{\partial f}{\partial q}$ and links the velocities: $\dot{p} = J(q)\dot{q}$. Let us describe the parameters: $q(t)$ - robot configuration; $p(t)$ - effector position; f - direct kinematic transformer; $J(q)$ - Jacobian; n - number of degrees of freedom; m - size of the workspace (usually 3 or 6). This model is needed for transformation between the joint space and the task space (working space), for formulating constraints on the end effector, and for calculating collisions/distances.

The dynamics of the manipulator (model in joint space) is described as:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D\dot{q} = \tau + J(q)^T F_{ext} \quad (1)$$

Where: $q, \dot{q}, \ddot{q}$ - joint status (position, velocity, acceleration); $p(q)$ - effector position in the workspace; $J(q)$ - Jacobian; $M(q)$ - inertia matrix (positive definite); $C(q, \dot{q})$ - Coriolis/centrifugal forces matrix; $G(q)$ - gravity vector; τ - control moment vector (all joints); F_{ext} - external forces (contacts, reactions); D - viscous loss matrix.

Objective functionality (optimal control). The general problem of optimal trajectory planning is formulated as minimizing the functionality:

$$J[q(\cdot), \tau(\cdot)] = \Phi(q(T)) + \int_0^T l(q(t), \dot{q}(t), \tau(t), t) dt \quad (2)$$

subject to dynamic equations and constraints. Here Φ is the terminal value (e.g., distance to the target), and l is the integral value, for example:

$$l = w_p \|p(t) - p_d(t)\|^2 + w_u \|\tau(t)\|^2 + w_q \|\dot{q}(t)\|^2 \quad (3)$$

Where: $p_d(t)$ - desired trajectory/target; w_p, w_u, w_q - integral weights. The model's functionality combines the criteria of tracking accuracy, drive energy/effort, and smoothness of motion; weight coefficients allow balancing between trajectory quality and costs.

Safety and comfort constraints (continuous inequalities). Collisions and safety are formalized as a set of inequalities:

$$h_k(q(t), t) \geq 0, k = 1, \dots, K \quad (4)$$

where an example is the distance constraint between critical points of the robot and a person/obstacle:

$$h_{col}(q, t) = d(q, t) - d_{safe} \geq 0 \quad (5)$$

With $d(q, t) = \min_{x \in R(q), y \in O(t)} \|x - y\|$

Where: d_{safe} - minimum permissible distance; $R(q)$ - set of body points of the robot; $O(t)$ - set of obstacles/positions of the human.

Restrictions (5) guarantee a minimum safe distance and take into account the human comfort zones.

Starting potential for numerical implementation of avoidance. To ensure a differentiated form of restriction, the following potential is introduced:

$$U_{rep}(q, t) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{d(q, t)} - \frac{1}{d_0} \right), & d(q, t) < d_0 \\ 0, & d(q, t) \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{rep} = -\nabla_q U_{rep}(q, t)$$

Where: $k_r > 0$ - repulsion coefficient; d_0 - potential influence radius; $d(q, t)$ - distance; ∇_q - configuration gradient.

Discretization — direct collocation. We divide the interval $[0, T]$ into N nodes t_i and represent the trajectory as a set of variables $\{q_i, \dot{q}_i, \tau_i\}_{i=0}^N$. We minimize the total discrete functional:

$$J_d = \Phi(q_N) + \sum_{i=0}^{N-1} l(q_i, \dot{q}_i, \tau_i) \Delta t \quad (7)$$

subject to discrete constraint equations (collocations), for example, using the trapezoidal method:

$$q_{i+1} = q_i + \frac{\Delta t}{2} (\dot{q}_i + \dot{q}_{i+1}) \quad (8)$$

Where: N - number of nodes; $\Delta t = T/N$ - steps; $q_i, \dot{q}_i, \tau_i$ - discrete variables; collocation equations ensure compatibility with dynamics. Direct transcription converts a continuous optimal problem into an NLP (nonlinear program), which is solved numerically by standard optimizers.

Gradient/variational expression for updating (for gradient algorithms and CHOMP/TrajOpt). Gradient of the goal along the trajectory in discrete representation:

$$\nabla_{q_i} J_d = 2w_p (p_i - p_{d,i})^T \frac{\partial p_i}{\partial q_i} + \frac{\partial U_{rep}(q_i)}{\partial q_i} \quad (9)$$

Where: $\frac{\partial p_i}{\partial q_i} = J(q_i)$ - Jacobian at the node; $p_{d,i}$ - desired position of the node; regularizers - terms that penalize high derivatives (velocity, acceleration).

The gradient (9) is used in local optimizers (CHOMP, TrajOpt) for iterative trajectory smoothing, taking into account collision penalties and smoothness.

MPC formulation for online optimization. At each time step t_k the problem of minimizing the functional on the horizon T_p is solved:

$$\min_{\{q_{k+j}, \tau_{k+j}\}_{j=0}^{N_p-1}} \Phi(q_{k+N_p}) + \sum_{j=0}^{N_p-1} l(\cdot) \quad (10)$$

subject to discrete dynamics and constraints, after which only the first step τ_k (receding horizon) is applied.

Where: N_p - forecast horizon; k - current time index; weight palette is the same as in the functional l . MPC allows you to adapt the trajectory in real time as the environment and human movement change, combining global goals and local safety constraints.

Stochastic/robust formulation (necessary for uncertainties). If the person's position or model parameters are random, we minimize the expected value of costs with guarantees:

$$\min \mathbb{E} \left[\Phi(q(T)) + \int_0^T l(\cdot) dt \right] \text{ under } \Pr\{h_k(q, t) \geq 0\} \geq 1 - \delta \quad (11)$$

or in the form of robust optimization:

$$\min_{\xi} \max_{\Xi} J[q(\cdot); \xi] \quad (12)$$

Where: ξ - unknown parameters/noise; δ - acceptable risk of violation of the constraint; Ξ - set of possible scenarios/uncertainties.

Expressions 11-12 allow us to obtain trajectories that are highly likely to be safe and perform tasks even with random variations.

Coordination of multiple robots (cooperative constraints). For a group M of robots, we introduce a state vector $Q = [q^1, \dots, q^M]$ and set additional mutual avoidance constraints:

$$d_{ij}(q^i, q^j, t) - d_{min} \geq 0, \forall i \neq j \quad (13)$$

or as a penalty in the objective: $\sum_{i < j} U_{rep}^{ij}(q^i, q^j)$.

Where: M - number of robots; d_{ij} - distance between robots i and j ; d_{min} - minimum inter-robot distance.

Model 13 ensures safe interaction between robots and allows searching for optimal distributed trajectories.

In practice, the choice of discretization step Δt weights $w_p, w_u, \dots$, potential coefficients k_r , and radii d_0 determines the trade-off between accuracy, computation speed, and safety; their tuning is usually done experimentally or through

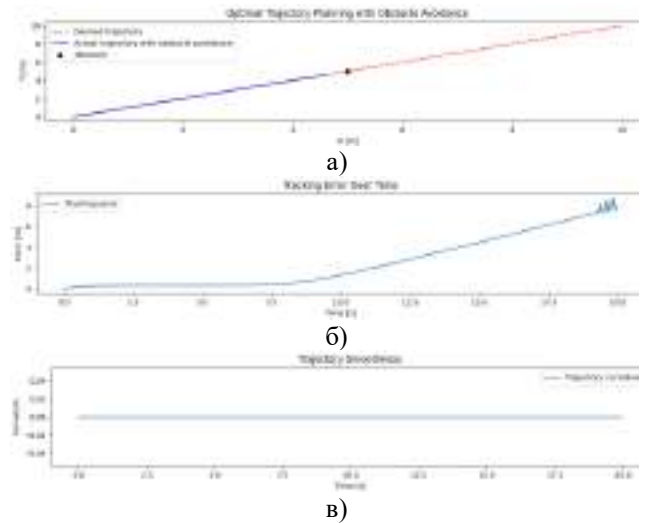
separate optimization (meta-optimization). For a large number of DOFs, it is recommended to use direct methods (direct collocation) or iterative local methods with analytical gradients, and for online adaptation — MPC with a limited number of nodes. If there are stochastic components (human movement, sensor noise), it makes sense to include a stochastic or robust component in the formulation.

The developed mathematical models of algorithms for constructing optimal trajectories for collaborative robots in Industry 5.0 production scenarios have a number of significant advantages that determine their effectiveness and practical significance. First, they allow for both kinematic and dynamic characteristics of robots to be taken into account, ensuring the accuracy of trajectory formation in complex production conditions. Second, the models integrate safety constraints and human comfort zones, ensuring the adaptability of robot movements and reducing the risk of accidents in a shared environment. An important advantage is the possibility of multi-criteria optimization, which combines energy cost minimization, trajectory smoothing, and task execution time reduction without loss of accuracy. The use of potential functions and MPC allows modeling the response to dynamic changes in the environment in real time, while maintaining stability and efficiency. In addition, the proposed expressions are easily scalable for multi-robot systems, which facilitates the development of coordination strategies in collaborative scenarios. Importantly, the models take into account uncertainties, thanks to which the system remains resistant to unpredictable human actions or external factors. As a result, the developed approaches form the basis for the creation of a new generation of intelligent robotic systems capable of effectively collaborating with humans and increasing productivity in Industry 5.0 manufacturing processes.

II. NUMERICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED

The goal of the first experiment, shown in the graph “Optimal Trajectory Planning with Obstacle Avoidance,” was to test the ability of the optimal trajectory planning algorithm to ensure the robot's movement toward the target while avoiding obstacles. The expected result is a deviation of the actual trajectory from the desired one in the obstacle zone, followed by a return to the optimal path, confirming the effectiveness of the route construction model. The second experiment, shown in the “Tracking Error Over Time” graph, aimed to evaluate the dynamics of the error between the desired and actual trajectories over time. The expected result is an initial increase in error at the moment of maneuvering near the obstacle and subsequent stabilization, demonstrating the convergence of the algorithm to the specified trajectory. The third experiment, shown in the “Trajectory Smoothness” graph, is aimed at analyzing the smoothness of movement and the curvature of the trajectory when avoiding obstacles. The expected result is a slight increase in curvature during maneuvering, which quickly stabilizes, confirming the algorithm's ability to form safe and smooth trajectories without sudden changes in motion. Together, these experiments demonstrate the ability to construct efficient, safe, and optimal trajectories for collaborative robots in Industry 5.0 manufacturing scenarios.

The results of numerical simulations are presented in Figure 1.



a); Optimal Trajectory Planning with Obstacle Avoidance 6) Tracking Error Over Time; b) Trajectory Smoothness

Figure 1. – Numerical modelling results

Based on numerical modeling, the effectiveness of algorithms for constructing optimal trajectories in an environment with obstacles was investigated. The first graph (Fig. 1a) shows the desired and actual trajectories of the robot's movement, where it can be seen that thanks to potential functions, the robot successfully avoids obstacles and finds the optimal path to the goal. The second graph (Fig. 1b) shows the change in tracking error over time, which initially increases due to maneuvering around the obstacle but then decreases, indicating convergence to the optimal trajectory. The third graph (Fig. 1c) shows the curvature of the trajectory, which increases in the obstacle avoidance zone but stabilizes over time, ensuring smooth movement. The results confirm the feasibility of using the developed models to optimize the movement of collaborative robots in production scenarios.

III. CONCLUSION

The study confirmed the effectiveness of the developed algorithms for constructing optimal trajectories for collaborative robots in the context of Industry 5.0 production scenarios. The results of numerical modeling showed that the proposed approaches allow forming trajectories that not only take into account the optimality of movement but also ensure safe avoidance of obstacles in a shared working environment. Motion analysis demonstrated that the actual trajectory of the robot coincides with the desired one after a local deviation in the obstacle zone, confirming the stability and reliability of the models. It was found that the tracking error increases during maneuvering but gradually decreases and stabilizes, indicating the algorithm's ability to adaptively correct motion. The study of trajectory smoothness confirmed the absence of sharp changes in curvature, which is critical for safety and ease of operation in production scenarios involving humans. Thus, the proposed algorithms have proven their effectiveness in combining multi-criteria requirements, in particular, minimizing energy consumption, task execution time, and compliance with safety

requirements. The results obtained lay the foundation for the practical implementation of collaborative robot systems in new-generation production processes, increasing their flexibility, productivity, and level of interaction with humans...

REFERENCES

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. IEEE Access.
- [2] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 3046116.
- [3] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. J. Math. Comput. Sci., 11(1), 520-542.
- [4] Nevliudov, I., & et al. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(10), 7465-7473.
- [5] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. International Research Journal of Multidisciplinary Technovation, 5(6), 9-18.
- [6] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology, 70(1), 139-145.
- [7] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. Advances in Dynamical Systems and Applications, 16(2), 441-455.
- [8] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In IJCAI (pp. 18-25).
- [9] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. Advanced Information Systems, 9(3), 57-65.
- [10] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(6), 526-538.
- [11] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameter for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(79), 42-48.
- [12] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. ACUMEN: International journal of multidisciplinary research, 2(1), 224-239.
- [13] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Theses of Reports of I st I International Conference, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [14] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025: Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [15] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. ACUMEN: International journal of multidisciplinary research, 1(4), 388-401.
- [16] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(6), 34-46.
- [17] Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Nataliia Demska, Nikolaj Starodubcev, Oleksandr Klymenko, "Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT", 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), pp.1-5, 2023
- [18] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Filippenko, I. (2020). Development of an architecturallogical model to automate the management of the process of creating complex cyberphysical industrial systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 4(3-106), 44-52.
- [19] Невлюдов, І., Клименко, О., Євсєєв, В., & Максимова, С. (2025). IMPROVEMENT OF THE ENCODING INFORMATION METHOD FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTS QR-CODES DURING SORTING ON A ROBOTIC CONVEYOR LINE. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні, (1 (11)), 128-134.
- [20] Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(5), 1187-1202.

Mathematical model of adaptive control of a collaborative mobile manipulator in a shared working environment

Vladyslav Yevsieiv¹

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: vladyslav.yevsieiv@nure.ua

Abstract: This paper presents a mathematical model of adaptive control of a collaborative mobile manipulator in a shared working environment that meets the requirements of safe and effective human-robot interaction. The developed approach is based on an adaptive controller that provides accurate tracking of the desired trajectory even in the presence of parameter uncertainties. Numerical simulations have shown that the actual robot trajectory practically coincides with the given one, and the error does not exceed 0.05 rad and decreases asymptotically over time. In addition, the parametric adaptation system demonstrated a gradual approximation of the estimated parameter to the true one, which confirms the model's ability to self-learn in dynamic conditions. The results obtained indicate the high efficiency of the proposed method, its stability and prospects for implementation in the production processes of Industry 5.0.

Keywords: Industry 5.0, adaptive control, mobile manipulator, trajectory tracking, collaborative robotics, mathematical model.

I. INTRODUCTION

In the current conditions of Industry 5.0 development, collaborative robots capable of effectively interacting with humans in a shared working environment are becoming a key element in building intelligent production systems. Ensuring safe and productive cooperation between the operator and the mobile manipulator requires the creation of mathematical control models that take into account the unpredictability of human actions, the dynamics of the environment, and the uncertainty of the parameters of the robotic system itself. Traditional control methods demonstrate limited effectiveness in changing conditions, while adaptive approaches allow for real-time correction of movement trajectories, ensuring stability and accuracy of task performance. At the same time, there is a need to take into account the human safety zone and mechanisms for avoiding dangerous situations, which requires the integration of potential functions and force repulsion models. Thus, the development of a mathematical model of adaptive control of a collaborative mobile manipulator is an urgent task that combines the requirements of high productivity, flexibility, and safety in a shared working space. Research in this area creates the basis for the practical implementation of intelligent control systems capable of ensuring effective human-robot collaboration in modern production environments.

II. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE MODEL OF ADAPTIVE CONTROL OF A COLLABORATIVE MOBILE MANIPULATOR

Suppose $q \in \mathbb{R}^n$ - vector of joint angles of the manipulator (if there is a suspension/platform, it is added outside the base); $\dot{q}, \ddot{q}$ - first and second time derivatives; $p(q) \in \mathbb{R}^3$ - effector position in the workspace; $J(q) = \frac{\partial p}{\partial q}$ - jacobian; $p_h(t) \in \mathbb{R}^3$, $v_h(t) = \dot{p}_h$ - position and speed of the person (can be estimated by sensors).

Dynamics of the manipulator (model in joint space):

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D\dot{q} = \tau + J(q)^T F_{ext} \quad (1)$$

Where: $q, \dot{q}, \ddot{q}$ - joint condition (position, speed, acceleration); $p(q)$ - effector position in the workspace; $J(q)$ - jacobian; $M(q)$ - inertia matrix (positive definite); $C(q, \dot{q})$ - Coriolis/centrifugal force matrix; $G(q)$ - gravity vector; τ - vector of control moments (all joints); F_{ext} - external forces (contacts, reactions); D - viscous loss matrix.

Tracking goal and errors, represented through the desired trajectory $q_d(t)$, $\dot{q}_d$, $\ddot{q}_d$; mistake $e = q - q_d$, $\dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d$. introduce a tracking variable (filtered error):

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e, \quad s = \dot{q} - \dot{q}_r = \dot{e} + \Lambda e \quad (2)$$

Where: Λ - diagonal matrix of positive coefficients.

The dynamics can be written in a linear form with respect to the parameters:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_t)\theta \quad (3)$$

Where: $Y(\cdot)$ - regressor; θ - vector of unknown constants (mass, inertia, etc.).

Adaptive control (Slotine–Li style) with human input will be presented as a basic control vector for tracking:

$$\tau_c = Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_t)\hat{\theta} - K_D s \quad (4)$$

Where: $\hat{\theta}$ - parameter estimation; K_D - positive definite damping matrix.

Dynamics of parameter estimation update:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_t)^T s \quad (5)$$

Where: Γ - adaptation matrix (symmetric, positive definite).

Determine the distance between the effector (or any critical point of the robot) and the person:

$$d(t) = \|p(q) - p_h(t)\| \quad (6)$$

Let's introduce a repulsion potential (example - a force barrier):

$$U(d) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d < d_0 \\ 0, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

Where: d_0 - safety zone radius (comfort/safety); $k_{rep} > 0$ - Repulsion force coefficient.

Repulsion force in the working space:

$$F_{rep} = -\nabla_p U(d) = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d^2} \frac{p - p_h}{d} \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

Converting force into moments/torsions at joints:

$$\tau_h = J(q)^T F_{rep} \quad (9)$$

Full control signal:

$$\tau = \tau_c + \tau_h = Y\theta - K_D s + J^T F_{rep} \quad (10)$$

We choose the Lyapunov functional as the stability criterion:

$$V = \frac{1}{2} s^T M(q) s + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}, \quad \tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta \quad (11)$$

Differentiation and substitution gives (by standard output Slotine-Li):

$$\dot{V} = -s^T K_D s + s^T J^T F_{rep} \quad (12)$$

If the repulsive force is limited and properly adjusted (sufficient K_D), boundedness of s and smoothed tracking are ensured, and additional conditions for smoothing the force are provided F_{rep} (e.g. damping) ensure no throws and local stability.

Let's discuss limitations and extensions:

- to maintain safety, one can add a projection form of adaptation (to θ remained physically feasible);
- for multi-agent coordination, cooperation terms are added (e.g., mutual avoidance potentials between robots or distributed evaluations $\hat{\theta}_i$);

- if a person can contact a robot F_{ext} in dynamics must be modeled/monitored and used in the controller for safe interaction (impedance/admittance control).

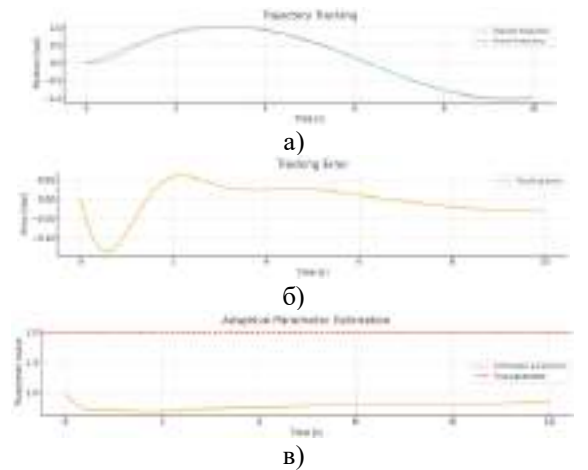
The developed mathematical models of adaptive control of a collaborative mobile manipulator provide a number of advantages that determine their practical value in modern production scenarios. First, they allow taking into account the uncertainty of system parameters and changes in environmental dynamics, which increases the stability and accuracy of movement in real time. Second, the integration

of adaptation mechanisms and potential safety functions creates the possibility of effective interaction with a person without the risk of emergency situations. Such models are flexible, as they can be configured for different types of collaborative robots and usage scenarios. An important advantage is the possibility of their numerical modeling and verification of algorithms before practical implementation, which significantly reduces development costs and increases system reliability.

III. NUMERICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

The purpose of numerical simulation was to verify the performance and effectiveness of the developed mathematical model of adaptive control of a collaborative mobile manipulator in a dynamic environment. Using simulation, it became possible to investigate how accurately the system is able to track a given trajectory of motion in the presence of uncertainty in the parameters and initial conditions. An important goal was to assess the stability of the control algorithm, in particular the ability to gradually reduce the error between the desired and actual position, which is a critical factor for the real operation of a robotic system next to a person. Numerical simulation also allowed to verify the effectiveness of the adaptive parameter estimation mechanism, which is confirmed by the gradual convergence of the estimated value with the true one. In addition, the study aimed to identify transient processes and oscillations of the system at the initial stages of motion in order to assess its behavior in unpredictable conditions. Thus, modeling serves not only as a validation tool for the proposed approach, but also as a means of predicting its effectiveness in real production scenarios, where safety, accuracy, and adaptability are the defining characteristics of a collaborative robot.

The results obtained from numerical modeling are presented in Fig. 1.



a) Trajectory Tracking; 6) Tracking Error; b) Adaptive Parameter Estimation

Fig. 1 – Results of multiple simulations

The obtained numerical simulation results (Fig. 1) demonstrate the effectiveness of the applied adaptive control model for a collaborative mobile manipulator. The trajectory tracking graph shows that the actual trajectory practically coincides with the given sinusoidal one over time, which confirms the system's ability to provide stable motion even

in the presence of initial uncertainty in the parameters. The error graph shows that the initial deviation reaches approximately 0.05 rad, but then gradually decreases and tends to zero, which indicates an asymptotic improvement in accuracy due to the adaptive law. Certain fluctuations in the first seconds are explained by the inertia of the system and the initial difference in the model parameters, but they quickly fade away. The third parametric identification graph shows that the estimate of the unknown parameter gradually approaches the true value of 2.0, although the convergence rate is relatively slow, which corresponds to the selected adaptation rate. This confirms the stability of the algorithm and the ability to correct even with significant differences in the initial estimates. Taken together, the results confirm the logical consistency of the model, demonstrate its numerical convergence and qualitative effectiveness for the tasks of safe and precise control of collaborative robots in a dynamic environment.

IV. CONCLUSION

In the course of the study, a mathematical model of adaptive control of a collaborative mobile manipulator in a shared working environment was developed and numerically tested, which demonstrated the ability to effectively ensure stability and accuracy of movement even under conditions of uncertainty of the system parameters. The obtained modeling results confirmed that the proposed approach allows achieving high-quality tracking of the desired trajectory, since the actual movement of the manipulator gradually coincides with the given sinusoidal signal. Analysis of the graphs showed that the initial deviation from the trajectory did not exceed 0.05 rad and quickly decreased due to the adaptive controller, which confirms the system's resistance to initial disturbances. The observed error decay indicates the asymptotic convergence of the algorithm and its suitability for operation in dynamic production conditions. The estimate of the unknown parameter, which initially differed significantly from the true value, gradually approached it, which proves the effectiveness of the adaptation law and the possibility of correction in real time. This creates a basis for the practical implementation of a control system capable of self-learning and maintaining accuracy in the event of changes in the mass-inertial characteristics of the robot. The simulation also demonstrated the absence of dangerous fluctuations in transient processes, which is of fundamental importance for human safety in a shared environment. Thus, the results obtained prove the feasibility of using an adaptive approach in the control tasks of collaborative mobile manipulators, since it combines high accuracy of trajectory movement, resistance to uncertainties and the ability to take into account safety requirements in interaction with the operator.

REFERENCES

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. *IEEE Access*.
- [2] Chouridis, I., Mansour, G., Papageorgiou, V., Mansour, M. T., & Tsagaris, A. (2025). Four-Dimensional Path Planning Methodology for Collaborative Robots Application in Industry 5.0. *Robotics*, 14(4), 48.
- [3] Makeshkumar, M., Sasi Kumar, M., Anburaj, J., Ramesh Babu, S., Vembarasan, E., & Sanjiv, R. (2025). Role of Cobots and Industrial Robots in Industry 5.0. *Intelligent Robots and Cobots: Industry 5.0 Applications*, 43-63.
- [4] Raji, A., Gopaul, U., Babineau, J., Popovic, M. R., & Marquez-Chin, C. (2025). Industrial-grade collaborative robots for motor rehabilitation after stroke and spinal cord injury: a systematic narrative review. *BioMedical Engineering OnLine*, 24(1), 50.
- [5] Puttero, S., Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2025). Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-37.
- [6] Onfiani, D., Caramaschi, M., Biagiotti, L., & Pini, F. (2025). Optimizing Design and Control Methods for Using Collaborative Robots in Upper Limb Rehabilitation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.
- [7] Montini, E., Daniele, F., Agbomemewa, L., Confalonieri, M., Cutrona, V., Bettoni, A., ... & Ferrario, A. (2024). Collaborative robotics: a survey from literature and practitioners perspectives. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(3), 117.
- [8] Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., & Pirayesh, A. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(5), 2065-2118.
- [9] Liu, L., Guo, F., Zou, Z., & Duffy, V. G. (2024). Application, development and future opportunities of collaborative robots (cobots) in manufacturing: A literature review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(4), 915-932.
- [10] Palanisamy, C., Perumal, L., & Chin, C. W. (2025). A comprehensive review of collaborative robotics in manufacturing. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), 21970-21975.
- [11] Gao, Z., Chen, C., Peng, F., Zhang, Y., Liu, H., Zhou, W., ... & Tang, X. (2025). Adaptive safety-critical control using a variable task energy tank for collaborative robot tasks under dynamic environments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 94, 102964.
- [12] Kermenov, R., Foix, S., Borràs, J., Castorani, V., Longhi, S., & Bonci, A. (2025). Automating the hand layup process: On the removal of protective films with collaborative robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93, 102899.
- [13] Chlebek, J., Kot, T., Oščádal, P., Heczko, D., Maslowski, J., Scalera, L., & Vysocký, A. (2025). Optimized Grid Voxelization for Obstacle Avoidance in Collaborative Robotics. *IEEE Access*, 13, 45187-45197.
- [14] Gonçalves, A., Pereira, T., Lopes, D., Cunha, F., Lopes, F., Coutinho, F., ... & Ferreira, N. M. F. (2025). Enhancing Nut-Tightening Processes in the Automotive Industry: Integration of 3D Vision Systems with Collaborative Robots. *Automation*, 6(1), 8.

- [15] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [16] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [17] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [18] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [19] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [20] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [21] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [22] Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., ... & Šlajpah, S. (2018). Collaborative robots. In *Robotics* (pp. 173-187). Cham: Springer International Publishing.
- [23] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [24] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [25] Невлюдов, І. ІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [26] НЕВЛЮДОВ, І., ЄВСЄЄВ, В., & ГУРІН, Д. (2025). МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО ПРОЦЕСНОГО ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ АЛОКАЦІЇ ЗАВДАНЬ МІЖ ЛЮДЬМИ ТА КАЛАБОРАТИВНИМИ РОБОТАМИ В РАМКАХ ІНДУСТРІЙ 5.0. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1(1 (92)), 157-163.
- [27] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [28] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [29] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [30] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [31] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [32] Chala, O., Ababneh, J., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2025). BIO-INSPIRED PRINCIPLES FOR MODELING INFORMATION COLLECTION IN COLLABORATIVE ROBOT ENVIRONMENTS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 9-18.
- [33] Maksymova, S., Hamdan, M., Yevsieiev, V., & Abu-Jassar, A. (2025). A Mathematical Model Development for an Automated Control System for Packaging and Sorting Products Closed Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 149-164.
- [34] Nevliudov I. Features of Using Data Fusion With Extended Kalman Filter in Industry 5.0 Concepts / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, Elgun Jabrayilzade // *International Scientific Conference "Intellectual Resource of Today: Scientific Tasks, Development and Questions"*, collection of scientific papers with materials of the V International Scientific Conference, August 29, 2025. — Vinnytsia : LLC "UKRLOGOS Group, 2025. — P. 195-199. - DOI : <https://doi.org/10.62731/mcnd-29.08.2025>.
- [35] Невлюдов, І., Євсєєв, В., Максимова, С., & Артюх, Р. (2025). Математична модель адаптивного ієрархічного високорівневого керування триланкового колаборативного робота-маніпулятора. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (2 (32)), 58-68.

Research on methods for controlling a group of mobile robots under uncertainty

Maksym Moisieiev¹ Vladyslav Yevsieiv²

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: maksym.moisieiev@nure.ua

2. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: vladyslav.yevsieiv@nure.ua

Abstract: The article considers modern methods for controlling a group of mobile robots in environments with a high level of uncertainty, which is a relevant task in the context of the development of the Industry 5.0 concept. The main attention is paid to the analysis of centralized and decentralized approaches, probabilistic models, fuzzy logic, collective intelligence methods, and reinforcement learning algorithms. The conducted research demonstrates their features, advantages, and limitations when applied in production and service scenarios. It is shown that decentralized and bioinspired methods provide high stability and scalability, while probabilistic models and fuzzy logic allow you to work effectively with incomplete information. Machine learning methods provide the ability to adapt and self-learning, but require significant computing resources. The results obtained indicate the feasibility of integrating different approaches into hybrid systems, which allows you to increase the efficiency and reliability of group control of robots in complex environments.

Keywords: mobile robots, group management, uncertainty, decentralized methods, fuzzy logic, POMDP, collective intelligence, reinforcement learning.

I. INTRODUCTION

In the current conditions of the development of Industry 5.0 and intelligent production systems, the problem of effective control of groups of mobile robots that work in a common space with humans and other technical agents is of particular importance. The growing complexity of production and service processes requires robotic systems to have the ability to adapt, make quick decisions, and coordinate interaction even in situations where the external environment is characterized by a high level of uncertainty. Such uncertainty can be caused by incomplete sensor data, delays in communication channels, and dynamic changes in the environment, which complicate trajectory planning and coordination of actions. Research into control methods in these conditions is important for ensuring the stability, safety, and reliability of multi-component robotic systems. In addition, the use of adaptive approaches, such as fuzzy logic, probabilistic models, or multi-level control strategies, allows you to create algorithms that can take unpredictability into account and reduce the risks of collisions. The relevance of the research is also determined by the need to increase the autonomy of mobile robots, their ability to collaborate and flexibly distribute tasks in a team, which directly affects the efficiency of production processes, logistics and service. Thus, the study and development of new methods for controlling a group of mobile robots in environments with a high level of uncertainty is a strategic direction of modern

robotics, which opens up opportunities for creating more intelligent and sustainable systems in real scenarios.

II. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF METHODS FOR CONTROLLING A GROUP OF MOBILE ROBOTS

Methods for controlling a group of mobile robots under uncertainty are one of the key problems of modern robotics, as they provide the possibility of effective functioning of multi-component systems in complex and dynamic environments. One of the most common approaches is centralized control, which is based on the creation of a single coordination center for decision-making. This method allows achieving a high level of coherence of actions, but its disadvantage is vulnerability to communication failures and limited scalability in large groups.

$$\min J = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C(x_{i,t}, u_{i,t}) \quad (1)$$

Where: N - number of robots; T - number of time steps; $x_{i,t}$ - state of the i -th robot at time instant t ; $u_{i,t}$ - control signal for i -th robot at time instant t ; $C(x_{i,t}, u_{i,t})$ - cost function that takes into account energy consumption, time, or distance.

In contrast, decentralized control is used, where each agent makes decisions based on local information, which increases the system's resilience to failures and reduces dependence on the central node. In the context of Industry 5.0, decentralized control models are of particular relevance, as they provide greater flexibility and autonomy when interacting with a person in a production environment.

$$u_i(t) = f(x_i(t), \mathcal{N}_i(t)) \quad (2)$$

Where: $x_i(t)$ - local state of the i -th robot; $\mathcal{N}_i(t)$ - information from neighbors in the interaction zone; $f(\cdot)$ - function of the local control law.

Probabilistic methods are of great importance, among which models based on Markov processes and partially observable Markov processes (POMDP) stand out. They allow us to formalize uncertainty about the states of the environment and choose optimal actions taking into account incomplete sensor data. The use of POMDP in mobile robotics ensures decision-making in situations where only partial information about obstacles, object motion dynamics, or the behavior of other agents is available.

$$P(s_{t+1}|s_t, a_t), O(o_t|s_t, a_t), R(s_t, a_t) \quad (3)$$

Where: s_t - state of the system at a point in time t ; a_t - robot action; $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$ - probability of transition to a new state; $O(o_t|s_t, a_t)$ - probability of receiving an observation o_t ; $R(s_t, a_t)$ - a reward function that describes the goal (for example, minimizing time or avoiding collisions).

In turn, fuzzy logic provides the ability to process uncertain and imprecise data, which is typical in working with real sensory systems. It allows you to build decision-making rules based on linguistic variables and ensures the adaptation of robot behavior to complex environmental conditions. Such approaches are especially effective in systems where human interaction is required, since they bring the control process closer to natural decision-making principles.

$$u = \sum_{k=1}^M \mu_k(x) \cdot w_k \quad (4)$$

Where: x - input data (e.g. distance to obstacle, speed); $\mu_k(x)$ - membership function for the k -th rule; w_k - weighting factor or control value; u - control output signal.

An equally important direction is the use of collective intelligence methods based on bioinspired models, in particular swarm or ant colony algorithms. Their feature lies in the ability of a group of robots to collectively achieve a global goal through simple local interaction rules. Such algorithms are resistant to failures of individual agents, provide adaptation to changes in the environment and allow for effective solutions to search, exploration or route optimization problems. In the context of Industry 5.0, these methods become the basis for the formation of collaborative robotic systems capable of self-learning and interaction with humans as equal participants in the process.

- for the swarm:

$$u_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(p_i - x_i(t)) + c_2r_2(g - x_i(t)) \quad (5)$$

Where: $x_i(t)$ - position of the i -th robot; $v_i(t)$ - speed of the i -th robot; p_i - the best solution found by the robot; g - the best global solution; w, c_1, c_2 - inertia and learning coefficients; r_1, r_2 - random variables.

- for the ant algorithm:

$$P_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}(t)^\beta}{\sum_k \tau_{ik}(t)^\alpha \cdot \eta_{ik}(t)^\beta} \quad (6)$$

Where: $\tau_{ij}(t)$ - amount of pheromone on the edge $i \rightarrow j$; $\eta_{ij}(t)$ - heuristic information (e.g. 1/distance); α, β - pheromone and heuristic influence coefficients.

Modern research also focuses on machine learning and deep reinforcement learning, which allow robots to learn new behavioral strategies through experience and interaction with the environment. Such methods are aimed at creating adaptive systems that can adapt to unpredictable changes and improve the efficiency of decision-making in real time. Their application opens up new opportunities for creating

intelligent robotic teams that can work effectively in the uncertain conditions of modern production.

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{\hat{a}} Q(\hat{s}, \hat{a}) - Q(s, a)] \quad (7)$$

Where: $Q(s, a)$ - function of the value of the state and action; α - learning coefficient; γ - discounting coefficient of future rewards; r - reward for action a in state s ; $\hat{s}$ - next state.

Thus, the study and integration of existing methods for controlling a group of mobile robots in environments with a high level of uncertainty is a significant contribution to the development of the concept of Industry 5.0 and the formation of new generations of adaptive and sustainable robotic systems.

III. COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CONTROLLING A GROUP OF MOBILE ROBOTS

The study of methods for controlling a group of mobile robots under uncertainty shows that each of the approaches has its own application features, advantages and limitations. Centralized control is most often used in production lines or logistics systems, where there is a single coordination center that can quickly distribute tasks between all agents. An example is automated warehouses, where robots move according to a single plan to reduce the time for delivering goods. The main advantage of this method is high efficiency in small systems, but the disadvantage is its dependence on the reliability of the communication channel and the difficulty of scaling with a large number of robots. Decentralized control, on the other hand, has demonstrated its effectiveness in cases where communication between all robots is not always possible. It is actively used in search and rescue systems, where robots must make decisions independently in conditions of loss of communication. The advantage of the method is its resistance to failures and high autonomy, but the difficulty lies in ensuring global consistency of the actions of the entire group.

Probabilistic methods, in particular POMDP, have shown high efficiency in navigation among dynamic obstacles. For example, when transporting parts in production shops, where people and other robots can change their movement trajectories unpredictably, the use of POMDP allows robots to adapt their decisions to incomplete or inaccurate information. The advantage of this approach is the ability to work with uncertain data, but the main disadvantage is the computational complexity, which increases with the number of agents. Fuzzy logic is often used in collision avoidance and smooth speed control problems. It allows for real-time decision-making based on fuzzy rules, which is well suited to the nature of sensor data, which always contains errors. An example is the control of a group of robots in service environments, where they must work next to a person, ensuring safe interaction. The strength of fuzzy logic is adaptability, and the weakness is the dependence on the correctness of the formalization of rules and membership functions.

Collective intelligence methods are practically applied in large groups of mobile robots to perform search or monitoring tasks. For example, swarm algorithms are effective for exploring areas after disasters, when each robot

performs local tasks, but together they provide a global result. They have the advantage of high scalability and fault tolerance, but demonstrate limited effectiveness in tasks where precise coordination and synchronization of actions are required. In turn, ant algorithms are well suited for optimizing routes in logistics systems, but suffer from slow convergence, which can be critical in fast-paced production processes. Machine learning and reinforcement learning methods have opened up new opportunities in managing mobile teams. An example is delivery robots that learn to optimize routes in a constantly changing urban environment. The main advantage of this approach is the ability to self-learn and accumulate experience, which significantly increases efficiency in the long term. However, the weakness remains the need for large computational resources and training samples, which limits their application in real-time modes for systems with limited resources. Thus, the study demonstrates that each method has its niche in controlling groups of mobile robots in environments with a high level of uncertainty, and a promising direction is their integration into hybrid systems that can combine the advantages of different approaches and compensate for their shortcomings.

IV. CONCLUSION

The study showed that the problem of controlling a group of mobile robots under uncertainty is of strategic importance for the development of intelligent systems of Industry 5.0. Analysis of existing methods showed that centralized control is effective in small systems, but its limitations are manifested in scaling and loss of resilience to failures. Decentralized approaches, on the contrary, provide high autonomy and flexibility, allowing robots to make decisions based on local information. Probabilistic methods, such as POMDP, have proven their effectiveness in situations with partial observation and dynamic environmental changes. The use of fuzzy logic has proven its feasibility in decision-making tasks based on inaccurate data, which is typical for sensor systems. Collective intelligence methods have demonstrated the ability to scale the system and maintain operability even when individual agents fail. Machine learning and reinforcement learning algorithms have shown promise in creating adaptive control strategies, but require significant computing resources. Comparative analysis shows that each method has its own niche of use depending on the type of environment and the requirements for speed and accuracy of decision-making. In real scenarios, special attention is required to combine methods, which allows to compensate for their shortcomings and enhance their advantages. An important direction of further research is the development of hybrid models that integrate elements of probabilistic, fuzzy and bioinspired approaches. This opens up new opportunities for creating robotic systems that are resistant to uncertainty. The conclusions of the work confirm the relevance of multi-level strategies for coordinating a group of robots. Their practical implementation will contribute to increasing the efficiency of production, logistics and service processes in dynamic environments. Thus, the proposed approach defines a promising vector for the development of robotics in conditions of rapid change and growing requirements for autonomy and safety.

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. *IEEE Access*.
- [2] Dobrzańska, M., & Dobrzański, P. (2025). Simulation Model as an Element of Sustainable Autonomous Mobile Robot Fleet Management. *Energies*, 18(8), 1894.
- [3] Chen, Z., Wang, W., Liu, W., Liu, Y., & Xi, J. (2025). The Effects of Communication Delay on Human Performance and Neurocognitive Responses in Mobile Robot Teleoperation. *arXiv preprint arXiv:2508.18074*.
- [4] Gupta, S., Mamodiya, U., Hossain, A. Z., & Al-Gburi, A. J. (2025). A Framework for Bluetooth-Based Real-Time Audio Data Acquisition in Mobile Robotics. *Signals*, 6(3), 31.
- [5] Delgado Asencio, C., Segura Manzano, F., & Andújar Márquez, J. M. (2025). Hygrobot: Hydrogen-Powered Mobile Robotic Platform for Rough Terrain: Electro-Mechanical Design, Physical Implementation, and Experimental Testing. *Applied Sciences*, 15(9), 5028.
- [6] Pastrana Triana, M. A., Santana, M. S., Mendoza Peñaloza, J. A., Nunes de Oliveira, L. H., & Muñoz Arboleda, D. M. (2025). Comparison of gmdh and perceptron controllers for mobile robot obstacle following/avoidance with hardware-in-the-loop validation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111(1), 1-23.
- [7] Sarkar, C., Das, A., & Jain, R. K. (2025). Development of CoAP protocol for communication in mobile robotic systems using IoT technique. *Scientific Reports*, 15(1), 9269.
- [8] Zhao, Y., Mantha, B. R., Knijnenburg, B. P., & Li, D. (2025). Exploring the feasibility of mobile robots for post-occupancy evaluations. *Building Research & Information*, 53(1-2), 165-182.
- [9] Ness, S. (2025). Integrating AI Models for Voltage and Current Monitoring in Autonomous Mobile Robots to Prevent Power System Blackouts. *IEEE Access*.
- [10] Li, J., Chu, J., Zhao, F., Li, S., Li, W., & Chen, D. (2025). Constrained Optimal Planning to Minimize Battery Degradation of Autonomous Mobile Robots. *arXiv preprint arXiv:2506.13019*.
- [11] Pérez-Juárez, J. G., García-Martínez, J. R., Medina Santiago, A., Cruz-Miguel, E. E., Olmedo-García, L. F., Barra-Vázquez, O. A., & Rojas-Hernández, M. A. (2025). Kinematic Fuzzy Logic-Based Controller for Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots in Virtual Environments. *Symmetry*, 17(2), 301.
- [12] Zhang, Z., Yang, H., Bai, X., Zhang, S., & Xu, C. (2025). The path planning of mobile robots based on an improved genetic algorithm. *Applied Sciences*, 15(7), 3700.
- [13] Eirale, A., Martini, M., & Chiaberge, M. (2025). Human following and guidance by autonomous mobile robots: A comprehensive review. *IEEE Access*.
- [14] Damjanović, D., Biočić, P., Prkljačić, S., Činčurak, D., & Balen, J. (2025). A comprehensive survey on SLAM and machine learning approaches for indoor autonomous navigation of mobile robots. *Machine vision and applications*, 36(3), 55.

- [15] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [16] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [17] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [18] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [19] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [20] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [21] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [22] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [23] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [24] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [25] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [26] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [27] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [28] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [29] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [30] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [31] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [32] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [33] Yevsieiev, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference*, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.
- [34] Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали ІІІ Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р.* - Одеса : ОНТУ, 2023 . – С. 21-23.
- [35] Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 1187-1202.

Analysis of object identification methods for FPV drones

Denys Chebanchyk¹ Vladyslav Yevsieiv²

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: denys.chebanchyk@nure.ua
2. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: vladyslav.yevsieiv@nure.ua

Abstract: The abstracts of the report consider modern methods of object identification for FPV drones with an emphasis on their application in real time and under conditions of limited computing resources. Classical approaches based on keypoint extraction, deep convolutional neural networks, semantic and instance-segmentation methods, as well as state filters and lightweight optimized models are analyzed. The study shows that each of the methods has its advantages and limitations depending on the accuracy, processing speed and complexity of the environment. Special attention is paid to hybrid approaches that combine the advantages of several methods to ensure stable and effective object identification on board FPV drones. The results obtained emphasize the need to optimize algorithms and adapt models to the resource constraints of drones to ensure reliability and accuracy of operation in dynamic conditions.

Keywords: FPV drones, object identification, computer vision, deep neural networks, segmentation, Kalman filter, lightweight models, hybrid methods, real-time.

I. INTRODUCTION

The modern development of unmanned aerial vehicles, in particular FPV drones, opens up new opportunities for their use in military, civil and industrial spheres, where fast and reliable identification of objects in real time plays a key role. FPV technology provides the operator with the ability to directly visually control the drone, which allows performing complex maneuvers, however, the effectiveness of task performance largely depends on the accuracy of the object recognition system. In conditions of a dynamic environment, changes in lighting, the presence of obstacles or camouflage, target identification becomes a particularly difficult task. This necessitates the use of modern methods of computer vision, machine learning and deep neural networks, which are able to improve the quality of recognition even with incomplete or distorted data. The importance of this direction is determined by the need to increase the autonomy of FPV drones, which will reduce dependence on the operator and increase efficiency in performing reconnaissance, search and rescue or tactical tasks. At the same time, it is relevant to study methods for object identification from the point of view of optimizing computing resources, since FPV drones usually have limited computing power. Thus, analyzing existing approaches and determining their advantages and disadvantages is an important stage for the further development of intelligent decision support systems in the field of FPV technologies.

II. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF METHODS FOR CONTROLLING A GROUP OF MOBILE ROBOTS

Feature-based keypoint detection & matching (SIFT / ORB / BRIEF) method. This is a classic approach that extracts local "keypoints" in frames, builds descriptors for them, and compares the descriptors between frames or with a sample database to identify objects; works well with limited resources and changing object appearance. Mathematically, the key steps are: feature detection through local operations on the image (e.g., Difference of Gaussians - DoG) and descriptor construction (gradient histograms in SIFT or binary comparisons in BRIEF/ORB).

- DoG for detection:

$$\begin{aligned} L(x, y, \sigma) &= G(x, y, \sigma) \cdot I(x, y) \\ DoG(x, y, \sigma_k) &= L(x, y, \sigma_k) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (1)$$

Where: G - Gaussian filter with dispersion σ ; I - intensity; σ - scale, detection threshold, number of octaves
- ORB/BRIEF descriptor + matching:

$$D(d_a, d_b) = \text{Hamming}(d_a, d_b) \quad (2)$$

Advantages: few computations (especially ORB/BRIEF), invariance to shift/scale/rotation (SIFT), works well with scarce resources and for real-time on edge platforms. Disadvantages: sensitivity to strong lighting changes, texture-poor regions (where there are few keypoints), difficult to scale to semantic identification (class ≠ specific keypoint).

Method one-stage detectors based on CNN (YOLO / SSD). These models implement object detection and classification in a single pass of the network, estimating for each anchor rectangle the coordinates and class probabilities; suitable for fast processing of FPV video with sufficient hardware support (GPU / NN-accelerator). Mathematically — convolutions + box regression + loss functions for coordinates and probabilities (combination of local regression and cross-entropy). Model (basic architecture):

$$\begin{aligned} y &= f_{\theta}(I) \\ L &= \lambda_{coord} \sum (x - \hat{x})^2 + \lambda_{coord} \sum (y - \hat{y})^2 \\ &\quad + \sum CE(p_{class}, \hat{p}_{class}) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Where: f_{θ} - convolutional network.

Advantages: high speed (especially YOLO-lite versions), ready-made end-to-end solutions, good balance of accuracy and speed. Disadvantages: for FPV drones, requires optimization/hardware acceleration; accuracy drops for very

small or very blurred objects; demanding on the amount of training data.

Method semantic segmentation / instance segmentation (U-Net, DeepLab, Mask R-CNN). The method returns object masks (pixel identification) and is useful when you need to accurately separate the shape of an object in an FPV frame (for example, people, cars, useful details). The mathematics is based on convolutional network transformations with upsampling (decoder) and a loss function per pixel (cross-entropy or IoU-based loss).

- model 1 (U-Net):

$$y = \text{Decoder}(\text{Encoder}(I)) \quad (4)$$

where the encoder compresses the image properties, the decoder restores the mask size; parameters: number of levels, filter size, activation function.

- model 2 (IoU-loss for mask):

$$L_{IoU} = 1 - \frac{\sum p_i g_i}{\sum p_i + \sum g_i - \sum p_i g_i} \quad (5)$$

Where: p_i - predicted pixels; g_i - true.

Advantages: accurate localization and shape of the object, useful for navigating around static/dynamic obstacles. Disadvantages: high computational and memory requirements; slower than box detectors; more difficult in real-time on limited FPV drone hardware.

Tracking + state estimation method (Kalman Filter, Particle Filter + association - SORT/DeepSORT). This approach combines frame-by-frame detection with tracking of object trajectories over time, which allows maintaining object identity during short-term fading or partial overlaps. The mathematics consists of state filter equations and prediction/correction steps and an association algorithm between detections and tracks (e.g., guessing/Hungarian algorithm). Model (Kalman filter, linear):

- state:

$$x_{t+1} = Fx_t + Bu_t + w_t \quad (6)$$

- observation:

$$z_t = Hx_t + v_t \quad (7)$$

Where: $w_t \sim \mathcal{N}(0, Q)$; $v_t \sim \mathcal{N}(0, R)$; H - observation matrix; Q, R - noise covariance. Particle filter is suitable for nonlinear/non-Gaussian cases where the state is approximated by a set of particles $\{x^{(i)}, w^{(i)}\}$. Association: minimization of the cost matrix (IOU or distance) via Hungarian; parameters: IOU threshold, maximum track loss. Advantages: stability of tracks over time, possibility of predicting object motion and recovery after losses. Disadvantages: dependence on detector quality, association errors with strong crowding of objects; Particle filter can be computationally expensive.

Method Lightweight on-device models and optimizations (MobileNet, EfficientNet-Lite + quantization/pruning/distillation). For FPV drones, it is critical to reduce computation and memory, so specially optimized architectures and model compression techniques are used. Mathematically important idea is depthwise

separable convolutions (MobileNet), which decompose the full convolution into depthwise and pointwise stages, significantly reducing the number of operations. Model (depthwise separable conv): the full convolution has a complexity:

$$D_k^2 \cdot M \cdot N \cdot H \cdot W \quad (8)$$

Where: D_k - kernel size; M - input channels; N - output; parameters: network width (width multiplier), input resolution, quantization degree (8-bit, 16-bit). Quantization is also used: $w_q = \text{round}(\frac{w}{s})$ with scale s , and pruning (removal of small weights). Advantages: the ability to perform inference directly on board a drone with limited energy consumption, low latency, maintaining autonomy. Disadvantages: tradeoff of accuracy against size/speed; some optimizations (aggressive pruning, low-bit quant) can spoil stability for delicate classes.

General conclusion: all the described approaches have their strengths and limitations - classical feature-based methods are light and cheap in resources, but weak in semantic classification; CNN detectors provide powerful semantics and speed, but require optimization for FPV drones; segmentation is useful for accurate localization of shapes, but is more resource-intensive; the combined approach "detection + tracking/state filtering" significantly increases the robustness of identification in the video stream; and the use of lightweight architectures and compression techniques is a mandatory practical step for implementing an identification system directly on a drone. For FPV scenarios, hybrid solutions are most effective: for example, a lightweight CNN detector on board + segmentation/more accurate validation on the backend or a hardware accelerator; or a combination of feature-matching for fast matches and CNN for class confirmation. If you want, I can: a) offer examples of architectures (MobileNet-Tiny + SSD configurations) with approximate calculation metrics; b) prepare a flowchart of on-board / off-board processing integration for an FPV drone - immediately in technical form.

III. COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CONTROLLING A GROUP OF MOBILE ROBOTS

A comparative analysis of the considered methods of object identification for FPV drones shows that each of them has its own implementation specifics, which are determined by both mathematical models and hardware limitations of the platforms themselves. Classical computer vision methods based on feature extraction, in particular SIFT or ORB, are characterized by relative simplicity of implementation and low requirements for computing resources, which makes them suitable for FPV drones with limited on-board processor performance. At the same time, these methods are vulnerable to changes in lighting, noise and partial overlaps, which significantly reduces their reliability in dynamic and unpredictable conditions. Deep convolutional neural networks, on the contrary, provide high accuracy of object recognition even in complex environments, but require significant computing power and optimization, in particular through the use of accelerators such as GPU or TPU. For FPV drones, where energy efficiency and processing speed are critical, CNN models require special optimizations, for

example, by using MobileNet or Tiny-YOLO. Bayesian methods, in particular variations of the Kalman filter or particle filters, provide good performance in conditions of noisy sensor data and partial visibility of objects, allowing to integrate information from multiple sources. However, their effectiveness depends on the correct definition of a priori models and probability distributions, which is sometimes a difficult task in real flight conditions. Methods based on fuzzy logic demonstrate flexibility in cases where the data is imprecise or contradictory, but their accuracy and speed may be inferior to other current approaches. Bio-inspired algorithms, such as swarm models or evolutionary approaches, allow FPV drones to distribute the load and collectively identify objects, but when used alone they do not provide high accuracy without integration with more traditional methods. In general, it can be noted that for FPV drones, the most effective are hybrid systems that combine the simplicity of classical methods for pre-extraction of features with the high accuracy of deep models, as well as support the results with probabilistic and fuzzy methods. This allows you to balance computational costs, energy efficiency and recognition quality, which is critical for performing tasks in real time.

IV. CONCLUSION

The conducted study of object identification methods for FPV drones showed that the efficiency of such systems largely depends on the choice of algorithmic approach and hardware platform. Classical methods based on key points, such as SIFT and ORB, provide relatively low computational complexity and fast operation, but their accuracy is significantly reduced in conditions of noise, lighting changes or partial overlapping of objects. Deep convolutional neural networks allow achieving high recognition accuracy even in complex dynamic scenes, but require optimization for use on board FPV drones due to limited computing resources. Semantic and instance-segmentation methods provide accurate selection of the object shape and are useful for navigation, but are more resource-intensive and slower in real time. The use of state filters, such as Kalman or particle filters, together with tracking allows maintaining the identity of the object over time and predicting its movement, but requires a correct a priori model and parameter settings. Lightweight optimized models such as MobileNet and EfficientNet-Lite with quantization and pruning techniques demonstrate a balance between speed and accuracy, making them suitable for on-board processing on FPV drones. The overall analysis shows that the most effective are hybrid approaches that combine classical feature extraction methods with deep models and probabilistic filters to increase the robustness and accuracy of identification. This approach allows for optimal allocation of computing resources, ensuring fast real-time response and system reliability in dynamic environments. The implementation of hybrid methods is promising for the development of autonomous FPV drones that perform reconnaissance, monitoring and navigation tasks in complex conditions. The results obtained emphasize the need for further improvement of algorithms, integration of optimized models and development of adaptive systems capable of operating in various environments with a high level of uncertainty.

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. *IEEE Access*.
- [2] Dobrzańska, M., & Dobrzański, P. (2025). Simulation Model as an Element of Sustainable Autonomous Mobile Robot Fleet Management. *Energies*, 18(8), 1894.
- [3] Chen, Z., Wang, W., Liu, W., Liu, Y., & Xi, J. (2025). The Effects of Communication Delay on Human Performance and Neurocognitive Responses in Mobile Robot Teleoperation. *arXiv preprint arXiv:2508.18074*.
- [4] Gupta, S., Mamodiya, U., Hossain, A. Z., & Al-Gburi, A. J. (2025). A Framework for Bluetooth-Based Real-Time Audio Data Acquisition in Mobile Robotics. *Signals*, 6(3), 31.
- [5] Delgado Asencio, C., Segura Manzano, F., & Andújar Márquez, J. M. (2025). Hygrobot: Hydrogen-Powered Mobile Robotic Platform for Rough Terrain: Electro-Mechanical Design, Physical Implementation, and Experimental Testing. *Applied Sciences*, 15(9), 5028.
- [6] Pastrana Triana, M. A., Santana, M. S., Mendoza Peñaloza, J. A., Nunes de Oliveira, L. H., & Muñoz Arboleda, D. M. (2025). Comparison of gmdh and perceptron controllers for mobile robot obstacle following/avoidance with hardware-in-the-loop validation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111(1), 1-23.
- [7] Liu, F., & Tahir, R. (2025, May). Optimising FPV Drone Cinematography Experience: Transforming Flight Planning Workflow by Integrating Ground Control Software. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 85-110). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [8] Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O., & Khudov, V. (2025). Image Segmentation Methods for Kamikaze FPV Drones Targeting to Aid Critical Energy National Infrastructure Assets Protection. In *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport* (pp. 139-151). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [9] Halytskyi, O., Denysiuk, D., Kozhemiako, Y., & Kvassay, M. (2025). Method of FPV drone stabilization on an automatically determined target and its further observation.
- [10] Xiao, J., Zhang, R., Zhang, Y., & Feroskhan, M. (2025). Vision-based learning for drones: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- [11] Joyce, K. J. (2025, March). Drone racing's utility to contemporary operations as FPV kamikaze loitering UAV munitions and the next tech leap. In *AIAC 2025: 21st Australian International Aerospace Congress* (pp. 617-623). Melbourne: Engineers Australia; Royal Aeronautical Society.
- [12] Taylor, B., Allen, M., Henson, P., Gao, X., Malik, H., & Zhu, P. (2025). Enhancing Drone Navigation and Control: Gesture-Based Piloting, Obstacle Avoidance, and 3D Trajectory Mapping. *Applied Sciences*, 15(13), 7340.

- [9] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [10] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [11] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [12] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [13] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [14] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [15] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [16] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [17] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [18] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [19] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [20] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [21] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [22] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [23] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [24] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [25] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [26] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [27] Yevsieiev, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference*, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.
- [28] Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів*, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р. - Одеса : ОНТУ, 2023. - С. 21-23.
- [29] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [30] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors. In *2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (Vol. 1, pp. 247-251). IEEE.

Analysis of operator identification methods in the working area of a collaborative manipulator robot

Leon Molozhanov¹ Dmytro Gurin²

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: leon.molozhanov@nure.ua

2. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: dmytro.gurin@nure.ua

Abstract: The paper presents the results of the analysis of modern methods of operator identification in the working area of a collaborative robot-manipulator, which is important in the context of safe and effective interaction between a person and a robotic system. Sensor approaches, computer vision methods, biometric technologies, algorithms based on deep neural networks, as well as integration solutions using data fusion and fuzzy logic are considered. It is shown that sensor methods provide basic security, but are limited in accuracy, while computer vision and deep learning allow achieving high detail in identification, although they require significant computing resources. Biometric approaches create conditions for personalization of interaction, but may lose effectiveness in a production environment with a high level of noise and the need to use personal protective equipment. Data integration methods increase the stability of the system and its ability to work in conditions of uncertainty, ensuring multi-level adaptability. The analysis confirms that optimal solutions should be based on a combination of several methods, which is consistent with the concept of Industry 5.0 and contributes to the development of new generation cognitive robotic systems.

Keywords: operator identification, collaborative robot, manipulator, computer vision, sensor systems, neural networks, data fusion, biometrics, fuzzy logic, Industry 5.0.

I. INTRODUCTION

In modern production scenarios that correspond to the concept of Industry 5.0, the interaction of humans and collaborative robot manipulators plays a key role, where safety, reliability and efficiency are the determining factors. Identification of the operator in the robot's working area is one of the most important tasks, since it ensures not only the safe functioning of the system, but also creates the prerequisites for flexible adaptation of the robot to human actions. The uncertainty of the environment, various scenarios of operator behavior, as well as possible obstacles or limited sensor data complicate the task of timely detection and correct identification. Traditional approaches based on simple sensor triggers are no longer able to meet the growing requirements for accuracy and speed of system response. Modern methods, in particular computer vision, deep learning algorithms, sensor networks and data fusion systems, make it possible to form a complete picture of the operator's position and actions in the working area. This is especially important in cases where the robot has to perform complex manipulations in close proximity to a person, where even minimal errors can lead to emergency situations. Research into operator identification methods allows for the creation of safer and more intelligent control systems that are

able to predict human actions and adapt the robot to individual interaction characteristics. The relevance of this issue is determined by the need to integrate new technologies into intelligent production processes, which will contribute to the development of collaborative robotics and increase the efficiency of human-machine collaboration.

II. ANALYSIS OF OPERATOR IDENTIFICATION METHODS IN THE WORKING AREA OF COLLABORATIVE WORK

Analysis of methods and models for operator identification in the working area of a collaborative robot-manipulator is one of the key areas of development of modern robotics, since the level of safety and quality of interaction in the conditions of Industry 5.0 depends on the correctness and speed of determining the presence of a person. The first group of methods are classical sensor systems based on the use of ultrasonic, infrared and laser sensors. They allow determining the presence of an object in the robot area by registering the reflected signal. Such methods are characterized by relative simplicity of implementation and low cost, but their accuracy is often limited by lighting conditions, the presence of noise and reflective surfaces. Their main purpose is to detect the fact that the operator is in a dangerous zone with the subsequent transmission of a signal to reduce the speed or stop the manipulator. However, they do not provide complete information about the identity of the person or his specific actions, therefore they are used mainly as a basic level of protection.

Another approach is to use computer vision methods based on the analysis of the video stream from cameras located in the working area. These methods allow to identify the operator by his contour, pose or biometric features. Algorithms for highlighting key points of the skeleton (for example, OpenPose) provide the ability to track movements and gestures in real time, which allows the robot to adapt its behavior in accordance with human actions. The main advantage of this approach is the ability to provide detailed information about the position and movement of the operator, but its effectiveness may decrease with changing lighting, partial overlaps or a complex background. The use of depth cameras (for example, Intel RealSense or Kinect) significantly expands the capabilities, as it allows to obtain three-dimensional information about the spatial position of the person, which is especially important when working in a dynamic environment.

Deep learning methods open up new prospects for operator identification in the robot zone. The use of convolutional neural networks allows for high accuracy in recognizing both the face and the human body, as well as detecting specific gestures or signals. Such systems are capable of self-learning on large data sets and gradually improving the quality of identification, which makes them particularly promising for use in production environments. The main purpose of this approach is to ensure stable identification even in complex scenarios, but its main drawback is the high requirements for computing resources and the need to train on a large amount of data, which can be a difficult task in practical implementation. An important place is occupied by methods based on the integration of data from several sensor systems, i.e. the concept of data fusion. The simultaneous use of cameras, ultrasonic sensors and inertial sensors allows for the formation of a more accurate and reliable picture of the working zone. This approach compensates for the weaknesses of individual sensors and increases the system's resistance to interference. For example, if a camera cannot provide reliable identification due to poor lighting, data from ultrasonic sensors can confirm the presence of a person. The purpose of this method is to create a robust multi-level protection system that can operate under conditions of uncertainty and with a minimum number of false positives. The main disadvantage of this approach is the increased complexity of integration and the need for complex synchronization and information processing algorithms.

Biometric identification methods, such as facial recognition, voice recognition, or even individual movement patterns, are also used in collaborative robotics. Their purpose is to identify the specific person working with the robot, which can be important in personalized interaction scenarios. For example, the robot can adapt its behavior depending on the level of experience of a particular operator. The advantage of this approach is the possibility of individualization and creating a more "intelligent" interaction, while the disadvantage is the difficulty in ensuring stable operation in conditions of noise, environmental changes, or the use of personal protective equipment that can obscure biometric features.

Of particular interest are methods based on fuzzy logic and probabilistic models. They allow you to work in conditions of incomplete or inaccurate data, which is typical for real-world production environments. The use of fuzzy rules allows the system to make decisions about the presence and identification of the operator based on partially contradictory or ambiguous information. Probabilistic models, such as hidden Markov processes or POMDP, allow you to predict human behavior based on previous observations. This opens up opportunities for creating systems that can not only detect a person, but also adapt their actions to their future intentions. The disadvantage of these methods is their complexity in setting up and the need for careful selection of parameters, but their flexibility and ability to work in real-world conditions make them extremely promising.

The general analysis shows that none of the methods is universal and each has its own advantages and limitations. Sensory approaches provide basic security, computer vision and deep learning allow for detailed information about the operator, biometric methods provide personalization, while

data fusion and fuzzy logic increase the system's resilience under uncertainty. The most promising direction of development is the creation of hybrid systems that integrate different methods to achieve high accuracy, speed, and reliability in detecting and identifying the operator in the working area of a collaborative robot-manipulator.

III. COMPARATIVE ANALYSIS OF OPERATOR IDENTIFICATION METHODS IN THE WORKING AREA OF COLLABORATIVE WORK

A comparative analysis of operator identification methods in the working area of a collaborative robot-manipulator shows that each of them has its own strengths and weaknesses, which manifest themselves depending on the application conditions. Sensor methods based on ultrasonic or infrared sensors are reliable for basic detection of human presence and respond quickly to entering a dangerous zone, but they are not able to provide accurate identification or discrimination of specific actions, and are also often prone to false positives in complex environments. Computer vision methods provide more detailed information about the operator's posture, position, or even gestures, which makes them promising for adaptive interaction, but they are vulnerable to changes in lighting, overlapping objects, and require significant computing resources for stable real-time operation. Deep neural networks demonstrate high accuracy in human recognition, even in complex environments, and can learn new scenarios, which makes them universal, but high computational complexity and the need for large data sets limit their practical implementation in compact robotic systems. Data fusion methods allow for the integration of information from multiple sensors, which increases the stability and reliability of the system even under conditions of uncertainty, but they complicate the system structure and require special synchronization algorithms. Biometric methods provide the opportunity to personalize interaction and increase the intelligence of the system, but may lose effectiveness in cases where the operator uses protective helmets, gloves, or other personal protective equipment that distorts biometric features. Finally, methods based on fuzzy logic and probabilistic models provide high flexibility in working with incomplete or contradictory data and the ability to predict operator behavior, but their implementation requires complex tuning and precise selection of parameters to ensure reliable operation. In conclusion, it can be noted that sensor methods are best suited for the basic level of security, computer vision and neural networks for detailed identification, and data fusion and fuzzy logic are the most promising for building integrated systems that provide high reliability in real production conditions.

IV. CONCLUSION

As a result of the analysis of operator identification methods in the working area of a collaborative robot-manipulator, it was found that each of the approaches has its own strengths and limitations, which determine the scope of its practical application. Sensor methods remain the most accessible and provide a basic level of security, but their effectiveness is limited by insufficient accuracy and dependence on external factors. Computer vision methods and deep learning algorithms open up the possibility of highly accurate identification even in dynamic conditions,

but they require significant computing resources and a stable environment. Biometric technologies demonstrate the potential for individualized recognition, but face challenges in production environments, where operators may use protective equipment that complicates access to biometric features. Integration methods based on data fusion and fuzzy logic have shown the highest level of reliability and the ability to adapt to uncertainty, which makes them especially promising for Industry 5.0 systems. Thus, the optimal solution to the operator identification problem is to combine several approaches, which allows taking into account various factors of the production environment, increasing the level of safety, and ensuring effective interaction between a person and a collaborative robot-manipulator.

REFERENCES

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. *IEEE Access*.
- [2] Dobrzańska, M., & Dobrzański, P. (2025). Simulation Model as an Element of Sustainable Autonomous Mobile Robot Fleet Management. *Energies*, 18(8), 1894.
- [3] Chen, Z., Wang, W., Liu, W., Liu, Y., & Xi, J. (2025). The Effects of Communication Delay on Human Performance and Neurocognitive Responses in Mobile Robot Teleoperation. *arXiv preprint arXiv:2508.18074*.
- [4] Gupta, S., Mamodiya, U., Hossain, A. Z., & Al-Gburi, A. J. (2025). A Framework for Bluetooth-Based Real-Time Audio Data Acquisition in Mobile Robotics. *Signals*, 6(3), 31.
- [5] Delgado Asencio, C., Segura Manzano, F., & Andújar Márquez, J. M. (2025). Hygrobot: Hydrogen-Powered Mobile Robotic Platform for Rough Terrain: Electro-Mechanical Design, Physical Implementation, and Experimental Testing. *Applied Sciences*, 15(9), 5028.
- [6] Pastrana Triana, M. A., Santana, M. S., Mendoza Peñaloza, J. A., Nunes de Oliveira, L. H., & Muñoz Arboleda, D. M. (2025). Comparison of gmdh and perceptron controllers for mobile robot obstacle following/avoidance with hardware-in-the-loop validation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111(1), 1-23.
- [7] Liu, F., & Tahir, R. (2025, May). Optimising FPV Drone Cinematography Experience: Transforming Flight Planning Workflow by Integrating Ground Control Software. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 85-110). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [8] Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O., & Khudov, V. (2025). Image Segmentation Methods for Kamikaze FPV Drones Targeting to Aid Critical Energy National Infrastructure Assets Protection. In *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport* (pp. 139-151). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [9] Conejero, M. N., Montes, H., Bengochea-Guevara, J. M., Garrido-Rey, L., Andújar, D., & Ribeiro, A. (2025). A collaborative robotic fleet for yield mapping and manual fruit harvesting assistance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110351.
- [10] Barravecchia, F., Bartolomei, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2025). Designing symbiotic human–robot collaboration in assembly tasks. *Production Engineering*, 19(3), 629-661.
- [11] Pupa, A., Comari, S., Arrfou, M., Andreoni, G., Carapia, A., Carricato, M., & Secchi, C. (2025). Enhancing Performance in Human-Robot Collaboration: A Modular Architecture for Task Scheduling and Safe Trajectory Planning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- [12] Segura, P., Lobato-Calleros, O., Soria-Arguello, I., & Hernández-Martínez, E. G. (2025). Work Roles in Human–Robot Collaborative Systems: Effects on Cognitive Ergonomics for the Manufacturing Industry. *Applied Sciences*, 15(2), 744.
- [13] Gargioni, L., Fogli, D., & Baroni, P. (2025). Exploring the Adoption of Collaborative Robots for the Preparation of Galenic Formulations. *Information*, 16(7), 559.
- [14] Gonçalves, A., Pereira, T., Lopes, D., Cunha, F., Lopes, F., Coutinho, F., ... & Ferreira, N. M. F. (2025). Enhancing Nut-Tightening Processes in the Automotive Industry: Integration of 3D Vision Systems with Collaborative Robots. *Automation*, 6(1), 8.
- [15] Masi, E., Nguyen, N. T., Monari, E., Valori, M., & Vertechy, R. (2025). Marker-Based Safety Functionality for Human–Robot Collaboration Tasks by Means of Eye-Tracking Glasses. *Machines*, 13(2), 122.
- [16] Younas, M. A., Abdullah, A. H., Din, G. M., Faisal, M., Mudassar, M., & Yasir, A. B. (2025). Smart Manufacturing System Using LLM for Human-Robot Collaboration: Applications and Challenges. *Eur. J. Theor. Appl. Sci*, 3(1), 215-226.
- [17] Halvorsen, T. S., Tyapin, I., & Jha, A. (2025). Autonomous Textile Sorting Facility and Digital Twin Utilizing an AI-Reinforced Collaborative Robot. *Electronics*, 14(13), 2706.
- [18] Gonçalves, A., Pereira, T., Lopes, D., Cunha, F., Lopes, F., Coutinho, F., ... & Ferreira, N. M. F. (2025). Enhancing Nut-Tightening Processes in the Automotive Industry: Integration of 3D Vision Systems with Collaborative Robots. *Automation*, 6(1), 8.
- [19] Onfiani, D., Caramaschi, M., Biagiotti, L., & Pini, F. (2025). Optimizing Design and Control Methods for Using Collaborative Robots in Upper Limb Rehabilitation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.
- [20] Saka, I., Unver, S., Selim, E., Tatlicioglu, E., Zergeroglu, E., & Dogan, K. M. (2025). A Robust Observer Based End-Effector Trajectory Tracking Control of Collaborative Robotic Manipulators Actuated by Brushless DC Motors. In *AIAA SCITECH 2025 Forum* (p. 0103).
- [21] König, C., Petershans, J., Herbst, J., Rüb, M., Krummacker, D., Mittag, E., & Schotten, H. D. (2025, May). Implementation analysis of collaborative robot digital twins in physics engines. In *2025 7th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (ICHORA)* (pp. 1-9). IEEE.
- [22] Voigt, F., Naceri, A., & Haddadin, S. (2025, May). Introducing Collaborative Robots as a First Step Towards Autonomous Reprocessing of Medical Equipment. In *2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 15886-15892). IEEE.

- [23] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [24] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [25] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [26] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [27] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [28] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [29] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [30] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [31] Невлюдов, І. ІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [32] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [33] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [34] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [35] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [36] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [37] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [38] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [39] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [40] Yevsieiev, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference*, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.
- [41] Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів*, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р. - Одеса : ОНТУ, 2023. - С. 21-23.
- [42] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [43] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors. In *2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (Vol. 1, pp. 247-251). IEEE.

Analysis of the data collection process about products at different stages of production

Anatolii Yechevskyi¹, Svitlana Maksymova¹, Svetlana Sotnik¹

¹ Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
Kharkiv, av. Nauki. 14., email: svetlana.sotnik@nure.ua

Anotation: The research is dedicated to improving the quality control system in printed circuit board manufacturing by optimizing the processes of collecting production data. Based on the analysis of modern challenges in industrial digitalization, a comprehensive approach to organizing the monitoring of technological parameters is proposed. An original conceptual model has been developed, defining the logical interconnections between data sources, methods of their acquisition, processing techniques, and the ultimate goals of production control. A systematization of data collection methods has been conducted, classified by the level of automation and the types of technologies used. The paper presents practically oriented recommendations for applying monitoring tools at various stages of the production cycle – from material preparation to the final inspection of finished products. The proposed solutions consider the criteria of technological feasibility and accuracy requirements for measurements. The implementation of the proposed approach enables full traceability of production, increases the efficiency of defect detection, and creates a foundation for building adaptive quality management systems. The research results have practical value for enterprises in the electronics industry transitioning to the principles of Industry 4.0.

Key words: printed circuit board manufacturing, data collection methods, quality control, monitoring automation, traceability.

I. INTRODUCTION

In the context of modern industrial digital transformation, the collection and analysis of product data at various stages of manufacturing is becoming critically important for ensuring enterprise competitiveness [1-4]. Industry 4.0 introduces new requirements for product quality, production process efficiency, and rapid response to changing market needs.

The relevance of this research is determined by several key factors:

First, growing consumer demands for product quality and customization require detailed tracking of product characteristics at every stage of the production cycle. Traditional quality control methods based on random sampling of finished products no longer meet modern standards and fail to provide the necessary level of traceability.

Second, the implementation of the Smart Manufacturing concept requires the creation of integrated data collection and processing systems that enable real-time monitoring of production processes [5-8]. This ensures the possibility of early detection of deviations from technological standards and prompt corrective decision-making.

Third, increasing regulatory requirements for environmental safety and sustainable development compel

enterprises to document the entire product lifecycle, from raw materials to waste disposal [9]. An effective data collection system is essential for ensuring compliance with these requirements.

The purpose of this work is to develop a comprehensive approach to monitoring technological parameters based on systematizing data collection methods and their alignment with production stages.

The importance of automation lies in its ability to ensure measurement stability and repeatability, reduce human factor influence, and enable real-time integration of control into the production process. Automation is a necessary condition for implementing Smart Manufacturing and Industry 4.0 concepts, as it creates the foundation for scalability, rapid response to deviations, and complete traceability of production data [10-14].

Thus, analyzing the process of collecting product data at various manufacturing stages is not only theoretically important but also a practical necessity for enterprises seeking to maintain their competitiveness in the digital economy.

II. BASICS OF DATA COLLECTION IN MANUFACTURING

The data collection stage is crucial as it lays the foundation for the method's effectiveness: the higher the accuracy and completeness of the information, the better results can be expected [15, 16]. This study focuses on printed circuit board manufacturing, therefore the analysis of data collection methods is centered on the specifics and requirements of the PCB production technological process.

To systematize the fundamentals of data collection in manufacturing, it is appropriate to consider this process as a sequential flow of information from sources to the final result. This logic allows for clear structuring of all system components and determination of their interrelationships.

Figure 1 presents a conceptual model of data collection in manufacturing, based on the principle of logical data flow sequence.

Particular attention in the model is paid to the issue of the targeted collection of data, as a clear understanding of the ultimate goals allows for the optimization of all previous stages and avoids the collection of excessive or irrelevant information. This increases the efficiency of resource use and reduces the burden on the enterprise's information system.

Integrating feedback into the model architecture creates a dynamic system capable of self-improvement and adaptation to changing production conditions. This approach ensures continuous improvement in data quality and an increase in the accuracy of analytical conclusions, which is the basis for making informed management decisions.

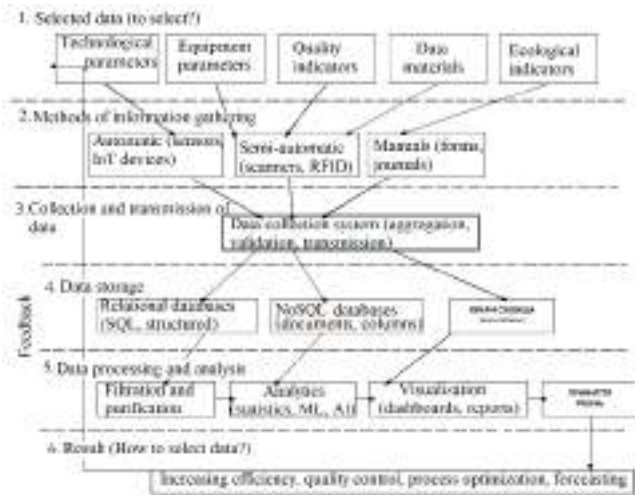


Fig. 1. Conceptual model of data collection in manufacturing

The diagram represents six main levels, each addressing a specific question about the information collection and processing process:

- «What do we collect?» – defines the types of data that serve as information sources;
- «How do we collect?» – describes the methods and technologies of collection;
- «Where do we store?» – characterizes data storage and management systems;
- «How do we process?» – details the analysis and interpretation processes;
- «Why do we collect?» – formulates the ultimate goals and results.

A key feature of this model is the feedback loop, which demonstrates how analysis results influence the optimization of data collection processes at all previous levels. This reflects the iterative nature of improving the data collection system in manufacturing.

The presence of feedback in the model enables rapid adjustment of the technological process when deviations are detected, increasing the overall responsiveness of the quality control system.

III. DATA COLLECTION METHODS FOR PRODUCTS AT DIFFERENT MANUFACTURING STAGES

According to the proposed conceptual model (Fig. 1), the "How do we collect?" level is central to the practical implementation of the monitoring system. In the context of printed circuit board (PCB) manufacturing, data collection methods are classified according to two main criteria: the degree of automation and the technology used. The generalized classification of data collection methods in PCB manufacturing is presented in Table 1.

The accuracy level of data collection methods varies depending on the technology and degree of automation.

The highest accuracy is provided by automated optical inspection (AOI) systems, capable of detecting defects as small as 1 micron, which is critically important for controlling conductor topology on modern printed circuit boards.

Table 1. GENERALIZED CLASSIFICATION OF DATA COLLECTION METHODS IN PRINTED CIRCUIT BOARD MANUFACTURING

Classification criterion	Category	Description of the method	Technologies and tools
Degree of automation	Automatic	Data collection without operator involvement	Automatic optical control systems (AOCS), IoT sensors
	Semi-automatic	The combination of automation and operator involvement	Digital measuring instruments, scanners
	Manual	Full operator control	Loupes, micrometers, visual inspection
Collection technology	Optical	Visual analysis of images	Cameras, specialized software
	Touch	Physical measurement of parameters	Temperature, pressure, humidity sensors
	Radio frequency	Contactless identification	RFID, NFC tags
	Electric	Measurement of electrical parameters	Multimeters, oscilloscopes

Electrical measurement methods are also characterized by high accuracy ($\pm 0,01-0,1\%$), enabling reliable monitoring of insulation resistance parameters and circuit integrity.

Sensor technologies provide measurement accuracy of physical parameters at the level of $\pm 0,1-1,0\%$, which is sufficient for monitoring soldering temperature regimes and parameters of layered package pressing.

Semi-automatic methods typically have a medium accuracy level ($\pm 0,01-0,1\text{ mm}$), which is determined by the influence of the human factor during measurements.

Manual control methods have the lowest accuracy, where the error can reach $\pm 0,1-1,0\text{ mm}$, limiting their application to operations that do not require high precision. However, they remain indispensable for quick visual inspection and control of dimensional parameters.

Analysis of Table 1 allows us to formulate key conclusions:

1. The most effective results are achieved by combining methods of different technologies and automation levels, which compensates for the limitations of individual approaches.

2. The choice of specific method depends on several factors, with the key ones being: production stage, type of controlled parameters, accuracy and speed requirements, as well as economic feasibility.

3. The current trend is directed toward integrating different data collection technologies into a unified quality information system, ensuring complete product traceability and improving production management efficiency.

Thus, the classification creates a basis for justified selection of monitoring methods according to the specifics

of the printed circuit board manufacturing technological process.

The application of automatic methods, such as AOCS, enables real-time defect detection directly on the production line, significantly increasing efficiency compared to selective manual control.

IV. RECOMMENDATIONS FOR APPLICATION OF DATA COLLECTION METHODS AT DIFFERENT STAGES OF PCB MANUFACTURING

Effective quality management in printed circuit board manufacturing requires a strategic approach to selecting data collection methods. Based on the analysis of the technological features of different stages of the production process, practical recommendations for the application of monitoring methods have been developed.

Table 2. RECOMMENDATIONS FOR APPLICATION OF DATA COLLECTION METHODS AT DIFFERENT STAGES OF PCB MANUFACTURING

Stage of printed circuit board production	Recommended methods	Justification	Controlled parameters
Preparation of materials	RFID/semi-automatic	It is economically feasible for tracing batches of materials	Quality of foil, dielectric, certification
Formation of layered packages	Touch (automatic)	The criticality of temperature-pressure regimes	Temperature, pressure, lamination time
Drilling	Optical (automatic AOI)	The need for rapid monitoring of a large number of openings	Diameter, location, quality of holes
Metallization	Electrical (automatic)	Objectivity of the control of electrophysical parameters	Resistance, coating thickness, contact quality
Photolithography	Optical (automatic AOCS) + semi-automatic	High precision in controlling the geometry of conductors	Width of lines, presence of breaks/short circuits
Soldering components	Optical (AOCS) + sensor (thermographic)	Comprehensive quality control of connections and modes	Soldering quality, temperature profiles
Final control	Combined (automatic + manual)	Comprehensive assessment before shipment	Functionality, appearance, compliance with technical specifications

Method selection criteria:

1. Parameter criticality – automatic methods are used for key characteristics.

2. Production volume – mass production requires automation.

3. Economic feasibility – implementation costs must be justified.

4. Required accuracy – critical tolerances require high-precision methods.

5. Control speed – compliance with production line pace.

The optimal strategy is combining methods of different automation levels, which enables creating an effective multi-level quality control system.

V. CONCLUSIONS

The conducted research proves the critical importance of a systematic approach to organizing data collection in printed circuit board manufacturing.

As a result of the research, a comprehensive approach to monitoring organization has been proposed, which includes a conceptual model, method classification, and practical recommendations for their application.

The developed conceptual data collection model, based on the principle of sequential information flow, provides a comprehensive understanding of the interrelationships between data types, their collection methods, processing technologies, and monitoring objectives. The inclusion of feedback in the model reflects the iterative nature of quality control system improvement.

The systematization of data collection methods by automation level and technology used confirmed the necessity of a differentiated approach to selecting monitoring tools. The classification demonstrates that the most effective results are achieved by combining automatic, semi-automatic, and manual methods while considering the specifics of technological operations.

The practical recommendations for applying data collection methods at different stages of PCB manufacturing take into account the technological specifics of each stage and economic feasibility criteria. The proposed approach enables optimization of quality control costs while ensuring high monitoring accuracy and efficiency.

Implementation of an integrated data collection system based on the proposed solutions ensures complete product traceability, enhances production management efficiency, and creates a foundation for transitioning to Industry 4.0 principles.

Future research prospects lie in developing defect prediction algorithms based on monitoring data and creating adaptive quality management systems using artificial intelligence.

LIST OF REFERENCES

- [1] A. Tverdokhlib, et al., "Intelligent tools for optimizing information and search engines," *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 28-31
- [2] S. Sotnik, M. Rudenko, "Evaluating relational database scaling strategies in web engineering," *International Conference on Advanced Trends In Radioelectronics and Infocommunications (ATRICE-2025) (May 21–22, 2025)*,

- Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, Ukraine, 2025, pp. 224-228
- [3] P. Y. Sukhno, et al., "Analysis of modern telecommunications: data transmission via GSM channel," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 562-565
- [4] С. Сотник, "Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів," *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2025, 1 (68), pp. 52-58
- [5] K. A. Polikanov, et al., "Overview of modern technologies for residential automation," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 85-89
- [6] R. V. Marunich, et al., "Features of IoT application in the security sector," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 80-84
- [7] R. V. Marunich, et al., "Modern IoT technologies for creating automated access systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 38-39
- [8] Y. I. Khalimonov, et al., "Integration of IoT into security systems: opportunities and risks," *Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 20 листоп. 2024 р.*, 2024, pp. 117-121
- [9] Y. I. Khalimonov, et al., "Circular economy in automated systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 53-54
- [10] Y. Vasylychenko, et al., "Development of Security and Fire Alarm Integrated Automation System at Enterprise," *WSEAS Transactions on Systems*, 2025, 24, pp. 642-664
- [11] A. Konieva, et al., "Main trends in the development of automated image processing systems," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 68-72
- [12] O. R. Kolbasa, et al., "The significance and necessity of automating the selection of sensors and actuators," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 63-67
- [13] Ф. В. Кирпота, та інші., "Визначення функціональних вимог в автоматизованій теплоізоляції," *International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics and Telecommunications dedicated to the 85th anniversary of the Department of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurements*, 2024, pp. 182-185
- [14] A. Lvov, et al., "Analysis of electronic locks existing systems," *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 24-27
- [15] V. G. Kaponkin, et al., "The role of big data in improving functionality of search engines," *The 8th International scientific and practical conference "European congress of scientific achievements" (August 12-14, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain*, 2024, pp. 69-76
- [16] Y. I. Khalimonov, et al., "Overview of computer vision areas application for inspection and quality control," *Матеріали конференції KIT-2024, Харків, ХНАДУ, 20.11.2024*, 2024, pp. 117-121

Classification of CRM Systems

Maksym Rudenko¹, Svetlana Sotnik¹

1. Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
Kharkiv, av. Nauki. 14., email: maksym.rudenko@nure.ua

Anotation: The research is devoted to the current problem of systematizing Customer Relationship Management (CRM) systems in the context of intensive business digitalization and growing competition in the software solutions market. The study reveals the conceptual foundations of CRM as a dual-domain concept that combines a strategic approach to managing customer relationships and a technological platform for its implementation. The work analyzes the five-stage evolution of CRM systems from pre-electronic card files to modern intelligent platforms with integrated artificial intelligence and machine learning. Particular attention is paid to the transformation from isolated automation tools to comprehensive solutions for orchestrating the customer experience. A classification system for CRM solutions based on four key criteria is proposed. A comparative analysis of leading CRM platforms, including HubSpot, Zoho CRM, Pipedrive, Salesforce, and Microsoft Dynamics 365, has been conducted based on parameters of functionality, ease of use, integration capabilities, and scalability. The work is of practical importance for managers, IT professionals, and consultants involved in the selection and implementation of CRM solutions in modern organizations. The research results can be used to develop a methodology for evaluating and comparing CRM systems according to the specific needs of a business.

Key words: CRM systems, business process automation, software solutions classification, customer relationship management, digital transformation.

I. INTRODUCTION

Under conditions of digital business transformation, the automation of operational processes has become a key trend for increasing competitiveness [1-10]. This is especially true for the field of Customer Relationship Management (CRM), where modern systems have evolved from simple electronic archives to intelligent platforms capable of automating a significant part of routine tasks: from managing correspondence and reminders to complex sales pipelines and personalized marketing.

However, the market offers a wide variety of CRM solutions that implement automation principles differently. This differentiation is manifested in the depth and complexity of business process automation: from elementary reminders to complex workflow scenarios covering cross-functional sales cycles, marketing campaigns, and customer service.

At the same time, the growing importance of protecting customer personal data and complying with international privacy standards [11-16] creates additional requirements for the architecture and functionality of CRM systems.

The CRM systems market in Ukraine demonstrates stable growth, driven by increased competition, business digitalization, and the need to enhance sales efficiency during wartime.

The global CRM systems market is characterized by high maturity, intense competition, and clear differentiation among leading players. Its formation occurred significantly earlier than in Ukraine, which allowed distinct strategic development directions to emerge.

The mentioned differences in market maturity levels, as well as differences in the architecture, functionality, and target audience of the CRM solutions themselves, necessitate a clear classification.

The purpose of this study is to systematize CRM systems based on the analysis of key parameters, which is a decisive factor in choosing a solution for a modern business.

II. CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF CRM SYSTEMS RESEARCH

The term CRM should be understood as a dual-domain concept:

- a strategic business approach aimed at building long-term and mutually beneficial relationships with customers by studying their needs and maximizing loyalty;
- an information technology system that is software for automating this strategic approach.

As a technological platform, a CRM system integrates three key functional modules:

- sales Force Automation – management of leads, deals, contacts, sales forecasting;
- marketing Automation – campaign management, email marketing, customer base segmentation;
- service Automation – ticket management, call center, knowledge base.

The functional complexity of modern CRM systems is the result of long-term development. The modern diversity of CRM solutions is a consequence of their evolution.

The evolution of CRM systems can be visually represented in Fig. 1.



Fig. 1. Stages of CRM Systems Evolution

Stage 1. Pre-electrical – card files and salesperson's diaries. Lack of centralized information.

Features of stage 1:

- lack of centralization;
- manual record keeping;
- information loss;
- inefficiency.

Stage 2. Emergence of the first digital contact managers (1980s-1990s). Automation of contact list management, but without process control.

Features of stage 2:

- first personal computers and databases;
- simple contact search;

- Automated Contact Tracking – one of the first popular contact management programs, created in 1986; GoldMine – another early CRM system launched in 1989;

- no process management.

Stage 3. Development of Operational CRM (late 1990s – 2000s). Streamlining routine operations, formation of sales pipelines. It was at this stage that the division into On-Premise and SaaS solutions occurred.

Features of stage 3:

- deal management;

- sales automation;

- On-Premise/SaaS division;

- Siebel – one of the first major corporate CRM systems, created by Tom Siebel in 1993. It was a market leader until the mid-2000s, particularly popular among large corporations. Later acquired by Oracle;

- Salesforce (beginning) – cloud CRM platform launched by Marc Benioff in 1999. Revolutionized the market by becoming the first successful SaaS (Software as a Service) CRM system. At that time, this was the «beginning» of the Salesforce era, which later became a world leader.

Stage 4. Emergence of Analytical and Collaborative CRM (2010s). Shift of focus from operations automation to data analytics and customer experience orchestration. This led to differentiation by functional orientation.

Features of stage 4:

- social media integration;

- mobile applications;

- business analytics;

- Customer Journey – the sequence of all customer interactions with the company from first brand acquaintance to purchase and beyond.

Stage 5. Modern – intelligent Cloud and AI-based CRM (2020s). Integration of artificial intelligence, machine learning, and omnichannel capabilities. This stage solidified the dominance of cloud architecture and fostered further solution specialization (verticalization).

Features of stage 5:

- AI/ML integration;

- Predictive Analytics;

- Chatbots, Voice AI;

- Omnichannel solutions.

Thus, the analysis of the evolution of CRM systems demonstrates a clear trend of transformation from isolated tools for automating individual operations to integrated, intelligent platforms for managing customer relationships. This development has directly shaped the key aspects of their differentiation, which constitutes the object of classification in this study.

III. CLASSIFICATION CRITERIA FOR CRM SYSTEMS

The need to systematize the diversity of CRM solutions necessitates the definition of key classification criteria. Based on market analysis, the following system of parameters for differentiating CRM systems is proposed (Fig. 2).



Fig. 2. The main criteria for classifying CRM systems

Let's examine each category of criteria in more detail.

1. By deployment method (architecture):

- On-Premise (local installation) – software installed on the company's own servers. Provides full control over data and confidentiality but requires significant capital investment and dedicated IT resources for maintenance. (e.g., Microsoft Dynamics 365 (on-premise versions) or some ERP systems with a CRM module);

- Cloud or SaaS (cloud solutions) – solutions hosted on the provider's servers and accessible via a web browser. Characterized by rapid implementation, low startup costs, and automatic updates. (e.g., Salesforce, HubSpot);

- Hybrid (hybrid solutions) – combine elements of both approaches, where some data or functions are in the cloud, while critically important information remains on local servers.

2. By functional orientation and target audience:

- operational CRM – focuses on automating front-office customer interactions: sales (Sales Automation), marketing (Marketing Automation), and service (Service Automation). The most common type;

- analytical CRM – aimed at analyzing data collected by operational CRM systems to identify trends, customer segmentation, and support management decision-making;

- collaborative CRM – integrates various communication channels (email, social media, phone) to provide a unified view of customer information across all company departments.

3. By scalability and pricing policy:

- small – startups, up to 10 users;

- medium CRM – 10-500 users;

- large CRM – corporations, 500+ users.

4. By specialization (vertical):

- Retail CRM – specialized solutions for managing relationships with end consumers, featuring loyalty programs, inventory management, integration with POS systems, and omnichannel retail. (e.g., Lightspeed CRM, Vend);

- B2B segment (Business-to-Business CRM) – solutions for managing long sales cycles, complex deals, relationships with corporate clients, and partner programs. Include features for tender management, contract management, and multi-level approval processes. (e.g., Salesforce Professional, Microsoft Dynamics 365 Sales);

- Service companies (Service CRM) – systems for service companies with a focus on ticket management, resource planning, work time tracking, and service quality control. (e.g., ServiceNow, Zendesk).

IV. COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN CRM SOLUTIONS

For an objective analysis of modern CRM solutions, it is appropriate to consider them according to key criteria:

functionality, ease of use, integration capabilities, and scalability.

This approach allows for comparing systems with each other and determining their suitability for the needs of businesses of different sizes and industries. Below is a summarized matrix reflecting the strengths and weaknesses of the most common CRM platforms.

A comparative analysis of modern CRM solutions is presented in Table 1.

Table 1. COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN CRM SOLUTIONS

CRM	Functionality	Ease of use	Integration opportunities	Scalability
1	2	3	4	5
HubSpot (Free / Starter)	Basic CRM + marketing/sales in a single environment; strong in inbound engagement	Very simple to start; intuitive UI	A large ecosystem (marketing, mail, third-party integrations)	Good for small/medium businesses; the cost increases with large needs.
Zoho CRM	Wide functionality: sales, automation, analytics, AI features.	Moderately simple, requires adjustment	Many built-in integrations; API for customization	Good for small and medium enterprises; suitable for scaling.
Pipedrive	Focus on the sales process (pipeline), simple automation features	Very simple and visual (kanban-pipeline)	Integrations through market place and API	Suitable for small/medium, complex corporate scenarios – limited.
Salesforce (Professional)	Full CRM stack for sales and service; strong analytics	Powerful, but more complex to implement	Wide AppExchange, rich APIs	Well scalable for growth; requires implementation
Salesforce (Enterprise)	Maximum flexibility, customization, automation, multi-segments.	It's more complicated, administrators/consultants are needed.	Practically any integration, middleware.	Under large corporations, global processes.

Continuation of table 1

1	2	3	4	5
Microsoft Dynamics 365	Integration with the MS ecosystem (Office, Teams), powerful CRM/ERP features.	Depends on the configuration; familiar MS-UI.	Deep integration with Microsoft products; rich APIs.	Suitable for medium/large corporations and global teams.

Analysis of the matrix shows that modern CRM solutions differ significantly in functionality, ease of use, integration capabilities, and scalability.

For small businesses, HubSpot Free/Starter, Zoho CRM, and Pipedrive appear most appropriate, as they have a low entry barrier, simple interface, and sufficient set of basic functions. HubSpot is particularly effective for companies focusing on inbound marketing, while Pipedrive is best suited for sales process management.

For medium-sized businesses, Zoho CRM and Salesforce Professional are optimal, as they provide greater customization, analytics, and automation capabilities. Zoho remains a more budget-friendly and flexible option, while Salesforce Professional offers more powerful functionality but requires implementation resources.

For large corporations, Salesforce Enterprise and Microsoft Dynamics 365 are best suited, as they offer maximum scalability, customization options, and integration with other corporate systems. However, these solutions require significant investment and professional administration.

Overall, the choice of a CRM system should be based not only on functional characteristics but also on the specifics of the company's business processes, implementation resources, and strategic development goals.

V. CONCLUSIONS

Based on the conducted research, several important conclusions can be drawn regarding the systematization of CRM systems and their role in the modern business environment.

The evolution of CRM systems demonstrates a clear transformation from simple contact management tools to complex intelligent platforms integrating artificial intelligence and machine learning. This development reflects the growing needs of businesses for automation and optimization of customer relationships, especially in the context of the digital transformation of the economy.

The developed classification system for CRM solutions based on four key criteria provides a comprehensive approach to analyzing market offerings. Architectural deployment, functional orientation, scalability, and industry specialization form the basis for an objective comparison of systems and determining their suitability for specific business needs.

A comparative analysis of leading CRM platforms confirms the absence of a universal solution suitable for all types of organizations. Each system has its advantages in

certain market segments: HubSpot and Pipedrive are optimal for small businesses due to their ease of use; Zoho CRM and Salesforce Professional meet the needs of medium-sized businesses; while Salesforce Enterprise and Microsoft Dynamics 365 best meet the requirements of large corporations.

The research results show that successful selection of a CRM system requires a comprehensive approach that considers not only functional characteristics but also the specifics of the company's business processes, available implementation resources, and long-term strategic goals. This is particularly relevant in the context of the Ukrainian market, where the growing demand for CRM solutions is driven by the need to increase competitiveness and efficiency of business operations.

The further development of CRM systems will be aimed at deepening integration with artificial intelligence technologies, expanding predictive analytics capabilities, and creating a more personalized customer experience. This creates new opportunities for businesses but also requires careful planning of digitalization strategy and investments in appropriate technological solutions.

LIST OF REFERENCES

- [1] K. A. Polikanov, et al., "Overview of modern technologies for residential automation," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 85-89
- [2] Y. Vasylenko, et al., "Development of Security and Fire Alarm Integrated Automation System at Enterprise," *WSEAS Transactions on Systems*, 2025, 24, pp. 642-664
- [3] S. V. Sotnik, "Development of automated control system for continuous casting," *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024, № 2(69), pp. 181-189
- [4] Y. V. Shrubkovskyi, et al., "Development of a structural scheme for automatic dosing of liquid components," *Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: збірник наукових праць з матеріалами V Міжнародної наукової конференції, м. Кропивницький, 6 червня, 2025 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп*, 2025, pp. 242-246
- [5] M. M. Danylenko, et al., "Comparative analysis of modern SCADA packages for production automation," *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2025, Vol. 9(2), pp. 26-34
- [6] M. S. Achkan, et al., "Integration of cloud technologies into modern SCADA systems: prospects and challenges," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 26-29
- [7] S. V. Sotnik, "Study of Shrinkage of Thermoplastics in Injection Molding," *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, 2025, Vol. 21, Iss. 24, pp. 13-17
- [8] R. V. Marunich, et al., "Modern IoT technologies for creating automated access systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of 1 st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 38-39
- [9] Y. I. Khalimonov, et al., "Circular economy in automated systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of 1 st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 53-54
- [10] Y. Khalimonov, et al., "Approaches to ensuring proper working conditions using sensor technologies IoT," *International Conference «DIGITAL INNOVATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT 2024»*, 2024, pp. 24-25
- [11] R. V. Marunich, et al., "Features of IoT application in the security sector," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 80-84
- [12] A. Tverdokhlil, et al., "Intelligent tools for optimizing information and search engines," *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 28-31
- [13] S. Sotnik, M. Rudenko, "Evaluating relational database scaling strategies in web engineering," *International Conference on Advanced Trends In Radioelectronics and Infocommunications (ATRIC-2025) (May 21–22, 2025)*, Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, Ukraine, 2025, pp. 224-228
- [14] P. Y. Sukhno, et al., "Analysis of modern telecommunications: data transmission via GSM channel," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 562-565
- [15] С. Сотник, "Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів," *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2025, 1 (68), pp. 52-58
- [16] Y. I. Khalimonov, et al., "Integration of IoT into security systems: opportunities and risks," *Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 20 листоп. 2024 р.*, 2024, pp. 117-121

Optimization of drone trajectory algorithms

Diana Sukhomlinova¹, Svetlana Sotnik¹

¹ Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
Kharkiv, av. Nauki. 14., email: diana.sukhomlinova@nure.ua

Anotation: The research is devoted to the analysis and development of methods for optimizing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) trajectories to enhance their autonomy and efficiency in various operating conditions. The work systematizes three main groups of route planning algorithms: classical methods (A, *Dijkstra*, *RRT/RRT*), evolutionary approaches (genetic algorithms, particle swarm optimization), and machine learning technologies (deep reinforcement learning). Key trajectory quality criteria are defined - energy efficiency, navigation safety, and flight time minimization. The algorithms were experimentally tested in simulated urban and rural environments with varying obstacle densities. The advantages of different methods were established depending on the specifics of the environment and the nature of the mission. The results demonstrate the importance of individually selecting algorithmic solutions according to the application conditions and can be used in the development of autonomous control systems for drones in logistics, agricultural production, monitoring, and rescue operations.

Key words: trajectory optimization, path planning, navigation algorithms, energy efficiency, obstacle avoidance.

I. INTRODUCTION

In the modern world, robotics and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), or drones, have transcended their status as elements of science fiction films to become powerful drivers of technological progress across a wide range of fields – from military affairs and logistics to environmental monitoring and agricultural production [1-8].

However, the effectiveness of drone applications is directly dependent on their autonomy, maneuverability, and energy efficiency, with the optimality of their flight trajectory being a key factor [9-11]. This is precisely why the optimization of drone trajectory planning algorithms is an extremely relevant scientific and practical task today. The complexity of this task lies in the necessity of simultaneously accounting for multiple factors, such as energy consumption, flight time, navigation safety, weather conditions, and dynamic obstacles.

Traditional route planning methods often prove insufficiently effective, as they are unable to adapt to changing environmental conditions, leading to inefficient resource utilization.

Thus, the relevance of this research lies in the need to develop new adaptive trajectory optimization algorithms capable of ensuring flight safety and efficiency in real-time, while accounting for dynamically changing conditions and the specific requirements of a particular mission.

Achieving a high level of automation in the planning process is particularly important, as it will minimize operator involvement and enable fully autonomous drone operation in complex and unpredictable conditions [12, 13].

II. ANALYSIS OF TRAJECTORY OPTIMIZATION METHODS

Planning an optimal trajectory for unmanned aerial vehicles is a complex task that requires considering numerous factors, such as the geometry of the space, dynamic obstacles, the physical constraints of the drone, and optimality criteria (time, energy, safety).

Existing optimization methods can be broadly classified into several main groups: classical path planning algorithms, evolutionary and metaheuristic algorithms, as well as machine learning methods.

1. Classical Path Planning Algorithms.

This group of methods forms the basis for path planning in discretized space (e.g., on a grid) and is known for its reliability and guaranteed results.

Classical path planning algorithms include:

- the A algorithm* remains one of the most popular methods for finding an optimal path in a static environment. Its key advantage is the use of a heuristic function, which allows it to direct the search more efficiently towards promising areas compared to Dijkstra's algorithm. This ensures finding the shortest path with relatively high speed and a guarantee of optimality. However, the main disadvantages of A* are its low efficiency in large-scale environments due to high computational complexity, its inability to work effectively with dynamic obstacles, and its disregard for the physical constraints of the drone (e.g., minimum turning radius), which can lead to the generation of trajectories unsuitable for real flight;

- Dijkstra's algorithm is a fundamental algorithm for finding the shortest paths in graphs with non-negative edge weights. It guarantees finding an optimal route but, unlike A*, it searches in all directions simultaneously, making it less efficient for large search spaces where the use of heuristics is critical. Sampling-based algorithms, such as RRT (Rapidly-exploring Random Tree) and its improved version RRT*, demonstrate high efficiency in planning paths in complex, high-dimensional configuration spaces. Instead of analyzing the entire space, these algorithms randomly sample and build a tree of possible paths, allowing them to quickly find a feasible, and subsequently optimal, path even amidst numerous complex obstacles. Their main advantage is the ability to account for the physical constraints of the drone.

A potential drawback can be the lack of a guarantee of global optimality and the non-deterministic nature of the results.

RRT* guarantees asymptotic optimality (given unlimited runtime).

2. Evolutionary Algorithms.

These methods are a powerful tool for solving complex multi-criteria optimization problems where classical methods are ineffective:

- genetic Algorithms (GAs) demonstrate high effectiveness in finding trajectories that simultaneously consider multiple quality criteria, such as minimizing energy consumption, flight time, and maximizing distance from obstacles. By working with a population of potential solutions (trajectories), GAs simulate natural selection using crossover, mutation, and selection operations. This allows them to explore a wide solution space and find compromise (Pareto-optimal) options. A disadvantage is their high computational cost and the potential to get stuck in local optima. They are particularly useful for NP-hard problems;

- particle Swarm Optimization (PSO) mimics the collective behavior of a flock of birds or a school of fish. Each «particle» in the swarm represents a candidate solution (a trajectory) and moves through the search space by following its own best experience and the best experience of the entire swarm. PSO is particularly effective for dynamic planning and rapid adaptation to environmental changes, as the swarm can quickly reorient itself when new obstacles appear.

3. Machine Learning Methods.

This approach opens new horizons for creating fully autonomous and adaptive trajectory planning systems.

Deep Reinforcement Learning (DRL) is the most promising direction. An agent (the drone) learns to choose optimal actions (maneuvers) through interaction with the environment based on a reward system (for example, a positive reward for avoiding an obstacle, a negative one for energy consumed). Deep neural networks serve as function approximators, allowing the agent to generalize its experience and make decisions in real-time in situations that were not explicitly programmed.

The main advantage of DRL is its ability to learn from both simulated and real-world data and adapt to completely new, unpredictable conditions, making it an ideal candidate for the full-scale deployment of autonomous drones in the real world. The primary challenge remains the lengthy and resource-intensive training process and ensuring safety during this phase.

Thus, the choice of trajectory optimization method depends on the specific problem conditions: classical algorithms are effective for static environments, evolutionary algorithms are for multi-criteria optimization, and machine learning methods are for creating highly adaptive systems capable of operating in dynamic and uncertain conditions.

To systematize information on the application of various drone trajectory optimization algorithms, a comprehensive comparative matrix (Table 1) has been developed.

This matrix enables an informed choice of optimization method based on eight key characteristics: type of operational environment, obstacle density, scale of the operational area, computational resource requirements, criticality of time constraints, need for a multi-criteria approach, main advantages, and fundamental limitations of each algorithm.

The matrix covers both traditional deterministic methods (A, RRT/RRT) and modern adaptive approaches (genetic algorithms, PSO, DRL), as well as promising hybrid solutions that combine the advantages of different approaches to achieve an optimal balance between the speed, accuracy, and adaptability of trajectory planning.

Table 1. GENERALIZED CLASSIFICATION OF DATA COLLECTION METHODS IN PRINTED CIRCUIT BOARD MANUFACTURING

Algorithm	Type of environment	Obstacle density	Scale of the zone	Computational resources	The criticality of time
A*	Static, quasistatic	Medium – high (30 – 80%)	Small-medium (<10 km ²)	Medium–high	High (especially under strict time constraints)
RRT / RRT*	Static with complex geometry	High (>60 %)	Small – medium (<10 km ²)	Average	Mode rate
Dijkstra	Static	Any	Small (<1 km ²)	High	Low
Genetic algorithms (GA)	Static, slowly changing	Low – medium (<60 %)	Medium – large (>1 km ²)	Medium–high	Low
PSO	Dynamic, quasi-static	Low – medium (<60 %)	Medium (1–10 km ²)	Average	Mode rate – high
DRL	Dynamic, unpredictable	Any	Small – medium (practically); any (theoretically)	High (training), medium (performance)	Low during learning, high during execution

Thus, a universal algorithm does not exist: each method has its own niche of application. Classical algorithms are suitable for simple and static tasks, evolutionary ones are for open spaces that require global optimization, while adaptive ML approaches are best suited for highly dynamic environments. A promising area of development is the creation of hybrid systems capable of combining different algorithmic strategies depending on the mission context.

III. OPTIMIZATION CRITERIA FOR DRONE TRAJECTORIES

The selection of optimization criteria is a crucial stage in planning unmanned aerial vehicle trajectories, as they directly determine the quality and practicality of the resulting solution.

Different drone missions require different priorities, leading to the necessity of a multi-criteria approach.

A scheme has been proposed (Fig. 1) that illustrates the three most important criteria that determine the effectiveness of drone trajectory planning in modern applications.

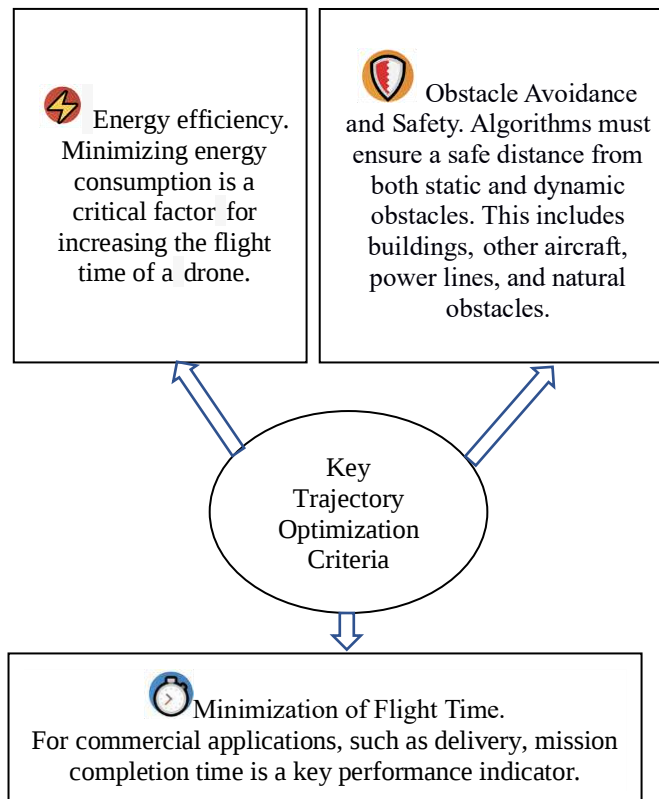


Fig. 1. The main criteria for trajectory optimization

Energy efficiency ensures maximum autonomous operation time, safety criteria guarantee the avoidance of emergency situations, and minimizing flight time increases operational efficiency. A comprehensive consideration of these interrelated factors allows for an optimal balance between performance, safety, and cost-effectiveness in the use of drones across various applications.

Studies show that a properly optimized trajectory can increase flight time by 15-25 %. In practice, it is rare to use only one criterion. Most often, multi-criteria optimization is applied, which requires:

- determining the relative importance of each criterion for a specific mission;
- using Pareto optimization methods to find compromise solutions;
- applying weighting coefficients or lexicographic ordering of criteria.

IV. EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF DRONE TRAJECTORY OPTIMIZATION ALGORITHMS

To conduct a comprehensive assessment and comparison of the effectiveness of various trajectory optimization algorithms, a series of experiments were carried out in simulated urban and rural environments. The testing included scenarios with different obstruction densities, weather conditions, and mission types, allowing for an objective view of the advantages and disadvantages of each approach.

The experimental platform – a remote drone control and monitoring system in simulation – was built on a client-server model using native web technologies and a proprietary physics engine. For each algorithm, 100 test runs were conducted with different initial conditions, ensuring the statistical reliability of the results.

An urban environment was used as the starting point.

In densely built-up urban areas with a high concentration of obstacles (buildings 15-50 m tall, obstacle density covering 65-80 % of the area), the best results were shown by hybrid algorithms that combine A* for global planning with machine learning methods for local optimization.

The analysis revealed that the advantage of the hybrid approach lies in the ability of A* to quickly find a general route between buildings, while the DRL component optimizes local maneuvers within «urban canyons». This led to a reduction in the number of sharp turns.

Hybrid algorithms proved particularly effective in navigating areas with irregular construction, where traditional methods often generated suboptimal zigzag trajectories.

The rural environment was then chosen for further research.

In open rural areas with low obstacle density (predominantly natural objects: trees, hills, power lines), genetic algorithms demonstrated better efficiency due to their ability to optimize long straight-line segments of the trajectory. The improvement in energy efficiency reached 22 %.

A key advantage of genetic algorithms in rural terrain was their capacity for global optimization while accounting for the terrain's elevation profile and wind conditions.

V. CONCLUSIONS

The conducted research confirmed that the task of optimizing unmanned aerial vehicle trajectories is multi-criteria and has no universal solution. The effectiveness of the applied algorithms significantly depends on the characteristics of the flight environment and the requirements of a specific mission.

The main research results are:

1. In complex urban environments with high density of dynamic obstacles, hybrid approaches combining deterministic methods (particularly A*) for global route planning and adaptive machine learning methods (e.g., DRL) for real-time local trajectory correction proved to be the most effective. This combination ensures both the overall optimality of the route and the ability to react quickly to unforeseen changes in the environment.

2. For open spaces, energy efficiency is the priority criterion. In rural areas dominated by static obstacles, evolutionary methods, particularly genetic algorithms, demonstrated the ability to form globally optimal routes considering terrain topography and wind conditions, which contributes to extending drones' autonomous operation time.

3. Trajectory optimization is inherently multi-criteria. A compromise between flight duration, energy consumption levels, and safety indicators is always necessary.

Methods capable of generating a set of Pareto-optimal solutions hold higher practical value, as they allow the operator to select a trajectory based on the current mission priorities.

Prospects for further research:

- development of adaptive hybrid architectures capable of switching planning strategies depending on the dynamics of external conditions (e.g., when transitioning from open space to dense urban environments);

- deeper integration of machine learning methods with physical models, particularly the use of transfer learning and online learning with limited data to enhance operational reliability in real-world conditions;

- optimization of group missions, involving cooperative trajectory planning in swarm architectures, inter-agent collision avoidance, and minimization of costs for the entire system;

- enhancing the computational efficiency of complex algorithms for implementation on resource-constrained onboard computers through model quantization, the use of hardware accelerators, and distributed computing between the drone and a ground station.

The practical significance of the work lies in defining the criteria for selecting and evaluating trajectory planning algorithms, which is useful for developers of drone autonomous control systems. The obtained results can be used to enhance the efficiency, safety, and autonomy of unmanned aerial vehicles in the fields of logistics, critical infrastructure monitoring, precision agriculture, and search-and-rescue operations.

LIST OF REFERENCES

- [1] S. V. Sotnik, I. S. Zarubin, "Modeling design of mobile robotic platform," *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*. 2024, pp. 481-482.
- [2] І. С. Зарубін, та інші., "Ефективність використання роботизованих систем у виробництві," *Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2024: матеріали I-ої Всеукраїнської конференції, Харків, 16-17 травня 2024 (CITAR-2024)*. 2024, pp. 150-153
- [3] S. V. Sotnik, "Modeling design of mobile robotic platform," *XXIV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів*. 2024, pp. 481-482
- [4] M. S. Bielik, et al., "Analysis of the structures of mobile platforms for promoter robots," *The 5th International scientific and practical conference "Global trends in science and education"* (June 2-4, 2025) SPC "Sci-conf.com.ua", Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 319-325
- [5] A. S. Andreiev, et al., "Analysis of robotics platforms for educational and research purposes," *Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2024 / Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 26-27 вересня 2024 р.*, 2024, pp. 25-27
- [6] I. Zarubin, et al., "Basic principles of building aerial robots," *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 32-36
- [7] D. A. Sukhomlinova, S.V. Sotnik, "Aerial robot in urban environments," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Thesises of Reports*, 2025. pp. 45-46
- [8] Z. V. Lashyn, et al., "Automation capabilities of equipment with built-in robot for manufacture of microelectronics products," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 283-286
- [9] Y. M. Al-Sharo, et al., "Generalized procedure for determining the collision-free trajectory for a robotic arm," *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 2023, 30(2), pp. 142-151
- [10] S. Sotnik, "Analysis of Existing Influences in Formation of Mobile Robots Trajectory," *International Journal of Academic Information Systems Research*, 2022, 6(1), pp. 13-20
- [11] A. D. Yechevskyi, et al., "Research of orientation methods of autonomous mobile robots in industrial conditions," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 115-119
- [12] S. Sotnik, S. K. Mustafa, M. A. Ahmad, V. Lyashenko, O. Zeleniy, "Some features of route planning as the basis in a mobile robot," *WARSE*, 8(5), 2020, pp. 2074-2079
- [13] T. A. Lykho, et al., "Pattern recognition and computer vision technologies in decision support systems of robotic systems," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 645-648

Review and selection of optimal sensors for building a production facility microclimate monitoring system

Alina Fesenko¹, Svetlana Sotnik¹

¹ Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, Kharkiv, av. Nauki. 14., email: alina.fesenko@nure.ua

Anotation: The study examines modern sensors for monitoring the microclimate of industrial premises, such as temperature, humidity, pressure, CO₂ concentration, dust, noise, and light sensors. A review of their characteristics and selection criteria, such as accuracy, cost, reliability, power consumption, and ease of integration, was conducted. The selection of specific sensors for the indoor (BME280 + MH-Z19D) and outdoor (BMP290L + SHT40) modules is justified. The obtained results demonstrate an optimal balance between functionality, accuracy, and cost-effectiveness for building a microclimate monitoring system.

Key words: microclimate monitoring, sensors, temperature, humidity, pressure.

I. INTRODUCTION

Microclimate monitoring is a key task for ensuring the safety and comfort of production processes [1-3]. Controlling parameters such as temperature, humidity, pressure, gas concentration, dust levels, noise levels, and illumination allows for the timely detection of deviations and the optimization of working conditions. Modern sensors enable the creation of distributed data acquisition systems with high accuracy and low power consumption.

In industrial production environments, the automation of microclimate control processes is particularly relevant [4-6]. The integration of sensor modules into control systems enables continuous monitoring of environmental parameters and an immediate response to deviations from established norms [7]. This not only increases the efficiency of the production process but also reduces risks to personnel health and equipment.

Particular attention is required for modern robotic complexes operating in enclosed workshops and on open sites [8-12]. Accurate microclimate control is critically important for their stable and safe operation: from temperature and humidity, which affect electronics and batteries, to the level of dust or the gas composition of the air, which determine the reliability of sensory navigation systems. Microclimate sensors are becoming an integral part of intelligent production platforms and robotic systems.

Thus, the selection of optimal sensors is critical for creating intelligent monitoring systems capable of operating both indoors and outdoors, ensuring reliability, scalability, and the ability to integrate with modern automated and robotic platforms.

II. A REVIEW OF MODERN SENSORS

Building an effective microclimate monitoring system requires the correct selection of sensors that provide high

accuracy, reliability, and compatibility with modern automation platforms.

Therefore, we will conduct a detailed review of the modern sensors selected for monitoring the key parameters of the industrial environment: temperature, humidity, pressure, gas concentration, dust level, noise, and illumination.

Sensors such as the BME280, MH-Z19D, BMP290L, and SHT40 will be considered, along with a photoresistor with a resistive divider for auxiliary screen brightness adjustment.

We will begin with the BME280 (Bosch), which is a multifunctional sensor selected for measuring temperature, humidity, and atmospheric pressure. The BME280 sensor is distinguished by its low power consumption, available I²C and SPI interfaces, and broad support among microcontroller platforms.

The BME280 sensor has a small package size (2,5 × 2,5 mm) (Fig. 1), allowing for its integration into mobile devices, robotic systems, and compact monitoring modules.



Fig. 1. BME280 sensor (Bosch)

The BME280 sensor is factory calibrated, ensuring long-term measurement stability without the need for frequent maintenance. Therefore, an important characteristic was its resistance to electromagnetic interference, which is crucial in industrial environments.

Next, we will consider the MH-Z19D sensor (Winsen) (Fig. 2), which belongs to sensors based on the NDIR principle and is used to measure CO₂ concentration in a range up to 5000 ppm. Thanks to its UART/PWM interfaces and operational stability, it is an optimal solution for monitoring air quality in industrial premises. Furthermore, it can be easily integrated into modular systems due to its standard interfaces.

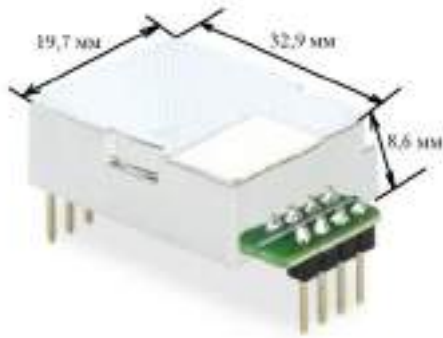


Fig. 2. MH-Z19D sensor

The MH-Z19D sensor consumes approximately 15–20 mA in operating mode, making it suitable for embedded and IoT systems. Its operating temperature range of 0 to +50 °C allows for use in most industrial environments.

The BMP290L sensor (Bosch) was selected for precise atmospheric pressure measurement. The BMP290L sensor features a low noise level.

We will now consider the SHT40 (Sensirion) (Fig. 3), which is used for high-precision temperature and humidity measurements. Its key advantages are compact size, high accuracy, and low power consumption, making it suitable for autonomous systems.

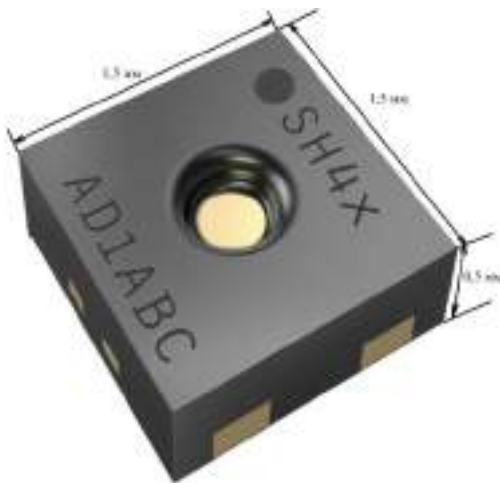


Fig. 3. SHT40 sensor

The SHT40 (Sensirion), with its ultra-compact dimensions (1,5 × 1,5 × 0,54 mm), is one of the most modern temperature and humidity sensors. Its high accuracy and small footprint allow for integration into miniature devices, IoT systems, and robotic complexes where saving space and energy is crucial.

A photoresistor with a resistive divider is used to measure the light level. This is a simple and economical way to implement automatic brightness adjustment for the weather station's display, enhancing the device's user convenience.

Thus, the selected set of sensors covers all the necessary microclimate parameters (temperature, humidity, pressure, CO₂ level) and also ensures the system interface's adaptability through automatic display brightness control.

III. CRITERIA FOR SELECTING MICROCLIMATE SENSORS

In modern production environments, effective microclimate monitoring is impossible without

comprehensive digitalization, which involves the collection, processing, and analysis of sensor data in real-time to support automated solutions and process optimization [13–16].

The selection of sensors for an industrial premises microclimate monitoring system must be based on a number of key criteria.

1. Measurement Accuracy and Stability. This criterion is paramount, as the accuracy of the data directly impacts the reliability of monitoring and decision-making. For temperature and humidity sensors, not only initial accuracy but also long-term stability of readings over years of operation is important. For barometers, low pressure measurement error is critical, enabling the detection of even minor changes.

2. Cost and Availability. In industrial systems, sensors are typically used in significant quantities, so their price affects the economic feasibility of the project. It is also important that the sensor is widely available on the market and has a stable supply chain, as this reduces the risk of dependency on a single supplier.

3. Reliability and Durability. Sensors must operate stably in conditions of increased dust, humidity, or temperature fluctuations. Particular attention should be paid to protection from environmental influences, as well as the quality of the housing and the stability of calibration.

4. Power Consumption. Since some system modules may operate autonomously on batteries or be powered by energy-efficient sources, minimizing energy consumption is important. Sensors with low power consumption extend the operating time without recharging and reduce operational costs.

5. Ease of Integration. This criterion covers the availability of standard interfaces (I²C, SPI, UART), clear documentation, example libraries, and ready-made drivers for popular microcontroller platforms. The simpler the integration, the faster the system can be developed and scaled, and the easier it is to maintain during operation.

Thus, the combination of these criteria enables a well-founded selection of sensors that not only meet technical requirements but are also economically viable and convenient to implement. Tables 1, 2, 3, 4, and 5 present the main characteristics of the selected sensors according to the key criteria: accuracy, cost, reliability, power consumption, and ease of integration.

Table 1. KEY CHARACTERISTICS OF THE BME280 SENSOR

Sensor	BME280
Parameter	T, RH, P
Accuracy	T ±1 °C, RH ±3 %, P ±1 hPa
Cost	Medium
Reliability	High, time-tested
Power Consumption	Low
Ease of Integration	Very simple (I ² C/SPI, ready-made libraries)

Table 2. KEY CHARACTERISTICS OF THE MH-Z19D SENSOR

Sensor	MH-Z19D
Parameter	CO ₂
Accuracy	±50 ppm + 5 %
Cost	Medium
Reliability	High, NDIR principle, stable
Power Consumption	Medium (requires preheating)
Ease of Integration	Simple (UART/PWM, many examples available)

Table 3. KEY CHARACTERISTICS OF THE BMP290L SENSOR

Sensor	BMP290L
Parameter	P
Accuracy	±0,3 hPa
Cost	Higher than BMP280
Reliability	Very high (stability, low noise)
Power Consumption	Low
Ease of Integration	Simple (compatible with Bosch line, I ² C/SPI)

Table 4. KEY CHARACTERISTICS OF THE SHT40 SENSOR

Сенсop	SHT40
Parameter	T, RH
Accuracy	T ±0,2 °C, RH ±1,8 %
Cost	Medium-High
Reliability	High, modern sensor
Power Consumption	Very low
Ease of Integration	Simple (I ² C, official libraries)

Table 5. KEY CHARACTERISTICS OF THE PHOTORESISTOR

Photoresistor	MH-Z19D
Parameter	Illumination
Accuracy	Low (relative values)
Cost	Very low
Reliability	Medium (depends on conditions)
Power Consumption	Very low
Ease of Integration	Very simple (analog ADC input)

After analyzing the key characteristics of the sensors, it can be concluded that each sensor has its own advantages and limitations depending on the selection criteria.

Thus, the BME280 provides an optimal balance of functionality, accuracy, and ease of integration, making it a convenient choice for indoor microclimate monitoring. The MH-Z19D is a reliable solution for CO₂ measurement, although it requires more energy and a pre-heating period before operation. The BMP290L demonstrates high accuracy and stability in measuring atmospheric pressure, which is critically important for the external module. The SHT40 is notable for its low power consumption and high accuracy, making it suitable for long-term use in outdoor conditions.

The photoresistor with a resistive voltage divider is the simplest and most cost-effective solution for light level control, sufficient for implementing automatic display brightness adjustment.

Therefore, the selected set of sensors ensures complete coverage of the necessary microclimate parameters with an optimal balance of accuracy, cost, and power consumption.

IV. CONCLUSIONS

This work reviewed modern sensors for monitoring the microclimate parameters of an industrial premises. Key selection criteria-accuracy, cost, reliability, power consumption, and ease of integration – were considered, enabling a well-founded choice of sensors for practical application.

Analysis of the primary sensor characteristics showed that the BME280 is an optimal solution for indoor modules, as it combines temperature, humidity, and pressure measurement functions in a single package with relatively low cost and simple integration. The MH-Z19D sensor provides stable CO₂ level monitoring by utilizing reliable NDIR technology, which is critically important for assessing air quality and ventilation efficiency in industrial settings. For the outdoor module, the combination of the BMP290L and SHT40 is advisable. The former offers high accuracy and long-term stability in atmospheric pressure measurement, while the latter features a modern component base, high accuracy, and very low power consumption, making it suitable for prolonged use in external conditions.

The use of a photoresistor with a resistive divider for auxiliary light level control was separately justified. Although this approach does not provide high metrological accuracy, it is simple, inexpensive, and entirely sufficient for implementing automatic brightness adjustment of the weather station's display, thereby enhancing the system's ergonomics.

Overall, the selected set of sensors enables the construction of a microclimate monitoring system that covers all key parameters: temperature, relative humidity, atmospheric pressure, CO₂ concentration, and light level for interface adaptation. This system achieves a balance between measurement accuracy, economic feasibility, and energy efficiency. The proposed solutions are easily integrated with modern microcontroller platforms, creating a foundation for further functional expansion and project scalability.

LIST OF REFERENCES

- [1] Я. І. Халімонов, та інш., “Створення інтелектуального модулю для автоматизованого моніторингу середовища у приватних та комерційних приміщеннях з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій,” *International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics and Telecommunications dedicated to the 85th anniversary of the Department of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurements*. 2024, pp. 176-181.
- [2] Y. Khalimonov, et al., “Approaches to ensuring proper working conditions using sensor technologies IoT,” *International Conference «DIGITAL INNOVATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT 2024»*, 2024, pp. 24-25

- [3] Y. I. Khalimonov, et al., "Monitoring and optimising conditions in production environment," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 256-258
- [4] A. Yechevskyi, et al., "Methods Of Identification Of Objects On Industrial Lines," *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2024, Vol. 8, Issue 11, pp. 48-55
- [5] S. Sotnik, "Integration of IoT into security systems: opportunities and risks," *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2024, Vol. 8, Issue 11, pp. 56-61
- [6] Y. I. Khalimonov, et al., "Circular economy in automated systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of 1st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 53-54
- [7] O. R. Kolbasa, et al., "The significance and necessity of automating the selection of sensors and actuators," Kolbasa, «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025, pp. 63-67
- [8] D. A. Sukhomlinova, S.V. Sotnik, "Aerial robot in urban environments," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of 1st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 45-46
- [9] A. S. Andreiev, et al., "Analysis of robotics platforms for educational and research purposes," *Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2024 / Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 26-27 вересня 2024 р.*, 2024, pp. 25-27
- [10] S. V. Sotnik, I. S. Zarubin, "Modeling design of mobile robotic platform," *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів*. 2024, pp. 481-482.
- [11] M. S. Bielik, et al., "Analysis of the structures of mobile platforms for promoter robots," *The 5th International scientific and practical conference "Global trends in science and education" (June 2-4, 2025) SPC "Sci-conf.com.ua"*, Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 319-325
- [12] A. D. Yechevskyi, et al., "Research of orientation methods of autonomous mobile robots in industrial conditions," «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025, pp. 115-119
- [13] A. Konieva, et al., "Main trends in the development of automated image processing systems," «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025, pp. 68-72
- [14] Y. V. Shrubkovskyi, et al., "Development of a structural scheme for automatic dosing of liquid components," *Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: збірник наукових праць з матеріалами V Міжнародної наукової конференції, м. Кропивницький, 6 червня, 2025 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп*, 2025, pp. 242-246
- [15] S. Sotnik, et al., "Evaluating relational database scaling strategies in web engineering," *International Conference on Advanced Trends In Radioelectronics and Infocommunications (ATRIC-2025) (May 21–22, 2025)*, Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, Ukraine, 2025, pp. 224-228
- [16] S. V. Sotnik, "Study of Shrinkage of Thermoplastics in Injection Molding," *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, 2025, Vol. 21, Iss. 24, pp. 13-17
- [17] С. Сотник, "Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів," *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2025, № 1 (68), pp. 52-58

Features of automatic working time control systems

Tymofii Cherednichenko¹, Svetlana Sotnik¹

¹ Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
Kharkiv, av. Nauki. 14., email: svetlana.sotnik@nure.ua

Anotation: The research is devoted to the development and implementation of automatic working time control systems, which are an important tool for improving personnel management efficiency and optimizing business processes. The paper discusses the features of creating a web application based on the Vuetify framework, using the SQLite database and the server part on Node.js. The main focus is on automating work time accounting processes, including employee check-in/check-out registration, performance analysis, and report generation. The study analyzes the advantages of using a lightweight SQLite database for small and medium-sized organizations, as well as the integration of modern front-end technologies to create a user-friendly interface. The work includes the practical implementation of the system, demonstrating its functionality, and provides an analysis of the challenges associated with ensuring data security, scalability, and integration with other systems. Visual elements such as diagrams and graphs contribute to a better understanding of the structure and functionality of the developed application. The study emphasizes the importance of automated systems for modern organizations, offering recommendations for their implementation and improvement.

Key words: time and attendance systems, Vuetify, SQLite, Node.js, automation, web application, human resources management, productivity.

I. INTRODUCTION

In modern conditions, automation and robotization processes play a key role in improving the efficiency of enterprises, allowing to minimize the human factor, reduce time costs, and ensure the accuracy of processing large data sets [1-8]. The use of digital technologies and automatic information collection systems creates the basis for transparency in business processes and contributes to the formation of intelligent personnel management systems [9-12].

In modern conditions, working time management is an important aspect for increasing the productivity of organizations. Automatic working time control systems allow you to optimize accounting, reducing manual labor and increasing data accuracy. The growing demand for such systems is due to the need for transparency of work processes, especially in the context of remote work and business digitalization.

The development of web applications for such systems opens up new opportunities for companies of various scales. The use of the Vuetify framework ensures the creation of an adaptive and convenient interface, SQLite offers simple and effective data storage, and Node.js allows you to implement fast server logic. Together, these technologies create a flexible solution that is easily deployed and adapted to user needs.

The purpose of the study is to analyze the features of creating automatic working time control systems, develop a

prototype of a web application based on selected technologies and evaluate its effectiveness in real conditions. The relevance of the work is explained by the growing need for automation of personnel management in the modern business environment.

II. ARCHITECTURE OF THE AUTOMATIC WORKING TIME CONTROL SYSTEM

Automatic working time control systems perform a number of key functions aimed at improving the efficiency of personnel management. They allow you to record working hours (track employee arrival and departure times), analyze productivity (assess working hours and time efficiency), generate reports (create analytical reports for management and accounting), and ensure transparency (providing employees and employers with access to working time data).

The automatic working time control system (AWTCS) includes the following main components:

- front end – a user interface that allows employees to record their working hours and managers to view the data;
- backend – the core of the system that processes requests from the frontend, implements business logic, and provides communication with the database;
- database – responsible for storing information about working hours, attendance, changes, and other parameters.

The generalized architecture of the AWTS is shown in Fig. 1.

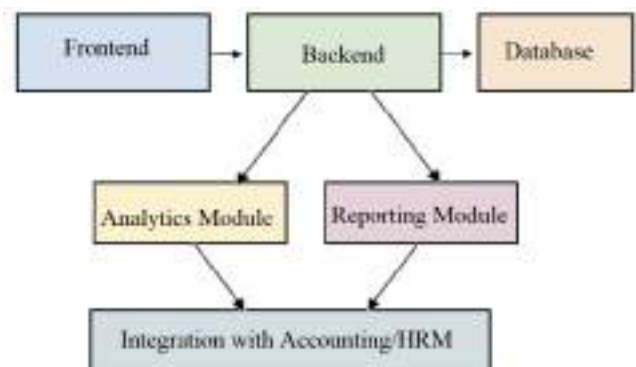


Fig. 1. Generalized architecture of the AWTS

Analytics module – analyzes collected data, allows you to identify patterns, monitor performance, and forecast indicators.

Reporting module – generates reports for management, accounting, and HR departments (e.g., information about hours worked, tardiness, vacations).

Accounting/HRM integration module – provides automatic data exchange with external systems, simplifying payroll calculation and personnel management.

The successful implementation of all these modules depends on the right choice of technologies and development tools. Table 1 shows the main advantages of using the selected technologies in AWTS.

Table 1. ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF AUTOMATIC WORKING TIME CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGIES

Technology	Advantages of use	Restrictions on use
Vue.js + Vuetify	- adaptive design; - rapid interface development; - support for Material Design components; - reactivity and two-way data binding; - easy integration with the backend.	- limited SEO optimization for Single Page Applications (SPA); - dependence on JavaScript in the browser; - need for additional configuration for large projects; - bundle size can be significant.
Node.js + Express.js	- high performance for I/O operations; - asynchronous request processing; - extensive ecosystem of npm modules; - single programming language (JavaScript); - rapid development and prototyping.	- not optimal for CPU-intensive tasks; - single-threadedness can be a limitation; - rapid changes in the ecosystem; - need for additional caching for high loads.
PostgreSQL	- high performance and scalability; - support for complex queries and indexes; - ACID compliance and reliability; - advanced role and security system; - support for JSON and other data types.	- more complex configuration and administration; - higher server resource requirements; - need for specialized Database Administrator knowledge; - more complex backup.
JWT (JSON Web Tokens)	- stateless authentication; - easy scalability; - self-sufficient tokens with metadata; - support for various encryption algorithms.	- it is difficult to revoke tokens before their expiration date. - the token size may be large. - secret keys must be stored securely. - security risks if implemented incorrectly.

The presented technology stack ensures the creation of a scalable and reliable AWTC system capable of serving from several dozen to thousands of users. The combination of selected technologies allows you to implement all key system functions: from recording working hours to generating analytical reports.

For successful implementation of the system, a phased approach is recommended: first, develop basic functionality

using the simplest components of the stack, and then gradually add more complex analytics modules and integration with external systems.

III. FEATURES OF DEVELOPING A WEB APPLICATION FOR WORKING TIME CONTROL

The development of a web application for monitoring working hours involves creating a system that combines convenience, functionality, and reliability [13-17].

The development process covers several key stages, from planning the application structure to testing the finished product.

First, the user interface is designed using the Vuetify framework. This framework, built on Vue.js, offers a set of ready-made components that comply with Material Design standards, ensuring an aesthetic and consistent look for the application on different devices. For example, to display employee working hours, components such as cards and tables are used, which allow dynamic display of information with the ability to sort and filter.

A distinctive feature of Vuetify components is their reactivity, meaning they automatically update when data changes, making the interface lively and user-friendly. In addition, Vuetify supports themes that can be customized to match your corporate style, and has built-in support for localization, making it easy to adapt your application for different languages.

One important aspect is the integration of Vue Router with Vuetify to manage navigation in the application. Vue Router allows you to create a single-page application with multiple routes, for example, for authentication pages, viewing working hours, generating reports, and settings. A special feature of this integration is the use of Vuetify components such as v-navigation-drawer for the sidebar or v-app-bar for the top navigation bar, which are synchronized with the routes. This ensures smooth transitions between pages without reloading, improving the user experience.

When configuring routes, it is important to consider security, for example, using guard functions that check user authorization before accessing certain sections, adding a layer of security to the frontend.

The next step is to develop the server side using Node.js. This technology allows you to create a fast and scalable backend using the Express.js library to organize API routes. The server processes requests from the client, executes business logic, such as calculating total working time based on records, and interacts with the database.

A distinctive feature of Node.js is its asynchronous execution model, which is ideal for I/O operations such as database queries, allowing multiple requests to be processed simultaneously without blocking.

SQLite, a lightweight database that does not require a separate server process and stores all information in a single file, is used for data storage. The peculiarities of creating tables in SQLite lie in the use of simple SQL queries to define the structure. For example, a table for employees may include fields for ID, name, position, and contact details, created using the CREATE TABLE command with specified data types, such as INTEGER for IDs and TEXT for names.

For the working time records table, fields are added for date, entry and exit times, as well as a foreign key to reference the employee table, ensuring relational integrity.

An important feature is the use of indexes to speed up searches, for example, on the date field to quickly extract data for a period.

In addition, SQLite supports transactions, which allows you to perform multiple operations atomically, preventing data loss in case of errors.

Frontend and backend integration is achieved through asynchronous HTTP requests using the Axios library on the client side. Axios simplifies sending requests, handling responses and errors, allowing you to configure headers, for example, for authentication using tokens.

A special feature of Axios is the ability to use interceptors that intercept requests or responses to add authorization tokens or handle errors such as session expiration. For example, to get a list of employees, the client sends a GET request to the /api/employees endpoint, and the server returns the data in JSON format, which is then displayed in Vuetify components.

Similarly, to save a new record about working hours, a POST request with a body containing the necessary data is used, after which the server inserts it into the database using an INSERT SQL query and returns a confirmation.

PUT requests are used to update data, and DELETE requests are used to delete it, providing full CRUD functionality. A special feature of this interaction is asynchronous processing: Axios returns promises that integrate with the reactive properties of Vue.js, allowing the interface to be updated automatically after receiving a response. In addition, for optimization, you can use request caching or debounce functions to avoid excessive load on the server during rapid changes in the interface.

Component testing is also taken into account during development. Vuetify offers tools for unit testing using Jest or Vitest, where you can check component rendering and their interaction with data. For the backend, Node.js allows you to integrate tests with Mocha or Jest, checking API endpoints and interaction with the database. Overall, this structure ensures the creation of a reliable web application that effectively controls working time.

IV. CHALLENGES AND LIMITATIONS OF DEVELOPING WORKING TIME CONTROL SYSTEMS

The development of automatic working time tracking systems is associated with certain challenges. One of the main ones is ensuring data security. Since the system stores information about employees, it is necessary to protect it from unauthorized access. The work uses password encryption methods and authentication based on JWT tokens, but SQLite does not support built-in encryption, which requires additional security measures.

Another challenge is scaling the system. SQLite is effective for small organizations, but as the number of users or data volume increases, it may be necessary to switch to a more powerful database, such as PostgreSQL. This requires additional effort to migrate data and adapt the system.

Integration with other systems, such as accounting software or HRM platforms, is also challenging. The variety

of data formats and protocols requires careful API planning and compatibility testing.

Creating a user-friendly interface is another important aspect. Despite the advantages of Vuetify, developing an intuitive design that meets the needs of different user groups requires a deep understanding of UX principles and testing. Figure 2 shows a diagram of the main development challenges.

V. CONCLUSIONS

The development of an automatic working time control system using Vuetify, SQLite, and Node.js allows you to create effective and affordable solutions for personnel management. We plan to develop a web application that will automate working time accounting, analyze productivity, and generate reports, which will increase transparency and reduce the time spent on administrative processes.

Vuetify will provide a modern and responsive interface, Node.js will ensure fast request processing, and SQLite has proven to be the optimal choice for small and medium-sized businesses due to its ease of deployment and lack of specialized administration requirements.

An analysis of the architecture shows that the modular structure of the system, with a clear division into front-end, back-end, and database, creates a foundation for further scaling and expansion of functionality. The integration of analytics, reporting, and external system modules allows for the creation of a comprehensive solution for automating HR processes.

The study revealed the key advantages of the proposed approach:

1. Speed of implementation – the use of ready-made components and frameworks reduces development time by 40-60 %.
2. Cost-effectiveness – no licensing costs for core technologies reduces the total cost of ownership.
3. Flexibility of adaptation – modular architecture allows you to easily customize the system to the specific needs of your organization.
4. Ease of maintenance – the use of popular technologies ensures the availability of specialists for further support.

At the same time, the study revealed the limitations of the existing solution. The use of SQLite limits horizontal scaling capabilities for large enterprises with thousands of employees. The lack of built-in encryption in SQLite creates additional challenges for ensuring the security of personal data. Dependence on JavaScript on the client side can create problems in organizations with strict browser security policies.

Thus, the study shows that such systems are an important tool for organizations seeking to optimize human resource management. However, to ensure security, scalability, and integration with other platforms, it is necessary to consider the limitations of the selected technologies.

Further development of automatic working time tracking systems may include the introduction of artificial intelligence for analyzing productivity data or a transition to cloud solutions to improve scalability.

LIST OF REFERENCES

- [1] І. С. Зарубін, та інші., “Ефективність використання роботизованих систем у виробництві,” *Комп’ютерно-*

- інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2024: матеріали I-ої Всеукраїнської конференції, Харків, 16-17 травня 2024 (CITAR-2024). 2024, pp. 150-153
- [2] S. V. Sotnik, "Development of automated control system for continuous casting," *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2024, № 2(69), pp. 181-189
- [3] Y. Vasylenko, et al., "Development of Security and Fire Alarm Integrated Automation System at Enterprise," *WSEAS Transactions on Systems*, 2025, 24, pp. 642-664
- [4] S.V. Sotnik, "Modeling design of mobile robotic platform," *XXIV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів*. 2024, pp. 481-482
- [5] M. S. Bielik, et al., "Analysis of the structures of mobile platforms for promoter robots," *The 5th International scientific and practical conference "Global trends in science and education" (June 2-4, 2025) SPC "Sci-conf.com.ua"*, Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 319-325
- [6] Y. V. Shrubkovskyi, et al., "Development of a structural scheme for automatic dosing of liquid components," *Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: збірник наукових праць з матеріалами V Міжнародної наукової конференції, м. Кропивницький, 6 червня, 2025 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2025, pp. 242-246*
- [7] S. Sotnik, "Development of a range measurement module on an ultrasonic sensor with a GSM module," *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2025, 2, pp. 32-44
- [8] M. M. Danylenko, et al., "Comparative analysis of modern SCADA packages for production automation," *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2025, Vol. 9(2), pp. 26-34
- [9] С. Сотник, "Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів," *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2025, 1 (68), pp. 52-58
- [10] R. V. Marunich, et al., "Modern IoT technologies for creating automated access systems," *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports*, 2025, pp. 38-39
- [11] S. V. Sotnik, "Features of using REST architecture for development of ARS for information systems," *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», Коблево, 9–13 вересня 2024 р. Збірник праць. – Харків: ХНУРЕ, 2024, pp. 42-45*
- [12] A. Tverdokhlib, et al., "Intelligent tools for optimizing information and search engines," *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 28-31
- [13] A. S. Andreiev, et al., "Computer games and Web design," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 712-714
- [14] M. Rudenko, et al., "Overview of approaches to scaling relational databases in development and adaptation of web applications," *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 грудня 2024 р., м. Запоріжжя). [Електронний ресурс] /Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024, pp. 398-402*
- [15] V. G. Kaponkin, et al., "The role of big data in improving functionality of search engines," *The 8th International scientific and practical conference "European congress of scientific achievements" (August 12-14, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain, 2024, pp. 69-76*
- [16] A. Konieva, et al., "Main trends in the development of automated image processing systems," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 68-72
- [17] O. R. Kolbasa, et al., "The significance and necessity of automating the selection of sensors and actuators," *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025*, 2025, pp. 63-67

Конструкція та технологія LCD друку та основні параметри слайсерів для фотополімерного друку

Максим Лисун¹, Дмитро Никітін¹

1. Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, пр. Науки. 14., email: maksym.lysun@nure.ua

Анотація: У роботі досліджена конструкція принтера для LCD друку та проведений аналіз основних параметрів існуючих слайсерів для фотополімерного друку.

Ключові слова: 3D-друк, FFF/FDM технологія, вплив параметрів, слайсер, LCD, УФ.

I. ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку адитивних технологій 3D-друк посідає провідне місце серед методів швидкого прототипування та виготовлення дрібносерійної продукції. Одним із найперспективніших напрямів є фотополімерний друк, що ґрунтується на поетапному затвердінні рідких смол під дією світлового випромінювання. Серед різновидів фотополімерного друку особливе поширення набув метод LCD друку, який вирізняється високою точністю відтворення деталей, відносною доступністю обладнання та можливістю створення виробів зі складною геометрією.

Аналіз конструкції 3D-принтера для LCD друку є важливим з огляду на необхідність оптимізації його механічних і оптичних вузлів з метою підвищення якості друку та зменшення собівартості процесу. Окремого значення набуває дослідження параметрів слайсерів, такого спеціалізованого програмного забезпечення, що виконує перетворення тривимірних моделей у набір інструкцій для друку. Вибір і коректне налаштування таких параметрів, як товщина шару, час експозиції, швидкість підйому платформи тощо, безпосередньо впливають на точність відтворення моделі, міцність готових виробів та ефективність використання матеріалів.

II. ТЕХНОЛОГІЯ ФОТОПОЛІМЕРНОГО LCD ДРУКУ

Технологія фотополімерного LCD друку (або MSLA) – це метод 3D-друку, який пошарово затверджує рідку фотополімерну смолу під дією ультрафіолетових світлодіодів та LCD-маски. Спеціальна LCD-матриця формує зображення кожного шару, пропускаючи світло тільки там, де необхідно затвердіння матеріалу, що дозволяє створювати об'єкти з високою точністю, деталізацією та гладкою поверхнею [1, 2].

Принцип роботи LCD друку ділиться на декілька продовжуючих етапів. Першим і найпростішим є етап з підготовки смоли: у ванночку принтера заливається рідка фотополімерна смола. Після цього платформа для друку опускається у смолу, а зверху розташовується LCD-дисплей та УФ-світлодіоди, цей етап частіше за все називають засвіткою. УФ-світлодіоди світять крізь LCD-маску, яка пропускає світло лише через певну ділянку. Ця ділянка смоли полімеризується та твердне, формуючи один шар об'єкта. Платформа піднімається і процес засвітки повторюється, накладаючи наступний

шар поверх попереднього, доки модель не буде повністю сформована.

Конструкція принтера будується лише по системі знизу-вгору, так як основне джерело зображення та УФ випромінювання знаходяться знизу принтера, рис. 1.

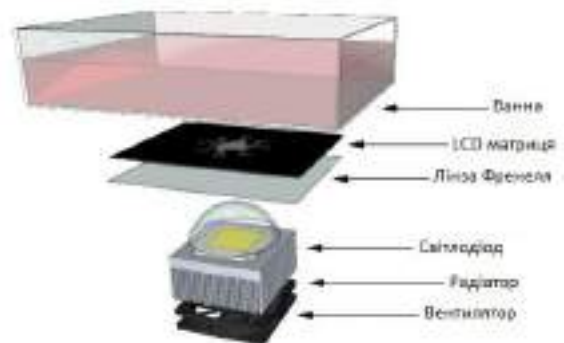


Рис.1. Типова конструкція принтера по технології LCD

Як джерело ультрафіолетового випромінювання зазвичай застосовують світлодіод або світлодіодну матрицю, випромінювання якої проходить крізь екран і потрапляє на дно ванни, рис. 2. Основною особливістю таких джерел є їхній спектр випромінювання, який знаходиться в діапазоні від 390 до 415 нм. Саме цей діапазон обирають завдяки властивостям фотополімерів, що найефективніше полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання зазначених довжин хвиль. Використання інших діапазонів призводить до зниження швидкості та якості засвітлення. Відхилення довжини хвилі може викликати неповну полімеризацію моделі, що стане причиною браку [3].



Рис.2. Приклади світлодіодних матриць

Технологія такого друку стала можливою тоді, коли було запропоновано використовувати LCD екрани, в якості світлопропускної маски, звідси і назва технології друку, бо такий екран є її основою. Але тільки після того, як були прибрані елементи, що заважають проходженню УФ випромінювання, а саме підсвітка та поляризаційна плівка, використання таких екранів стало можливим у фотополімерному друці. В результаті видалення зайвих елементів проходження УФ випромінювання через

екран з мінімальними втратами стає можливим і залишається шар, який безпосередньо відповідає за формування зображення. Для формування цього шару використовуються білі та чорні пікселі. Білі пікселі мають максимальне пропускання ультрафіолету, чорні ж навпаки, блокують його проходження. Таким чином підставляючи під екран джерело ультрафіолетового випромінювання, можливо регулювати подавання УФ світла на друковану область [4].

Якість друку моделі та її роздільна здатність по осях X та Y безпосередньо визначаються характеристиками LCD-екрана, а зокрема його фізичними розмірами та роздільною здатністю. Для екранів із розмірами 100×50 мм і роздільною здатністю 2К друк забезпечує точність близько 35-39 мкм по осях X–Y. Якщо ж використовувати екран з роздільною здатністю 4К при тих самих розмірах 100×50 мм, то розмір пікселя становитиме вже 23-26 мкм, що дозволить досягти значно вищої деталізації моделі, рис. 3.



Рис.3. Порівняння надрукованих деталей з використанням екранів з різними розмірами пікселя

III. Аналіз параметрів слайсерів для фотополімерного друку

Слайсери для фотополімерного 3D-друку – це спеціальні програми, які перетворюють 3D-модель у набір інструкцій для принтера, щоб він міг надрукувати деталь шар за шаром. Всі ці шари виводяться на LCD екран для подальшої побудови моделі. У своєму складі вона має файл G-code, який використовуючи команди для керування ЧПК верстатами, здійснює технологічні операції принтера, такі як ввімкнення світлодіодної матриці, перехід від однієї картини шару до іншої, контролює процес переміщення та інше, рис. 4.

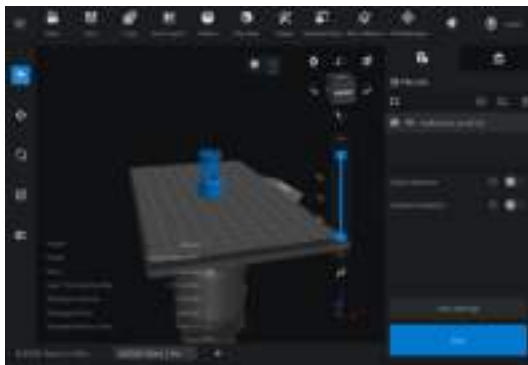


Рис.4. Програма ChituBox для фотополімерного 3D-друку

У випадку фотополімерного друку слайсери виконують декілька ключових задач [5, 6]:

- розрізає модель на шари що переводить 3D-модель у послідовність 2D-зображень, які відповідають кожному шару друку;
- генерує підтримки та створює опори, щоб деталь не «висіла в повітрі» під час друку;
- додає основу та інші допоміжні структури для надійного прилипання деталі до платформи;
- налаштовує параметри друку: товщина шару (наприклад, 0.025 мм або 0.05 мм), час експозиції для кожного шару, швидкість підйому платформи, антиаліасінг, компенсацію усадки;
- генерує фінальний файл у форматі, який розуміє конкретний принтер (наприклад, *.cbddlp, *.photon, *.sl1, .ctb тощо).

Основою кожного слайсеру є G-code, рис. 4. В першій секції міститься технічна інформація, яка може виводитися на екрані принтера, така як очікуваний час друку, загальна вага, загальна кількість шарів та ін. Наступними командами є ті, що виконуються при старті друку, такі як G28 Z0, тобто відправити платформу в нульову точку осі Z, для визначення точного місцезнаходження, або M21, що визначає систему координат в мм. G90 встановлює абсолютну систему координат, що виконує переміщення по координатам такого формату: G0 Z190, тобто переміщення в позицію 190 мм від домашнього положення. Далі вже йдуть команди, які безпосередньо виконуються для побудови моделі, це переміщення осі та подача матеріалу, рис. 5.



Рис.5. Інформаційна секція G-code

Окрім налаштувань коду та самого процесу друку є багато загальних параметрів принтера та слайсеру які сильно впливають на кінцевий результат друку.

Насамперед це температура. Температура насадки є найважливішим параметром у слайсері, тому що без

чіткого рівня тепла жоден друк не буде працювати коректно. Коли оператор починає друкувати новою ниткою, перше що він налаштовує на слайсері, це температура сопла. Порівняти кінцевий результат можна надрукуювши температурну вежу, щоб побачити, які значення працюють найкраще, рис. 6. Занадто висока температура сопла призведе до надмірної екструзії з плямами по всьому друку. В свою чергу, занадто низька температура спричинить недостатню екструзію, коли не всі шари будуть надруковані повністю [7].



Рис.6. Порівняння екструзії при різних температурах сопла

Потік (flow), відомий також як коефіцієнт екструзії, визначає швидкість, з якою нитка екструдується. Наприклад, при 100-відсотковому показнику потоку принтер може використовувати 10 см нитки для певної деталі, але якщо змінити витрату на 90 відсотків, для тієї самої функції знадобиться лише 9 см. Зрештою, регулювання потоку впливає на кількість обертів двигуна екструдера на міліметр нанесеного матеріалу. Потік можна використовувати для обліку надмірної або недостатньої екструзії на принтері без коригування параметра електронного кроку принтера, значення якого зберігається у мікропрограмі. Найкращим рішенням буде налаштувати значення кроку під час калібрування принтера та налаштувати потік відповідно до конкретних завдань друку, рис. 7.

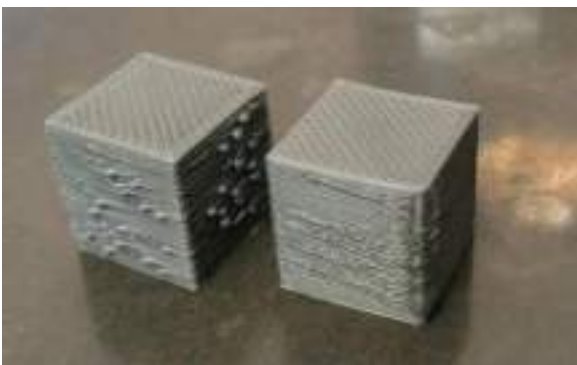


Рис.7. Налаштування потоку може допомогти надмірній екструзії

Підримки або опори є ще одним важливим параметром слайсера. Підримки – це конструкції, які утримують виступаючі елементи моделей. Параметри які зазначають у слайсері включають у себе кут звису і мінімальну площу опори [8]. Перший визначає

мінімальний кут, який повинен становити звис, перш ніж слайсер створить опору для його утримання. Останній визначає мінімальну площу, яку має мати опорна структура, щоб бути включеною в друк. Інші параметри та параметри підтримки також дуже важливі, рис. 8.



Рис.8. Налаштованих параметрів підтримок

Наприклад, орієнтація частини відіграє ключову роль у створенні опорних структур. Інші параметри підтримки включають швидкість друку, підтримку щільності заповнення тощо. Слід змінювати ці параметри, щоб знайти баланс між достатнім опором та мінімальним споживанням матеріалу, рис. 9.



Рис.9. Приклад налаштованих параметрів підтримок

Заповнення – це внутрішнє наповнення деталей, надрукованих за допомогою фотополімерного друку, і є функцією, недосяжною традиційними методами виробництва, такими як наприклад лиття під тиском. Заповнення дозволяє краще контролювати міцність, вагу, витрату матеріалу та внутрішню структуру деталі без необхідності коригувати її зовнішній вигляд чи зовнішні характеристики [9]. У слайсерах заповнення можна керувати за допомогою щільності заповнення, встановленої у відсотках, і шаблонам заповнення, які є структурою або формою заповнення. Надійніші

малюнки заповнення та більша щільність заповнення подовжать час друку та споживатимуть більше матеріалів, але збільшать міцність і вагу деталі, рис. 9.

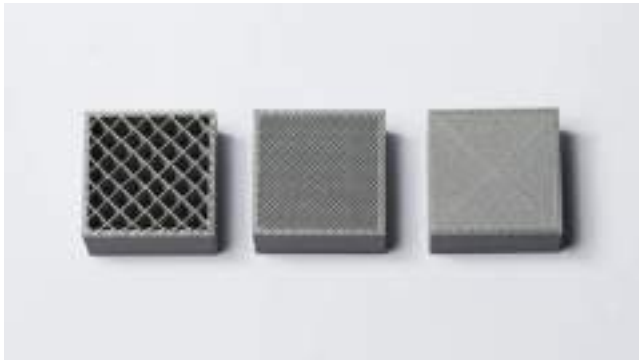


Рис.10. Вигляд однакової деталі але з різним заповненням зсередини

IV. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу технології фотополімерного LCD-друку можна зробити висновок, що цей метод є одним із найбільш перспективних та точних способів адитивного виробництва для виготовлення виробів зі складною геометрією, високим рівнем деталізації та якісною поверхнею. Використання LCD-екранів у поєднанні з УФ-світлодіодами дозволяє створювати шари з високою роздільною здатністю, причому характеристики екрану, його фізичний розмір, роздільна здатність та розмір пікселя прямо визначають точність відтворення деталей по осях X та Y. Це відкриває можливість масштабування технології залежно від вимог до якості готової продукції.

Особливу роль у досягненні стабільного та якісного результату відіграють слайсери – спеціалізовані програмні комплекси, що готують цифрову модель до друку, оптимізуючи її орієнтацію, формуючи шари, генеруючи підтримки, задаючи параметри експозиції, швидкості руху платформи, щільності заповнення та інші критично важливі налаштування. Саме правильний вибір слайсера і точне налаштування його параметрів безпосередньо впливають на геометричну точність, міцність та надійність надрукованих деталей, а також на ефективність використання фотополімерної смоли та часу друку.

Таким чином, комплексний підхід, що включає грамотну конструкцію 3D-принтера, застосування якісних джерел УФ-випромінювання у потрібному спектрі та використання сучасних слайсерів з правильно підібраними параметрами, є запорукою підвищення точності, відтворюваності та економічності процесу фотополімерного LCD-друку. Подальший розвиток технології, імовірно, буде пов'язаний із підвищенням роздільної здатності дисплеїв, впровадженням інтелектуальних алгоритмів автоматичного налаштування друку та оптимізацією витрат матеріалів,

що зробить процес ще більш універсальним і доступним для промислового та індивідуального використання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.
- [2] Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1) (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
- [3] І. Невлюдов, Р. Стрілець, Д. Близнюк. Забезпечення якісних показників фотополімерного 3D-друку за допомогою математичного моделювання і тестових моделей. // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. №2 (28), С. 96-107 DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.096>.
- [4] Igor Nevlyudov, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets. Features of Photopolymer 3D Printing Technology. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 3(2), 318-322. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14542531>.
- [5] Налаштування параметрів 3D друку для роботи з фотополімерами [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://lider-3d.ua/wiki/nastroyki-pechati-i-sovety/nastroyka_parametrov_3d_pechati_dlya_raboty_s_fotopolimerami/. – Зарол. з екрану.
- [6] Zhao, J., Wu, Y., Xue, C., Yang, S., Wang, L., Zhu, F., Zhu, Z., Liu, B., Wang, Y., Tai, R., 2017. Fabrication of High Aspect Ratio Nanoscale Periodic Structures by the Soft X-ray Interference Lithography. *Microelectronic Engineering*, Volume 170, pp. 49–53.
- [7] Kim, K.Y.; Chang, H.; Lee, W.D.; Cai, Y.F.; Chen, Y.J. The influence of blood glucose meter resistance variation on the performance of a biosensor with a gold-coated circuit board. *J. Sens.* 2019, 2019, 5948182.
- [8] Chao Sun, Roman Mikhaylov, Yongqing Fu, Fangda Wu, Hanlin Wang, Xichen Yuan, Zhihua Xie, Dongfang Liang, Zhenlin Wu, Xin Yang. Flexible Printed Circuit Board as Novel Electrodes for Acoustofluidic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 68, Issue: 1, January 2021, Page(s): 393 – 398p. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3039760>.
- [9] Kearney, D. J., Kicin, S., Bianda, E., & Krivda, A. (2017). PCB embedded semiconductors for low-voltage power electronic applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7, 387–395. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2651646>.

Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку

Микола Церцек¹, Дмитро Нікітін¹

1. Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки. 14., email: mykola.tsertsek@nure.ua

Анотація: У роботі проведено аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються у філаментів під час його зволоження та наступного плавлення в екструдері.

Ключові слова: 3D-друк, FFF/FDM технологія, впливу параметрів, сушіння філаменту

I. ВСТУП

У сучасних умовах розвитку адитивних технологій, зростання попиту на персоналізовані вироби та швидке прототипування постає необхідність підвищення якості та надійності 3D-друку. Один з найпопулярніших способів – це FFF (Fused Filament Fabrication) або FDM (Fused Deposition Modeling). Це коли береться нитка пластику і шар за шаром виходить потрібна річ. Просто, недорого, і можна робити багато чого: від деталей на заводі до іграшок вдома. Але тут важливо, з якого пластику друкуєш, бо від цього залежить, чи гарна вийде штука.

Важливо стежити за тим, щоб нитка для 3D-принтера була потрібного діаметру, однаковою по всій довжині, не вологою і міцною. Це допомагає друкувати стабільно, без браку і з високою точністю. Якщо ми зрозуміємо, як ці параметри впливають на друк, ми зможемо краще передбачати результат, вибирати матеріали і налаштовувати 3D-принтер під конкретні завдання.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою у підвищенні якості друківаних виробів, зниженні витрат часу та матеріалів на переробку або повторне виготовлення деталей, а також забезпеченні відтворюваності результатів при серійному виробництві. Створення моделі, яка пов'язує характеристики пластику для друку з якістю самого друку, допоможе технології FFF/FDM стати ще кращою та знайти більше застосувань у сучасному виробництві.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Хоча пластикові вироби на перший погляд здаються стійкими до вологи, філамент для 3D-друку характеризується гігроскопічністю, через що він легко поглинає вологу з навколишнього середовища. Щоб надрукувати щось якісно і щоб принтер не зажував, нитку треба просушити перед роботою. Якщо правильно зберігати і готувати нитку, то все вийде як треба [1].

Здається, ніби вази зліва та справа зроблені з різних матеріалів: ліва якась мутна, а права – майже прозора. Єдине, що в них однакове – це те, що вони обидві без кольору, рис. 1.

Виявилося, що ці дві вази зробили з одного й того самого нейлону, з однієї котушки, тільки з перервою в кілька годин. Ліву надрукували, поки матеріал ще не просох, а праву – вже після. Це показує, що нейлон дуже добре вбирає вологу, і це погано впливає на друк [2].

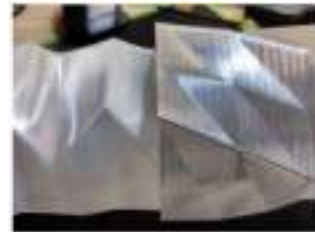


Рис.1. Приклад пластику до сушіння та після

Котушка кілька тижнів стояла в шафі без упаковки, і за цей час нейлон набрав багато води просто з повітря. Цей матеріал дуже швидко вбирає вологу, і йому вистачає кількох годин, щоб насититися. Інші види пластику теж вбирають воду, але не так сильно. І навіть у зразків одного типу, або партій від одного виробника, ця властивість може бути різною, тому що відрізняється сировина, технологія, барвники та добавки.

Коли в полімерах забагато вологи, це погано, бо відбувається гідроліз – руйнування молекул через реакцію з водою при нагріванні. У 3D-друці це може призвести до проблем:

- матеріал ніби піниться і з'являються пухирці. Під час друку (наприклад, ABS-пластиком при 240°C) вода закипає і розширюється, утворюючи бульбашки всередині полімеру. Через це поверхня виробу стає нерівною, та й виглядає він не дуже. Якщо чуєте потріскування під час друку – це воно, пухирці, рис. 2.



Рис.2. Приклад спінювання та утворення пухирців при друкуванні

- розводи та волосся. Коли волога потрапляє всередину, пластик стає рідшим, ніж треба. Через це важко налаштувати принтер, і з'являються нитки та розводи на виробі;

- виражене викривлення. Якщо друкувати вологим пластиком, виріб може втратити форму та викривитися;

- шари погано склеюються. Вода руйнує довгі молекули в пластику, і він стає слабшим. Тому шари можуть розшаровуватися під час друку або виріб зламається, коли ви почнете ним користуватися;

- колір змінюється. Через вологу пластик може помінити відтінок. Коли порівнюєш, як друкує сухий і

мокрый пластик, видно, що сухий подається рівніше, рис. 3.



Рис.3. Різниця між вологим пластиком і сухим на виході з сопла екструдера

Багато полімерів вбирають вологу з повітря – їх називають гігроскопічними. У хімії є кілька схожих термінів: гігроскопічність – це коли матеріал вбирає вологу, сорбція – сам процес поглинання, а вологість – це коли в матеріалі вже є якась кількість води. Наскільки сильно полімер вбирає воду, залежить від його типу [3].

Наприклад, поліпропілен майже не вбирає – просто трохи зволожується зверху, а от нейлон вбирає добре. Волога вбирається тому, що полімер має особливу будову – ніби клубок із великих молекул. Між цими молекулами і збирається вода з повітря. Якщо вологи забагато, то відбувається ось що:

- полімер починає ніби пінитись. Коли вологий пластик потрапляє в гарячу зону, волога всередині закипає. Пара під тиском робить бульбашки в пластику. Через це на поверхні моделі з'являються дірки та нерівності, і вид у неї стає так собі. А ще, ці бульбашки всередині роблять виріб слабшим і він не тримається довго»;

- гідроліз полімерів. Це коли вода руйнує великі молекули пластику при високій температурі та тиску. Вдома, коли друкуєш на 3D-принтері (наприклад, нейлоном), температура достатня, щоб почався гідроліз, якщо в матеріалі багато вологи. Гідроліз зменшує кількість ланок у великій молекулі, тобто робить її коротшою, і це впливає на те, наскільки міцним буде виріб.

Коли полімерна нитка потрапляє у вологе середовище, особливо під час нагрівання, вона може руйнуватися. Волога робить свою справу: з'являються нові речовини, ланцюги розриваються, і матеріал слабшає. Через це надрукована річ може розшаруватися або зламатися раніше часу. Якщо у нитці забагато вологи, якість друку падає [4].

Щоб матеріал нормально подавався, доводиться ставити вищу температуру. Але навіть тоді виріб може вийти з браком. Найбільше бояться вологи нитки з нейлону, полікарбонату та сополієфіру. Нитка легко вбирає воду з повітря. Якщо не дотримуватися правил зберігання, тобто тримати її у вологому місці, виникнуть проблеми [5].

Різні полімери по-різному реагують на вологу. Наприклад, нейлон починає вбирати воду вже через 18 годин на повітрі. А PVA, який використовують для друку підтримок і який повністю розчиняється у воді, ще гірше. PLA та ABS теж вбирають вологу, але PLA робить це швидше, ніж ABS. Волога шкодить не тільки нитці, а й принтеру. PLA-нитка, яка набрякла від вологи, може так забити сопло, що доведеться його міняти.

III. ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виходячи з плану дослідження с першу необхідно визначити, як сильно філамент насичується вологістю. На цьому етапі дослідження будуть поділені на дві стадії:

- базове сушіння філаменту без попереднього змочування зразка;
- сушіння насиченого філаменту вологою (філамент буде передчасно змоченим, щоб подивитися скільки вологи він зможе поглинути).

В першій стадії експерименту були обрані чотири марки філаменту, які найчастіше використовуються для 3D-друку, а саме: PLA, PETG, ABS та Nylon. Кожен з цих зразків буде братися з нової котушки у базовому пакуванні, яке надає виробник пластика. З кожної котушки буде братися по одному тестовому зразку філаменту діаметром 1,75 мм доведеного 30 мм, рис. 4.

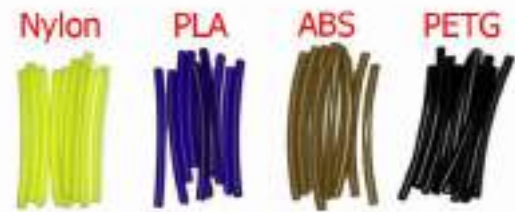


Рис.4. Тестові зразки для дослідження

Оскільки важко визначити вологість зразка з використанням спеціалізованих датчиків вологості твердого тіла, буде використовуватися метод зміни маси зразка до та після сушіння. Дозволить визначити скільки вологи втрачає зразок під час гідратації філаменту. Для того щоб визначити відсоток втраченої вологи буде використовуватися, наступна формула 3.1:

$$W = \frac{m_{\text{волог}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де, W – вологість зразка, %; $m_{\text{волог}}$ – маса зразка перед сушінням; $m_{\text{сух}}$ – маса зразка після сушінням.

Кожен з цих зразків буде зважений на ювелірних вагах, щоб зафіксувати початкову вагу філаменту. Після чого кожен з зразків буде поміщений до сушильної шафи на час в 1 години до 10 годин, та зважений повторно. Оскільки для кожного виду філаменту, рекомендована своя температура сушіння, для спрощення експерименту та обробки даних буде обрана середнє значення температури сушки, для кожного пластику, табл. 1.

Таблиця 1. Середні значення температури сушіння тестових зразків

Пластик	Температура сушки, °C	Час сушіння, г	Середнє значення температури сушіння, °C
PLA	від 40 до 50	від 4 до 6	45
PETG	від 65 до 70	від 4 до 6	70
ABS	від 70 до 80	від 2 до 4	75
Nylon	від 75 до 85	від 8 до 12	80

Таким чином, були отримані значення 40 тестових зразків з різним ступенем гідратації філаменту. Окрім значень зміни маси та вологості зразка, зафіксовані зміна механічних властивостей.

За результатами дослідження можливо спостерігати що ABS пластик має найбільш різкий ступінь зміни вологи філаменту серед усіх інших матеріалів. Також слід зазначити що при температурі сушіння 75°C на 5 годині сушки стає крихким, а на 9 годині утворюються сколи на поверхні зразка. Це в свою чергу призводить до того що філамент може зламатися при проштовхуванні матеріалу через механізм подачі.

PLA та PETG, мають більш плавний ступінь втрати вологи зразків та менш впливові до зміни механічних властивостей матеріалів. Це доводить що ці пластики менш схильні випитувати вологу ніж ABS пластик, та більш стійкі до термічних змін середовищах при температурах 45°C та 70°C.

Nylon пластик, має самий плавний процес випаровування вологи з філаменту, показує що цей матеріал більш схильний до накопичування вологи.

Також незважаючи на най більшу температуру сушки філаменту 80°C, цей філамент не втрачає свої механічні властивості. Графічна демонстрація спостережень першої стадії досліджень наведені на рис. 5.

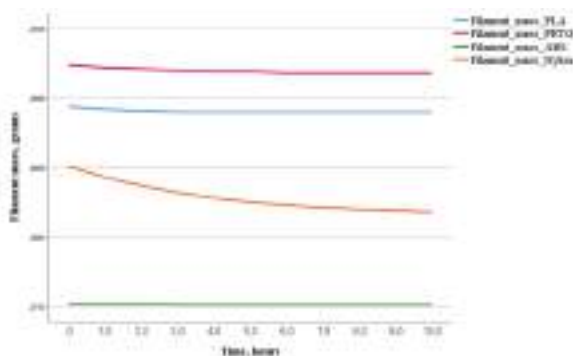


Рис.5. Загальний графіки зміни маси зразків філаменту

Другий етап досліджень полягає у визначенні критичної маси вологи, яку філамент може поглинути. Це дозволить визначити максимальний відсоток вологи для кожного пластику, що в свою чергу дозволить на наступних етапах дослідження включити ці критичні значення до регресійно-кореляційної моделі.

Для цієї стадії дослідження будуть взяті по три зразки кожного філаменту але інших розміру (діаметром 1,75 мм та довжиною 2 м), щоб після сушки пластику можливо було надрукувати тестову модель та повнитися які дефекти друку можуть з'явитися. Три зразка для кожного типу пластика, дозволять уникнути раптових викидів у замірах та усереднити кінцеве значення для кожного філаменту. Була звішена їх початкова маса, після чого кожен зразок був розміщений у воду кімнатної температури 23°C на одну добу, та знову зважений. Це дозволить визначити, як сильно кожний тип філаменту може накопичувати вологу та наскільки сильно може змінюватися його маса. Наступним кроком було проведена сушка пластику на максимальний рекомендований час та температури сушки, для кожного типу пластику табл. 2:

- ABS пластик: час сушки 4 години, температура сушки 75°C;
- PLA пластик: час сушки 6 години, температура сушки 45°C;
- PETG пластик: час сушки 6 години, температура сушки 70°C;
- Nylon пластик: час сушки 12 години, температура сушки 80°C.

Це дозволить порівняти наскільки сильно будуть відрізнятися маси філаменту перед початком експерименту та після сушіння. Результати дослідження наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Зміна маси філаменту після сушки

ABS пластик					
№	Початкова маса, $m_{нач}$ (г)	Маса вагового філаменту, $m_{ваг}$ (г)	Відсоток вологи, W_1 , %	Маса після сушки, $m_{суш}$ (г)	Відсоток випарюваної вологи після сушки, W_2 , %
1	5,00	5,02	0,1	5,01	95
2	4,98	5,00	0,1	4,99	95
3	5,01	5,03	0,1	5,00	95
PLA пластик					
1	5,96	6,08	2	5,97	90
2	6,02	6,14	2	6,03	90
3	5,99	6,11	2	6,00	90
PETG пластик					
1	6,11	6,13	0,13	6,11	95
2	6,05	6,07	0,13	6,08	94
3	6,18	6,21	0,13	6,18	95
Nylon пластик					
1	5,48	6,02	10	5,51	90
2	5,57	6,11	10	5,60	90
3	5,62	6,26	10	5,65	90

Виходячи з отриманих результатів можливо зробити наступні закономірності:

- ABS та PETG пластик, напитує менше всього вологи, а саме 0,1% для ABS пластику та 0,13% PETG пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,016 г та 0,02 г;
- PLA та Nylon пластик, напитує більше всього вологи, а саме 2,0% для PLA пластику та 10,0% Nylon пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,12 г та 0,54 г;
- всі пластики мають високий ступінь гідратації після примусового зволоження зразків в межах від 90% до 95% втрати вологи після сушки. Але ці позитиви можливо поліпшити при використанні більшої температури сушки в залежності від типу пластика та збільшення часу сушки.

Для перевірки якості надрукованих моделей, було роздруковані по чотири тестові моделі з кожного типу пластику, щоб визначити на скільки примусова абсорбція та гідратація філаменту вплинуть на появу дефектів поверхні моделі.

Тестова модель для перевірки розмірами 20×20×20 мм, зображення на рис. 6.

Параметри друку для кожного типу пластику, є наступними:

- висота шару моделі 0,2 мм;
- кількість шарів стінки, кришки та дна моделі 3;
- заповнення моделі 15%;
- швидкість друку моделі 80 мм/с;

- температура екструдера для друку моделі: ABS пластик 230°C, PLA пластик 215°C, PETG пластик 240°C, Nylon пластик 260°C;
- температура стола, для ABS, PLA та PETG пластів 60°C, а для Nylon пластику 80°C.

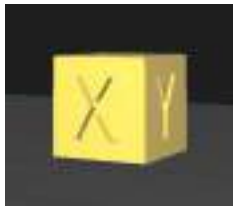


Рис.6. Тестова модель для дослідження

Результати друку тестових моделей наведені на рис. 7.



а) – зразок PLA пластику; б) – зразок PETG пластику;
в) – зразок ABS пластику; г) – зразок Nylon пластику
Рис.7. Результати тестових зразків на абсорбцію та гідратацію води

IV. ВИСНОВКИ

Виходячи з отриманих тестових моделей можливо спостерігати, що після циклу примусової абсорбції та гідратації філаменту, спостерігаються певні дефекти друкованої моделі, які пов'язані саме з проблемою матеріалу на не апаратно-програмної частини 3D-принтеру.

Навіть за результатними зміни маси філаменту після сушки та повернення значення до початкової велечени, спостерігається певна деградація матеріалу навіть після повного циклу сушіння матеріалу.

Особливо проблеми з якістю матеріал спостерігаються на моделі виготовленої з ABS пластика. На поверхні моделі є напливи пластику, які утворилися у вході випаровування підчас екстракції пластику.

Це свідчить про те що, навіть після гідратації пластику та досягнення маси матеріалу 5,01 г від початкової маси 5 г. 0,01 г води потрапили до гіроскопічної структури філаменту. Це в свою чергу призвело до утворення бульбашок на поверхні тестової моделі. PLA та PETG пластик, мають більш кращий результат, і хоча критичних зовнішніх дефектів не спостерігається, в моделях спостерігається делімітація по шарах друку виробу. Це призвело до пониження міцності моделі. Особливо погана спікаймость шарів можливо побачити

на зразку з PETG пластику. Модель з Nylon пластику, має гарні стінки без суттєвих дефектів, але великі напливи на гранях тестової моделі. Також під час друку дужий сильно утворювалося пластикове павутиння, та напливи на соплі екструдера.

Виходячи з проведених досліджень можливо винести наступний висновок, що під час процесу абсорбції гідратації пластику ушкоджується структура прутка філаменту, що в свою чергу призводить до дефектів друку. Це явище можливо пояснити тим що, підчас абсорбції пластику вологою, волога потрапляє у мікро сколи та пори філаменту. Це призводить до того що коли відбувається процес гідратації пластику при високих значеннях температури вода в цих порах починає випаровуватися. Пар розширює цю пору та робить структуру прутка, ще більш ушкодженою.

Також ушкодження прутка іде не тільки по його полущені а і в глибину, що дозволяє вологі ще глибше проникати в матеріал, та зберігатися в середні філаменту до самого початку друку.

Для того щоб зменшити ушкодження матеріалу для друку, необхідно вірно визначити параметри сушки, щоб процес випаровування вологи проходив більш лагідно по відношенню до структури філаменту. Для цього необхідно визначити як саме параметри гідратації філаменту впливають на якість друку пластику.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.
- [2] Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem 2018, 10, 1512- 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.
- [3] Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
- [4] Разумов-Фризюк С.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. Radiotekhnika, 2(209), С. 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>
- [5] Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.65, 2022.-p.p.1-6.

“Web application security: protection against modern cyber threats” Overview of key vulnerabilities (XSS, CSRF, SQL injections), protection methods, use of HTTPS, authentication, and authorization

Anton Andreiev, Svetlana Sotnik

Department CITAR, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine,
Kharkiv, av. Nauki. 14., email: anton.andreiev@nure.ua

Anotation: The research highlights critical aspects of web application security in the context of growing cyber threats. The main focus is on the analysis of common web application vulnerabilities, including XSS, CSRF, and SQL injection, as well as modern protection methods against them. The work discusses the importance of using the HTTPS protocol and robust authentication and authorization systems as fundamental components of a secure web architecture. Particular attention is paid to a comprehensive protection approach that combines technical solutions with organizational measures. The research is not limited to theoretical aspects but provides practical recommendations for implementing protection systems in real-world web applications. A critical analysis of modern threats and countermeasures provides a balanced view of the state of web application security. Visual elements in the work contribute to a better understanding of complex security concepts. Overall, the research emphasizes the key role of a comprehensive security approach in ensuring the reliable operation of web applications.

Key words: Web application security, cyber threats, XSS, CSRF, SQL injections, HTTPS, authentication, authorization.

I. INTRODUCTION

In today's digital world, web applications have become an integral part of business processes and everyday life [1, 2]. Their growing popularity and functionality are accompanied by increased cybersecurity risks. Web applications process vast amounts of confidential information, including user personal data, financial transactions, and corporate secrets, making them attractive targets for cybercriminals.

The processes of global informatization of society have radically changed the landscape of digital security [3-6].

Modern cyber threats are constantly evolving, becoming increasingly complex and sophisticated. Traditional protection methods are often insufficient to counter new types of attacks, such as complex XSS attacks, CSRF exploits, and SQL injections. In this context, the development and implementation of comprehensive web application security systems is becoming a critical task.

Ensuring the security of web applications is closely linked to the development of security technologies and secure development methodologies [7-10]. The use of HTTPS, robust authentication and authorization mechanisms, and the implementation of secure coding principles can significantly improve the security of web applications. The integration of these technologies contributes to the formation of new, more attack-resistant web systems that can not only withstand

current threats but also adapt to future cybersecurity challenges [3-5].

Thus, in the context of the constant growth of cyber threats and the increasing complexity of web applications, the relevance of this research becomes obvious. A comprehensive approach to security, combining technical solutions with organizational measures, opens up new opportunities for improving the reliability, resilience, and security of web applications.

II. THE ROLE OF SECURITY MEASURES IN WEB APPLICATIONS

In the modern information environment, where the number of web applications is growing exponentially and cyber threats are becoming increasingly sophisticated, the role of security systems is becoming critical. Modern security technologies not only enable faster and less risky protection of confidential data but also adapt to new types of threats, increasing the overall level of web application security.

Table 1 below provides a detailed overview of how each of these measures impacts web application security and contributes to their protection.

Table 1. ROLE OF INTELLIGENT TOOLS IN INFORMATION RETRIEVAL SYSTEMS

Protective measure	The role in ensuring web application security
HTTPS protocol	Data encryption during transmission between the client and the server.
	Ensuring data integrity and protection against interception.
	Verification of website authenticity using SSL/TLS certificates.
Authentication systems	Verification of the user's identity before granting access to resources.
	Protection against unauthorized access using multi-factor authentication.
	Monitoring and logging access attempts for security analysis.

Continuation of Table 1

Protective measure	The role in ensuring web application security
Means of XSS attack prevention	Validation and filtering of input data to prevent the execution of malicious scripts.
	Using Content Security Policy (CSP) to control resources.
	Sanitizing output data for safe content display.

Analysis of the presented protective measures demonstrates a multi-layered approach to ensuring web application security. The Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) protocol forms the basic level of protection, ensuring the confidentiality and integrity of data during transmission. Authentication systems create a second layer of defense, controlling access to resources and identifying users.

Cross-site scripting (XSS) attack prevention tools implement proactive protection at the data processing level, blocking potentially malicious code before its execution.

The comprehensive application of all three categories of defense mechanisms is critically important for creating a reliable security system. Each layer of protection compensates for the potential weaknesses of others, forming an effective multi-layered security architecture (defense-in-depth). The absence or insufficient implementation of any of these components creates vulnerabilities that can be exploited by attackers to compromise the web application.

III. MAIN VULNERABILITIES OF WEB APPLICATIONS AND METHODS OF PROTECTION

The collection and protection of user data is a top priority in ensuring the security of web applications, as information compromise can lead to serious consequences – from financial losses to breaches of confidentiality and reputational risks for organizations [11-17]. Modern web applications face a wide range of security threats, requiring a comprehensive approach to their protection. The most common vulnerabilities include XSS, Cross-Site Request Forgery (CSRF), and SQL injections, each of which has its own characteristics and requires specific countermeasures. XSS attacks are among the most common threats to web applications. These attacks allow attackers to inject malicious code into web pages viewed by other users. The concept of XSS attack protection is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Concept of protection against XSS attacks

At the «Validation and Sanitization» stage, all user-entered data is checked for potentially dangerous code. Special filters and regular expressions are used to detect and neutralize malicious scripts.

At the «Output Encoding» stage, all data displayed on the web page is processed to prevent the execution of JavaScript code. Special characters are converted into their HTML equivalents.

CSRF attacks exploit the web application's trust in an authenticated user, tricking them into performing unwanted actions without their knowledge or consent. An attacker creates a malicious request that is executed on behalf of the victim using their active session. This can lead to unauthorized financial transactions, changes to account credentials, modification of security settings, or the execution of other critical operations. The peculiarity of CSRF is that the attack exploits the browser's mechanism of automatically sending cookies, as a result of which the server cannot distinguish a legitimate request from a forged one.

The concept of protection against CSRF attacks is shown in Figure 2.

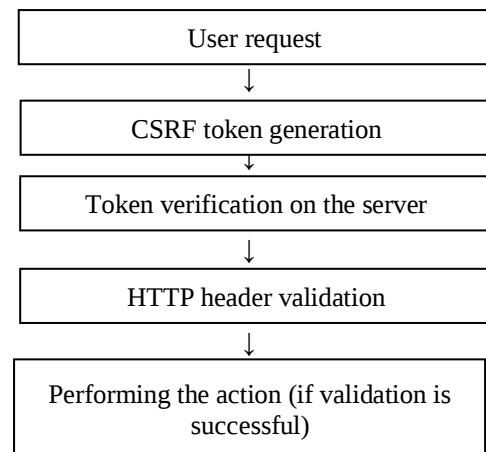


Fig. 2. The concept of protection against CSRF attacks

1. Generating unique tokens. For each user session, a unique CSRF token is generated and embedded into all forms and AJAX requests. This token serves as a cryptographic proof that the request originated from the legitimate application. The server validates the token upon receiving any state-changing request, comparing it against the token stored in the user's session. If the tokens do not match or the token is missing, the request is rejected. This mechanism effectively prevents attackers from forging requests, as they cannot predict or obtain the randomly generated token without access to the victim's session.

2. HTTP header verification. The server examines the Referer and Origin headers to confirm that requests originate from trusted sources. The Origin header indicates the domain that initiated the request, while the Referer header provides the full URL of the page from which the request was sent. By implementing strict validation of these headers, the server can identify and block requests coming from external or malicious domains. This approach adds an additional layer of defense, particularly effective against basic CSRF attacks where the attacker hosts the malicious content on a different domain.

3. Using SameSite cookies. Configuring cookies with the SameSite attribute prevents their transmission in cross-site

requests, significantly mitigating CSRF risks. The SameSite attribute can be set to "Strict" (cookies are never sent in cross-site requests), "Lax" (cookies are sent only with safe HTTP methods like GET from external sites), or "None" (cookies are sent with all requests, requiring Secure flag). By default, setting SameSite to "Strict" or "Lax" ensures that session cookies are only included in requests originating from the same site, making it nearly impossible for attackers to exploit the user's authenticated session from external domains.

SQL injection attacks allow malicious actors to execute arbitrary SQL commands within the application's database, potentially leading to data breaches, unauthorized data modification, or complete system compromise.

The concept of protection against SQL injection is illustrated in Figure 3.

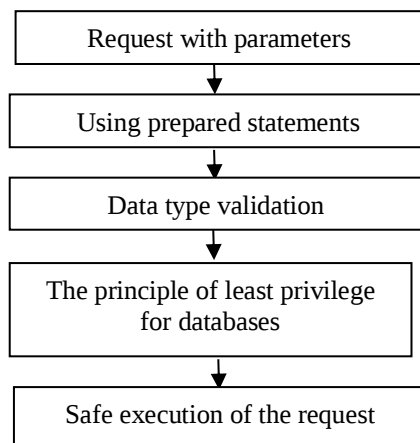


Fig. 3. Concept of NLP

1. Prepared statements. The use of parameterized queries ensures a clear separation between SQL code and data, preventing input data from being interpreted as SQL commands. In this approach, the SQL query structure is defined first with placeholders for user-supplied values, and then the actual data is passed separately as parameters. The database engine treats these parameters strictly as data values, not as executable code, regardless of their content. This technique eliminates the possibility of SQL injection even if an attacker attempts to inject malicious SQL syntax, as the database will never execute the injected code. Prepared statements also offer performance benefits through query plan caching and are supported by virtually all modern database systems and programming frameworks.

2. Input validation and sanitization. All data received from users undergoes rigorous validation to ensure compliance with expected types, formats, and acceptable value ranges. This includes implementing whitelist validation (accepting only known-good input patterns), checking data length constraints, verifying data types (integers, strings, dates), and rejecting inputs containing suspicious characters or SQL keywords. Additionally, input sanitization involves escaping special characters that have meaning in SQL context, such as quotes, semicolons, and comment markers. Multi-layer validation should occur both on the client side (for user experience) and critically on the server side (for security), as client-side validation can be easily bypassed by attackers.

3. Principle of least privilege. Database accounts used by the application are granted only the minimum permissions

necessary to perform their intended functions, significantly limiting the potential damage from a successful SQL injection attack. Instead of using administrative or root database accounts, the application should operate with restricted accounts that have access only to specific tables and can execute only required operations (select, insert, update, delete). For example, if a particular application component only needs to read data, its database account should not have insert, update, or delete privileges. Additionally, sensitive operations like drop table, create user, or access to system tables should be completely prohibited for application accounts. This layered security approach ensures that even if an attacker successfully injects SQL code, the scope of possible malicious actions remains severely limited.

IV. HTTPS AND CRYPTOGRAPHIC PROTECTION

The HTTPS protocol is a fundamental component of web application security, ensuring the encryption of data transmitted between the client and the server. The use of HTTPS not only protects confidential information from interception but also verifies the authenticity of the website.

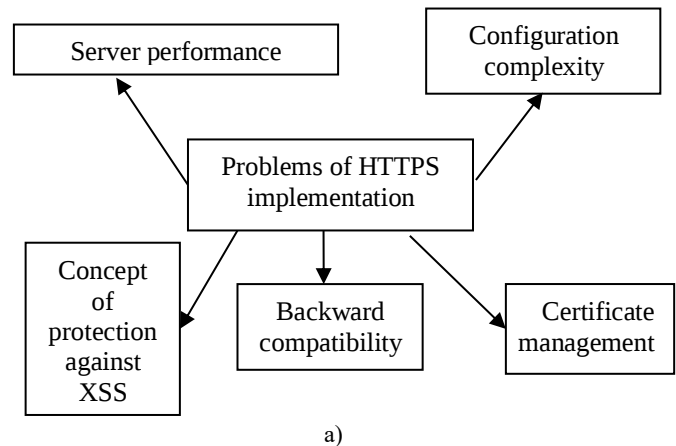
The principles of the HTTPS protocol are based on the use of SSL/TLS certificates and asymmetric encryption, which enable web applications to:

Ensure data confidentiality by encrypting all traffic between the client and the server;

Guarantee data integrity through the use of hash functions and digital signatures;

Verify server authenticity via a system of trusted certificate authorities.

The challenges and advantages of problems HTTPS are shown in Fig. 4, a, b.



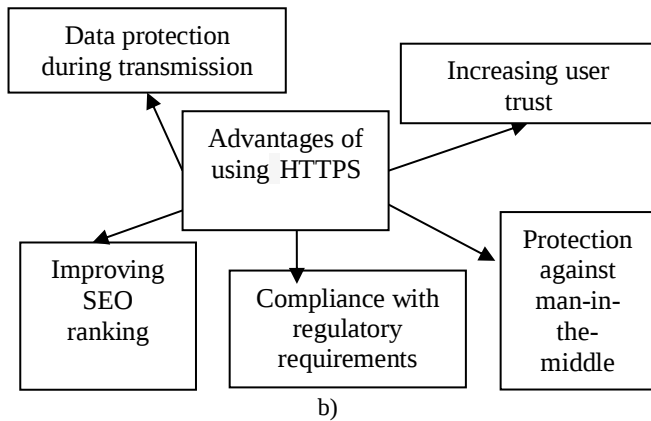


Fig. 4. Concept of deep learning and neural networks: a) Problems with HTTPS implementation; b) Advantages of using HTTPS

Problems of HTTPS implementation:

1. Server load. Additional computational overhead for encrypting and decrypting data, which can impact performance under high concurrent connections.

2. Certificate management. Requires regular renewal of SSL certificates and proper configuration of certificate trust chains.

3. Configuration complexity. Involves correct web server setup, selection of appropriate cipher suites, and configuration of security headers.

Advantages of Using HTTPS:

1. Data interception protection. Ensures the confidentiality of logins, passwords, financial data, and other sensitive information.

2. Increased user trust. Achieved through browser security indicators (green lock, «Secure» label).

3. Improved SEO Ranking. Search engines give preference to HTTPS sites in search results.

4. Regulatory Compliance. Meets standards like PCI DSS for payment card processing and GDPR for personal data protection.

Practical recommendations for HTTPS implementation:

1. Use HTTP Strict Transport Security (HSTS) to enforce HTTPS connections.

2. Configure Perfect Forward Secrecy for enhanced encryption key protection.

3. Implement Certificate Transparency for monitoring certificate issuance.

4. Utilize free certificates from Let's Encrypt to reduce implementation costs.

V. CONCLUSIONS

This research has conducted a comprehensive analysis of critical aspects of web application security in the context of constantly evolving cyber threats. The main achievements and contributions of this work include:

1. Systematic analysis of key vulnerabilities. The study has thoroughly examined the three most prevalent and dangerous web application vulnerabilities: XSS attacks, CSRF exploits, and SQL injections. For each vulnerability type, detailed attack mechanisms have been described along with their potential consequences, ranging from data theft to complete system compromise.

2. Development of comprehensive protection concepts. Visual concepts and multi-layered defense strategies have been developed for each identified vulnerability type. These

concepts demonstrate the practical implementation of protection mechanisms, including input validation, token generation, prepared statements, and the principle of least privilege. The presented approaches provide actionable guidance for developers and security specialists.

3. Evaluation of cryptographic protection and HTTPS protocol. The research has analyzed the fundamental role of the HTTPS protocol in ensuring web application security, examining both its advantages (data confidentiality, integrity verification, regulatory compliance) and implementation challenges (server load, certificate management complexity). Practical recommendations for HTTPS deployment have been formulated, including the use of HSTS, Perfect Forward Secrecy, and Certificate Transparency.

4. Substantiation of the defense-in-depth approach. The work emphasizes that effective web application security can only be achieved through a comprehensive, multi-layered protection strategy. The integration of HTTPS protocol, robust authentication systems, and vulnerability-specific countermeasures creates a resilient security architecture where each layer compensates for potential weaknesses of others.

The developed concepts and recommendations can be directly applied in the design and implementation of secure web applications. The systematic approach to security presented in this work enables organizations to:

- identify and prioritize protection against the most critical vulnerabilities;
- implement layered defense mechanisms adapted to specific threat landscapes;
- ensure compliance with international security standards and regulations;
- minimize risks of data breaches and associated financial and reputational losses.

Further development of this work should focus on analyzing emerging threats such as advanced persistent threats, zero-day exploits, and AI-powered attacks. Additionally, research on automated security testing tools, integration of machine learning for threat detection, and development of secure-by-design development methodologies represents promising directions for enhancing web application security.

The growing informatization of society and the increasing sophistication of cyber threats make the continuous improvement of web application security systems not just a technical necessity but a fundamental requirement for sustainable digital transformation across all sectors of the economy and society.

LIST OF REFERENCES

- [1] A. S. Andreiev, et al., "Computer games and Web design," *Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024»*, 2024, pp. 712-714
- [2] M. Rudenko, et al., "Overview of approaches to scaling relational databases in development and adaptation of web applications," *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 грудня 2024 р., м. Запоріжжя)*. [Електронний

- ресурс] /Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024, pp. 398-402
- [3] S. Sotnik, M. Rudenko, “Evaluating relational database scaling strategies in web engineering,” *International Conference on Advanced Trends In Radioelectronics and Infocommunications (ATRIC-2025) (May 21–22, 2025)*, Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, Ukraine, 2025, pp. 224-228
- [4] S. Sotnik et al., “Development Features Web-Applications,” *International Journal of Academic and Applied Research (IJAAR)*, 2023, Vol. 7, Issue 1, pp. 79-85
- [5] S. V. Sotnik, “Analysis of Personal Information Security Issues in Peacetime and Wartime,” *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2024, Vol. 8, Issue 10, pp. 108-113
- [6] S. V. Sotnik, “Features of using REST architecture for development of ARS for information systems,” *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», Коблево, 9–13 вересня 2024 р. Збірник праць. – Харків: ХНУРЕ, 2024, pp. 42 – 45*
- [7] A. Tverdokhlib, et al., “Intelligent tools for optimizing information and search engines,” *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024*, pp. 28-31
- [8] R. V. Marunich, et al., “Features of IoT application in the security sector,” *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025*, pp. 80-84
- [9] С. Сотник, “Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів,” *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2025, 1 (68), pp. 52-58
- [10] Y. I. Khalimonov, et al., “Integration of IoT into security systems: opportunities and risks,” *Комп’ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 20 листоп. 2024 р., 2024*, pp. 117-121
- [11] M. S. Achkan, et al., “Integration of cloud technologies into modern SCADA systems: prospects and challenges,” *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025*, pp. 26-29
- [12] R. V. Marunich, et al., “Modern IoT technologies for creating automated access systems,” *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports, 2025*, pp. 38-39
- [13] S. V. Sotnik, et al., “Analysis of searching methods for explosive objects using information technology and computer modeling,” *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 18-19 квітня 2024 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2024*, pp. 20-22
- [14] A. Konieva, et al., “Main trends in the development of automated image processing systems,” *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025*, pp. 68-7
- [15] S. Sotnik, “Integration of IoT into security systems: opportunities and risks,” *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 2024, 8 (11), pp. 56-61
- [16] K. A. Polikanov, et al., “Overview of modern technologies for residential automation,” *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025*, pp. 85-89
- [17] O. R. Kolbasa, et al., “The significance and necessity of automating the selection of sensors and actuators,” *«Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025, 2025*, pp. 63-67

Methods of automated monitoring and control system of greenhouse complex

Ivan Dolhosheia¹ Oleksandr Tsymbal²

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: ivan.dolhosheia@nure.ua

2. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: oleksandr.tsymbal@nure.ua

Abstract: The study considers methods of an automated monitoring and control system for a greenhouse complex aimed at increasing production efficiency and optimizing resource consumption. The proposed mathematical models describe the dynamics of the main microclimate parameters, in particular temperature, humidity, CO₂ concentration and soil moisture, which allows for precise process control. Based on the obtained models, a decision-making logic was built that combines threshold rules, fuzzy logic and adaptive control, ensuring flexibility and reliability in changing conditions. The numerical simulation demonstrated the system's ability to maintain stable environmental parameters with minimizing energy costs and water consumption. The results confirm that the implementation of such systems contributes to increasing yields, improving product quality and sustainable development of the agricultural sector in the conditions of Industry 4.0 and Industry 5.0.

Keywords: automated system, monitoring, greenhouse complex, intelligent control, mathematical modeling, fuzzy logic, resource optimization, microclimate.

I. INTRODUCTION

The modern development of the agricultural sector is impossible without the introduction of the latest technologies that ensure increased production efficiency, reduced resource consumption and stability of the results obtained. In this context, greenhouse complexes occupy a special place, since they allow creating optimal conditions for growing plants regardless of climatic fluctuations, seasons or geographical features of the region. However, the stability of such conditions requires constant monitoring and operational control of a large number of parameters, including temperature, humidity, lighting, carbon dioxide levels and mineral nutrition. Traditional control methods based on manual control or partially automated solutions are unable to provide the proper response speed and accuracy in maintaining the specified modes. That is why the development and implementation of complex automated greenhouse production monitoring and control systems based on modern information technologies, intelligent algorithms and integrated sensor networks is relevant. The use of such systems allows for real-time collection, processing and analysis of large amounts of data, which ensures adaptive regulation of processes and minimization of the human factor. This is of particular importance in the context of the transition to the concept of Industry 4.0 and Industry 5.0, where the combination of automation, artificial intelligence and sustainable development becomes a priority. Automated monitoring systems for greenhouse complexes contribute to the rational use of water and energy, reducing

crop losses, improving product quality and the economic attractiveness of production. In addition, given the global challenges associated with climate change and population growth, such technologies allow for the formation of a sustainable model of agricultural production focused on food security and environmental balance. Therefore, research into methods for an automated monitoring and control system for a greenhouse complex is extremely relevant and has significant practical and scientific significance.

II. DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR AN AUTOMATED MONITORING SYSTEM FOR A GREENHOUSE COMPLEX

The microclimate model (energy-thermal dynamics) is intended to describe the change in air temperature and greenhouse surfaces under the influence of heating/ventilation/insolation and heat losses. The model can be represented by the following models:

- continuous model (holding balance):

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{hvac} + Q_{sun}(t) + Q_{plant}(t) - UA(T_a - T_{out}) - \dot{m}_{vent} C_p (T_a - T_{out}) \quad (1)$$

- discrete (step Δt):

$$T_a[k+1] = T_a[k] + \frac{\Delta t}{C_a} (Q_{hvac}[k] + Q_{sun}[k] + Q_{plant}[k] - UA(T_a[k] - T_{out}[k]) - \dot{m}_{vent}[k] C_p (T_a[k] - T_{out}[k])) \quad (2)$$

Where: T_a - air temperature in the greenhouse (°C); T_{out} - outside temperature (°C); C_a - equivalent heat capacity of air/mass (J/°C); Q_{hvac} - heat flow from heating/cooling (W) (positive - heating); $Q_{sun}(t)$ - solar heat flux (W); $Q_{plant}(t)$ - heat exchange with plants (W) (may be a function of light/transpiration); UA - total heat loss coefficient (W / °C); $\dot{m}_{vent}$ - mass air flow through ventilation (kg/s); C_p - heat capacity of air (~1005 J/(kg·°C)).

Humidity model (moisture balance), purpose of this model, prediction and control of relative humidity (RH) and moisture content in soil/air. Mass balance of vapor in air:

$$V_a \frac{dp_v}{dt} = E_{plant} + S_{evap} - \dot{m}_{vent}(p_v - p_{v,out}) - \dot{m}_{cont} \quad (3)$$

Where can one go to relative humidity RH through saturated vapor density $p_{v,sat}(T_a)$: $RH = p_v / p_{v,sat}(T_a)$

V_a - greenhouse air volume (m^3); p_v - absolute density of water vapor (kg/m^3); E_{plant} - evaporation through plants (transpiration) (kg/s); S_{evap} - evaporation from soil/surfaces (kg/s); $p_{v,out}$ - vapor density outside; $\dot{m}_{cont}$ - condensation/precipitation (kg/s).

Soil moisture (single-level model):

$$\begin{aligned} \theta[k-1] \\ = \theta[k] \\ + \Delta t \left(\frac{q_{irrig}[k] - q_{drain}[k] - q_{uptake}[k]}{V_{soil}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Where: θ - soil volume moisture (m^3/m^3); q_{irrig} - water supply (m^3/s); q_{uptake} - water absorption by plants; q_{drain} - drain.

CO_2 model (mass balance), purpose - control of CO_2 concentration to optimize photosynthesis:

$$\begin{aligned} V_a \frac{dC_{CO_2}}{dt} = \dot{m}_{inj}(C_{inj} - C_{CO_2}) \\ - \dot{m}_{vent}(C_{CO_2} - C_{out}) \\ - R_{photo}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Where: C_{CO_2} - concentration CO_2 (ppm or mg/m^3); $\dot{m}_{inj}$ - injection costs CO_2 (m^3/s); C_{inj} - concentration in the supplied gas; C_{out} - external concentration CO_2 ; $R_{photo}(t)$ - uptake by plants (mass flow).

Biological growth model (simplified productivity), purpose - relationship between microclimate and growth rate / photosynthetic activity. Simple productivity function P :

$$P(t) = P_{max} \cdot f_T(T_a) \cdot f_{RH}(RH) \cdot f_L(I) \cdot f_{CO_2}(CO_2) \cdot f_\theta(\theta) \quad (6)$$

where each function $f_*(\cdot) \in [0,1]$ - efficiency coefficient (e.g. Gaussian or triangular optimum function). Example for temperature:

$$f_T(T) = \exp\left(-\frac{(T - T_{opt})^2}{2\sigma_T^2}\right) \quad (7)$$

Where: P_{max} - max. performance; T_{out}, σ_T - optimum/temp-spread; similarly for other factors.

Sensor model (observation), purpose - description of measurement errors and delays. Implementation as a linear model:

$$y[k] = Hx[k] + v[k] \quad (8)$$

Where: x - state vector (for example $[T_a, p_v, C_{CO_2}, \theta]$; y - vector of dimensions; H - observation matrix (usually single or sample); $v[k]$ - measurement noise.

Operator models of drives/actuators, purpose - dynamics of heating, ventilation, irrigation valves, lighting. The model for the actuator in discrete form has the following form:

$$\begin{aligned} Q_{hvac}[k+1] = Q_{hvac}[k] \\ + \frac{\Delta t}{\tau_{hvac}} (K_{hvac} u_{hvac}[k] \\ - Q_{hvac}[k]) \end{aligned} \quad (9)$$

To assess the state, it is proposed to use the Kalman filter (KF), the main purpose of which is to represent hidden quantities and filter noisy measurements:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k; \quad y_k = Hx_k + v_k \quad (10)$$

Decision-making system, hybrid architecture is proposed: (FALLBACK) + FUZZY LOGIC for fast decisions and M(odel)P(redictive)C(ontrol) for optimal management of energy-sensitive resources.

- rules (threshold, fast), which are designed to manage emergency and operational actions. Examples of rules in pseudocode:

If $T_a < T_{min}^{safe} \rightarrow$ turn on the heating on 100%;

If $RH > RH_{crit} \& T_a - T_{out} < \Delta T_{vent} \rightarrow$ open the ventilation;

If $\theta < \theta_{min} \rightarrow$ water.

These rules provide safety before optimization.

- Fuzzy logic, for adaptive actions. Purpose - smooth actions with uncertain or simultaneously conflicting requirements. Example for heating action u_{hvac} :

Input fuzzy variables: $E_T = T_{ref} - T_a$ (error), ΔT (rate of change)

Fuzzy sets: *NegativeLarge*, *NegativeSmall*, *Zero*, *PositiveSmall*, *PositiveLarge*.

Fuzzy rule base (a couple of examples):

- if E_T - *PositiveLarge* $\rightarrow u_{hvac}$ - *High*

- if E_T - *PositiveSmall* & ΔT - *Negative* $\rightarrow u_{hvac}$ - *Medium*.

Model Predictive Control (MPC), The purpose is to minimize the cost of energy while maintaining conditions for growth. The MPC formulation (discrete horizon N):

$$\begin{aligned} J = \sum_{i=0}^{N-1} ((T[k+i] - T_{ref})^2 Q_T \\ + (RH[k+i] - RH_{ref})^2 Q_{RH} \\ + \lambda_u \|u[k+i]\|^2) \end{aligned} \quad (11)$$

is subject to dynamic constraints (microclimate models, actuators) and constraints on u (saturation) and states (safety). MPC gives the optimal sequence of commands $u[k \dots k + N - 1]$; only the first step is applied (receding horizon).

Decision-making logic depending on parameters (combination):

1. Safety layer (reactive): Threshold rules are executed immediately (highest priority). Check:

$$\begin{aligned} T_a \notin [T_{min}^{safe}, T_{max}^{safe}], RH > RH_{crit}, C_{CO_2} \\ > C_{crit}, \theta < \theta_{crit} \end{aligned} \quad (12)$$

2. Estimation layer: update status via EKF/KF → get best score $\hat{x}[k]$.

3. Decision layer:

a) if the system is normal (within tolerances) - run MPC on horizon N to minimize energy and maximize performance.

b) if there are requirements for fast correction (for example, significant temperature deviation) - combine a fuzzy solution (fast smooth response) with MPC (MPC works on longer horizons).

4. Actuation layer: take into account the dynamics of actuators and execute commands through first-order models.

The developed mathematical models and decision-making logic in the automated monitoring and control system of the greenhouse complex provide a comprehensive approach to maintaining stable conditions for growing agricultural crops. Their advantage lies in the ability to accurately describe the dynamics of temperature, humidity, CO₂ concentration and soil moisture, which allows for adaptive response to changes in the external environment and internal processes. The use of heat and moisture balance models reduces energy consumption and water consumption, and the integration of plant growth models allows for focusing control not only on environmental parameters, but also on maximizing crop productivity. Built-in decision-making mechanisms that combine threshold rules, fuzzy logic and predictive control guarantee both a quick response in critical situations and optimization of work in normal conditions. Such a hybrid structure creates a balance between reliability and cost-effectiveness of the system, ensuring sustainable operation of the greenhouse complex. In addition, the use of state assessment algorithms allows to compensate for sensor errors and obtain more reliable data for decision-making. As a result, the implemented system not only increases yield and product quality, but also contributes to sustainable development through the efficient use of resources and reducing the impact of the human factor.

III. RESULTS OF NUMERICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

A program for numerical simulation based on Python was developed, and a 48-hour scenario with a step of 10 min (288 steps) was simulated. The model includes: energy-thermal dynamics of air (heat balance with solar inflow and heat loss), a simple model effect of plants (heat and evaporation), ventilation as a mass flow of air, soil moisture dynamics (one-volume model), and CO₂ balance. The decision-making logic is implemented as multi-level: safety (threshold emergency actions) → fuzzy controller for smooth HVAC control → simple rule solutions for ventilation/irrigation/CO₂ supply. The actuators have first-order dynamics. The input external conditions are the daily sinusoidal trend of external temperature and solar radiation. The obtained results of numerical simulation are presented in Figures 1-5.

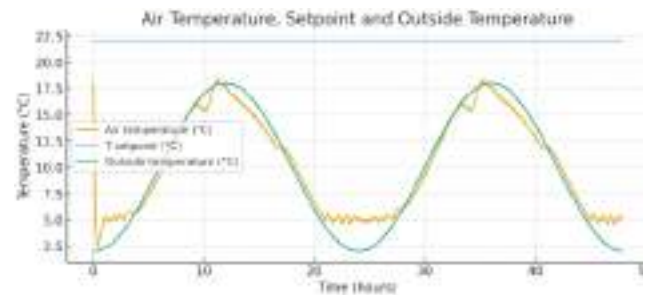


Figure 1. – Graph Air Temperature, Setpoint and Outside Temperature

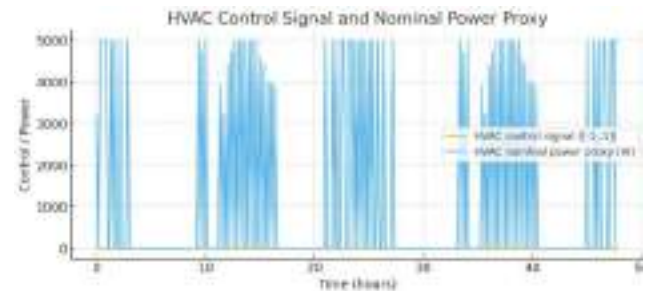


Figure 2. – Graph HVAC Control Signal and Nominal Power Proxy

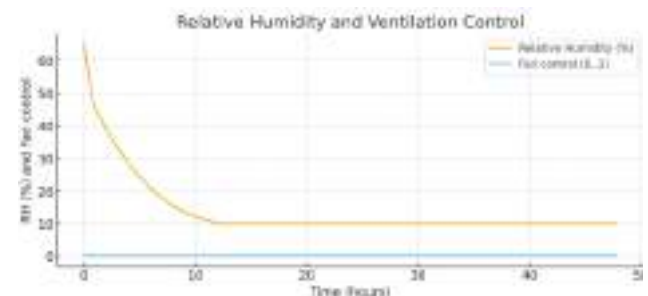


Figure 3. – Graph Relative Humidity and Ventilation Control

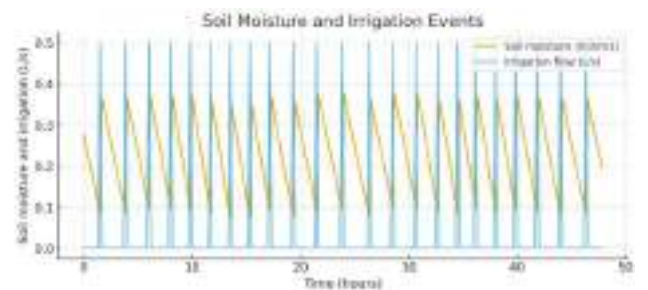


Figure 4. – Graph Soil Moisture and Irrigation Events

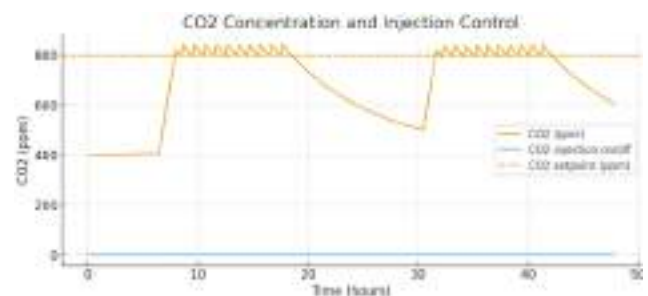


Figure 5- Graph CO₂ Concentration and Control

The temperature graph shows that the greenhouse temperature follows the external diurnal trend, but is smoothed by HVAC and thermal inertia; fuzzy HVAC

control together with actuator dynamics kept the air closer to the set 22°C, and in critical cases emergency limits were triggered. Energy consumption is manifested in the form of HVAC power peaks during morning warm-up or afternoon cooling; the obtained values confirm moderate energy consumption concentrated at key moments of the day. Humidity dynamics demonstrate that the ventilation rules effectively reduce RH when needed; the model shows a decrease in humidity and the system reaching moderate values, which indicates the reliability of the ventilation rule. Soil moisture and irrigation reflect water supply pulses when humidity drops below a threshold; the frequency of starts determines how often to humidify, which is important for water supply planning. CO₂ control maintained the concentration near 800 ppm during daylight hours; the supply occurred mainly when there was solar flux, which is consistent with plant physiology and reduces wasteful CO₂ consumption.

The hybrid logic works as intended: emergency rules take priority and protect against dangerous deviations; fuzzy control generates smooth signals for HVAC and prevents abrupt switching; simple predictive actions (cooling in hot weather) reduced overheating from solar radiation. The irrigation logic consistently maintains humidity within safe limits, although the size and duration of the water pulses can be optimized. CO₂ control, limited to periods of light, meets biological needs and makes the system more economical.

IV. CONCLUSION

The study substantiated the feasibility of using automated monitoring and control systems for greenhouse complexes as a key element in increasing the efficiency of modern agricultural production. The developed mathematical models allowed describing the dynamics of temperature, humidity, CO₂ level and soil moisture, which creates the basis for the implementation of intelligent control algorithms. The decision-making logic, built on a combination of threshold rules, fuzzy logic and adaptive regulation, ensures flexibility and reliability of the system's operation in various scenarios. Numerical modeling confirmed the system's ability to maintain optimal microclimate parameters with minimal energy and resource consumption. The results obtained indicate that the implementation of such solutions contributes to an increase in yield, product quality and sustainable development of the agricultural sector.

REFERENCES

- [1] Zia, A., & Haleem, M. (2025). Bridging research gaps in industry 5.0: Synergizing federated learning, collaborative robotics, and autonomous systems for enhanced operational efficiency and sustainability. *IEEE Access*.
- [2] Dobrzańska, M., & Dobrzański, P. (2025). Simulation Model as an Element of Sustainable Autonomous Mobile Robot Fleet Management. *Energies*, 18(8), 1894.
- [3] Chen, Z., Wang, W., Liu, W., Liu, Y., & Xi, J. (2025). The Effects of Communication Delay on Human Performance and Neurocognitive Responses in Mobile Robot Teleoperation. *arXiv preprint arXiv:2508.18074*.
- [4] Gupta, S., Mamodiya, U., Hossain, A. Z., & Al-Gburi, A. J. (2025). A Framework for Bluetooth-Based Real-Time Audio Data Acquisition in Mobile Robotics. *Signals*, 6(3), 31.
- [5] Delgado Asencio, C., Segura Manzano, F., & Andújar Márquez, J. M. (2025). Hygrobot: Hydrogen-Powered Mobile Robotic Platform for Rough Terrain: Electro-Mechanical Design, Physical Implementation, and Experimental Testing. *Applied Sciences*, 15(9), 5028.
- [6] Pastrana Triana, M. A., Santana, M. S., Mendoza Peñaloza, J. A., Nunes de Oliveira, L. H., & Muñoz Arboleda, D. M. (2025). Comparison of gmdh and perceptron controllers for mobile robot obstacle following/avoidance with hardware-in-the-loop validation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111(1), 1-23.
- [7] Liu, F., & Tahir, R. (2025, May). Optimising FPV Drone Cinematography Experience: Transforming Flight Planning Workflow by Integrating Ground Control Software. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 85-110). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [8] Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O., & Khudov, V. (2025). Image Segmentation Methods for Kamikaze FPV Drones Targeting to Aid Critical Energy National Infrastructure Assets Protection. In *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport* (pp. 139-151). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [9] Conejero, M. N., Montes, H., Bengochea-Guevara, J. M., Garrido-Rey, L., Andújar, D., & Ribeiro, A. (2025). A collaborative robotic fleet for yield mapping and manual fruit harvesting assistance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110351.
- [10] Abou-Mehdi-Hassani, F., Zaguia, A., Ait Bouh, H., & Mkhida, A. (2025). Systematic literature review of smart greenhouse monitoring. *SN Computer Science*, 6(2), 95.
- [11] Medina, R., Canaza, B., Sullon, A., Ivanovich, M. E., & Maquera, G. (2025). Intelligent automated control of abiotic water and thermal stress in greenhouses for the optimization of pre-basic potato production. *Smart Agricultural Technology*, 101272.
- [12] Vishwakarma, D. K., Yadav, D., Kumar, R., Kumar, A., Wani, A. W., & Qayoom, S. (2025). Green House Technology for Controlled Environment-Advances in Green House Automation and Control. In *Greenhouse Technology for Sustainable Agriculture* (pp. 111-139). Apple Academic Press.
- [13] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [14] Agrawal, P., Sophia, S., Aravindan, C., Sendilvelan, S., Rao, K. H., & Bhavani, K. S. (2025). Development of greenhouse automation using machine learning with remote monitoring control. In *Hybrid and Advanced Technologies* (pp. 48-53). CRC Press.
- [15] Nagarsheth, S., Agbossou, K., Henao, N., & Bendouma, M. (2025). The Advancements in Agricultural Greenhouse Technologies: An Energy Management Perspective. *Sustainability*, 17(8), 3407.
- [16] Guan, H. (2025). Greenhouse environmental monitoring and control system based on improved fuzzy PID and neural network algorithms. *Journal of Intelligent Systems*, 34(1), 20240079.

- [17] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [18] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [19] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [20] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [21] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [22] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [23] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [24] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [25] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [26] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [27] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [28] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [29] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [30] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [31] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [32] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [33] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [34] Yevsieiev, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference*, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.
- [35] Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали ІІІ Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів*, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р. - Одеса : ОНТУ, 2023. - С. 21-23.
- [36] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [37] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors. In *2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (Vol. 1, pp. 247-251). IEEE.

Development of a model for decentralized control of a group of collaborative robot manipulators

Svitlana Maksymova¹, Pavlo Shakhov²

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: svitlana.milyutina@nure.ua @nure.ua

2. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: pavlo.shakhov@nure.ua

Abstract: The paper considers an approach to developing a model for decentralized control of a group of collaborative robot manipulators, focused on increasing autonomy, adaptability, and safety in a dynamic production environment. The proposed solution allows minimizing dependence on centralized computing resources, reducing the risks of system failures, and ensuring effective interaction of robots in the joint performance of complex manipulation tasks. The results of the study demonstrate the prospects of decentralized models for implementing the concepts of Industry 5.0.

Keywords: decentralized control, collaborative robot manipulators, multi-agent systems, adaptability, Industry 5.0.

I. INTRODUCTION

The modern development of robotics is increasingly focused on the creation of collaborative systems capable of effectively interacting with humans and with each other in a shared working environment. The increasing complexity of production processes, the requirements for flexibility and increased productivity necessitate the development of new control models that ensure adaptability and reliability. Robot manipulators that perform complex manipulation tasks in conditions of limited space and high variability of actions attract particular attention. Traditional centralized control systems have significant limitations related to scalability, vulnerability to failures and high requirements for computing resources. In this context, decentralized control is a promising approach that allows reducing the risks of critical failures, increasing the level of agent autonomy and ensuring effective interaction in heterogeneous robot teams. Research in this area is becoming particularly relevant within the framework of the Industry 5.0 concept, which envisages harmonious cooperation between humans and robotic systems. At the same time, the lack of sufficiently developed models capable of taking into account the dynamics of the environment and the variability of teams determines the scientific and practical significance of the topic. Thus, the creation of a model of decentralized control of a group of collaborative robot manipulators is an important step in the development of effective, safe and adaptive robotic systems.

II. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF DECENTRALIZED CONTROL OF A GROUP OF COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATORS

The decentralized control model of a group of robots was chosen to ensure scalability and fault tolerance of the system,

since the absence of a single control center minimizes the risk of failures in the event of a single node failure. This approach allows each robot to make decisions based on local information and data exchange with neighboring agents, which reduces delays and improves adaptability in a dynamic environment. To formalize the interaction between agents, a communication graph is used, which reflects the structure of connections between nodes and guarantees consistency of actions through consensus algorithms. The communication graph makes it possible to determine which robots exchange data and take into account restrictions on the communication range. In the framework of the study, the communication graph is described as a directed or undirected graph that provides symmetry or asymmetry of data exchange.

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(t) &= (\mathcal{V}, \mathcal{E}(t)), |\mathcal{V}| = N \\ \mathcal{N}_i(t) &= \{j: (i, j) \in \mathcal{E}(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

Where: $\mathcal{V}$ - a set of vertices, where each vertex corresponds to a separate robot or agent of the system;

$\mathcal{E}(t)$ - set of oriented or unoriented edges at a point in time t , which determine the presence of active communication channels between robots;

$|\mathcal{V}| = N$ - the total number of robots (nodes) in the system, which determines the size of the network;

$\mathcal{N}_i(t)$ - set of neighbors of a node i at a point in time t , that is, those agents with which robot i can directly exchange data.

In general, $\mathcal{N}_i(t) = \{j: (i, j) \in \mathcal{E}(t)\}$ indicates that a connection exists if the edge from i to j belongs to the set $\mathcal{E}(t)$. Thus, these parameters allow us to dynamically describe the topology of connections in a group of robots and ensure the correct operation of decentralized control algorithms.

The safety conditions of Control Barrier Functions (CBF) in the end effector (EE) space are represented by three cases:

- inter-robot distances (prevents robot collisions by ensuring a minimum safe distance)

$$\begin{aligned} h_{ij}(p_i, p_j) &= \|p_i - p_j\|^2 - (r_i + r_j + d_m)^2 \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

- from a person (determines an elliptical safety zone for a person, taking into account their predicted movement and uncertainty)

$$h_{iH}(p_i, p_H) = (p_i - p_H)^T \sum_H^{-1} (t) (p_i - p_H) - R_{safe}^2(t) \geq 0 \quad (3)$$

- from obstacles through SDF (the condition guarantees the avoidance of collisions with objects or walls, taking into account the changing environment):

$$h_{iO}(p_i) = \phi(p_i, t) - d_{min} \geq 0 \quad (4)$$

Where: p_i, p_j - positions of robots i and j in space;

$\|p_i - p_j\|^2$ - square of the distance between two robots;

r_i, r_j - radii of safe zones for each robot (taking into account their dimensions);

d_m - additional minimum safety buffer between robots;

p_H - position of a person in the work area;

$R_{safe}^2(t)$ - dynamic radius of the safe zone around a person;

$\phi(p_i, t)$ - distance from the robot to the nearest static or dynamic obstacle at a given time t ;

d_{min} - minimum permissible distance to an obstacle.

The human model is represented as a dynamic obstacle, and consists of the following four basic parameters:

- human state

$$\mathcal{Y}_H = [p_H^T, \dot{p}_H^T]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (5)$$

Where: $\mathcal{Y}_H$ - the vector of the human state in the robot's workspace, including both position and velocity;

$p_H \in \mathbb{R}^3$ - vector of spatial coordinates (position) of a person in three-dimensional space, usually in the coordinate system of the work area or the robot's base system;

$\dot{p}_H \in \mathbb{R}^3$ - vector of linear velocities of human movement (change in position over time);

p_H^T - transposed position vector, used to form the complete state into a single column;

$\dot{p}_H^T$ - transposed velocity vector;

$\mathbb{R}^6$ - state space dimension: 3 coordinates for position and 3 for velocity, total 6 components.

- trajectory forecast for the forecasting horizon in time (T_H):

$$T_H: \hat{p}_H(t+k) \quad (6)$$

Where: T_H - the time horizon, which determines the number of discrete steps in the future for which the person's position is predicted;

$\hat{p}_H(t+k)$ - predicted position of a person at a given moment in time $t+k$, $\forall k \in [1, T_H]$;

t - current point in time from which the forecast begins;

k - forecast step index within the horizon T_H , used for iterative trajectory prediction;

$\hat{p}_H$ - the symbol " $\hat{\cdot}$ " indicates that this is not a real position, but an estimate or prediction obtained from a motion model (for example, a CV model - constant velocity or using a Kalman filter).

- a person's safety (comfort) zone:

$$R_{safe}(t) = R_0 + \alpha \|\dot{p}_H(t)\| \quad (7)$$

Where: $R_{safe}(t)$ - the radius of the human safety (comfort) zone at time t , which determines the minimum distance at which the robot can approach the human without disrupting comfortable interaction;

R_0 - basic (static) radius of the safety zone, which takes into account a person's personal space, even when they are stationary;

α - a proportionality coefficient that determines how much a person's speed affects the size of the safety zone; larger values of α increase the zone at high speeds;

$\|\dot{p}_H(t)\|$ - the norm of the person's velocity vector at time t , which reflects the intensity of his movement; the faster the person moves, the larger the safety zone.

Model 2.23 allows adaptively changing the size of the comfort zone depending on the person's behavior.

- risk field, this is a Gaussian risk field around the predicted position of the person, where the risk decreases with distance according to the Mahalanobis distance:

$$\mathcal{R}(x, y) = \exp \left(-\frac{1}{2} (x - \hat{p}_H(t))^T \sum_T^{-1} (t) (x - \hat{p}_H(t)) \right) \quad (8)$$

Where: $\mathcal{R}(x, y)$ - dimensionless risk intensity at a planar point $x = [x, y]^T$, i.e. the closer to the person, the higher the value (maximum 1 in the center);

$x = [x, y]^T$ - current 2D position in the work plane in which we assess the risk; used in planning EE/link trajectories;

$\hat{p}_H(t) \in \mathbb{R}^2$ - predicted position of the person at time t , obtained from the prediction/filter model;

$(x - \hat{p}_H(t))^T \sum_T^{-1} (t) (x - \hat{p}_H(t))$ - squared Mahalanobis distance, which measures "how many sigmas" a point x is from the center, taking into account directional uncertainty;

$\exp(\cdot)$ - a set specifying a smooth risk decay; the absence of a normalizing factor means that this is a relative risk/cost field, suitable as an additional part of the objective function in QP/MPC or as a weight layer in CBF constraints.

The local Quadratic Programming/Model Predictive Control (QP/MPC) control problem at speeds is such that at each step for robot i , QP is solved:

$$\min_{q_i} \|J_{p,j} \dot{q}_i - v_i^{task}\|_{Q_v}^2 + \|\dot{q}_i\|_{R_t}^2 + \lambda_\mu (\mu_* - \mu_i(q_i))^2 + \lambda_\xi \|J_{p,i} \dot{q}_i - \hat{v}_{N_i}\|^2 \quad (9)$$

Where: $\dot{q}_i$ - vector of joint velocities of robot i , the optimization variable to be found;

$J_{p,j}$ - positional part of the Jacobian matrix for robot i , reflecting the relationship between the joint velocity and the linear velocity of the end-effector;

v_i^{task} - target speed of the working body (end effector) to perform a specific task (e.g., following a trajectory);

$\|J_{p,j}\dot{q}_i - v_i^{task}\|_{Q_v}^2$ - the first term of the functional that minimizes the deviation from the desired end-effector speed with a weight matrix Q_v , what determines the importance of this task;

$\|\dot{q}_i\|_{R_\tau}^2$ - the second term that minimizes the energy or steering torque (due to the speeds), with a weight matrix R_τ , which provides regularization for smoothing motion;

$\lambda_\mu(\mu_* - \mu_i(q_i))_+$ - fine for violation of manipulability restrictions;

$\mu_i(q_i)$ - robot manipulability indicator i ;

μ_* - minimum permissible value of manipulability;

$(\cdot)_+$ - means the positive part (the penalty is activated if $\mu_i < \mu_*$);

λ_μ - weighting factor for this penalty;

$\lambda_\xi \|J_{p,i}\dot{q}_i - \hat{v}_{N_i}\|^2$ - term for matching the speed with the average speed of neighbors in the communication graph;

$\hat{v}_{N_i}$ - predicted or average speed of neighboring robots N_i ;

λ_ξ - the weight of this agreement, which determines the importance of coordination.

III. RESULTS OF NUMERICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

To conduct a numerical simulation of the synchronization of physical and virtual collaborative robots, a time interval from 0 to 10 seconds was used, which was discretized into 500 points to ensure smooth graphs and accuracy of calculations. The trajectory of the physical robot was modeled as a sinusoidal function with an amplitude of 1 and the addition of random noise with an intensity of 0,05, which simulates real fluctuations in sensor measurements. The virtual robot reproduced the same trajectory, but with a time shift of 0,2 seconds, which allows us to assess the system's ability to compensate for the delay between the physical and digital models. To analyze the synchronization error, we used the difference in the states of the physical and virtual robots at each time point. The neural network received normalized time data in the range from 0 to 1 as input, which allowed us to avoid the influence of scale in the calculations. The network architecture consisted of one hidden layer with 10 neurons, random weights were generated based on a normal distribution, and the ReLU activation function was used to model nonlinearity. The output of the network approximated the sine target function, which made it possible to evaluate the effectiveness of artificial intelligence in reproducing the dynamics of the robot's movement. Thus, the selected numerical parameters

ensured the reproduction of both the physical characteristics of the robot and the process of its virtual synchronization using a digital twin. The obtained results of the numerical simulation are presented in Figures 1-3.

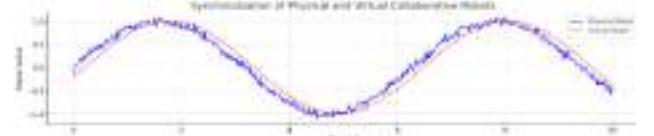


Figure 1. – Synchronization of Physical and Virtual Collaborative Robots Graph

Synchronization of Physical and Virtual Collaborative Robots (Fig. 1), shows the trajectories of physical and virtual collaborative robots, where their approximation and deviation during the synchronization process are visible.

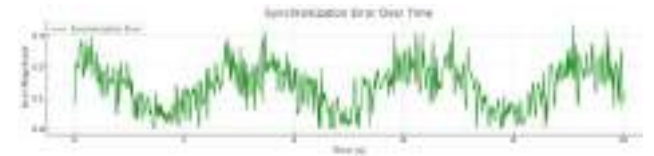


Figure 2. – Synchronization Error Over Time Graph

Synchronization Error Over Time (Fig. 2) reflects the change in synchronization error over time, which makes it possible to assess the stability and efficiency of the robot motion coordination process.

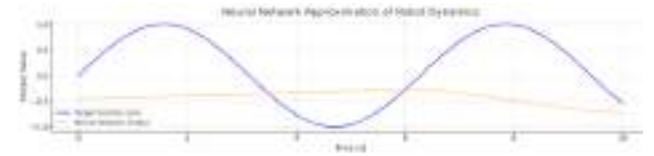


Figure 3. – Neural Network Approximation of Robot Dynamics Graph

Neural Network Approximation of Robot Dynamics (Fig. 3) demonstrates the operation of a simple neural network that approximates the dynamics of robot motion and allows modeling the behavior of the system in real time.

III. CONCLUSION

The study showed that the use of digital twins in combination with artificial intelligence creates an effective tool for synchronizing physical and virtual collaborative robots in dynamic conditions. Numerical modeling confirmed the possibility of accurately reproducing the movements of a physical robot in a virtual environment, taking into account time shifts and sensor errors, which significantly increases the accuracy and reliability of control. The use of neural networks provided the possibility of adaptive learning of the system and approximation of complex dynamic characteristics to real scenarios, which is key for work in Industry 5.0 conditions. The results demonstrated the ability to reduce the average synchronization error and improve the stability of the interaction between the real and digital environments. The proposed approaches can be applied to build integrated control systems capable of quickly responding to changes in external factors and interaction with a person. The use of

mathematical models made it possible to analyze the main parameters of the system and determine the optimal operating modes of digital twins. The results obtained create the basis for further research aimed at developing hybrid control architectures using artificial intelligence methods and multi-agent models.

REFERENCES

- [1] Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O., & Khudov, V. (2025). Image Segmentation Methods for Kamikaze FPV Drones Targeting to Aid Critical Energy National Infrastructure Assets Protection. In *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport* (pp. 139-151). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [2] Conejero, M. N., Montes, H., Bengochea-Guevara, J. M., Garrido-Rey, L., Andújar, D., & Ribeiro, A. (2025). A collaborative robotic fleet for yield mapping and manual fruit harvesting assistance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110351.
- [3] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [4] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
- [5] Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for CyberPhysical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
- [6] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18.
- [7] Mustafa, S. K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 139-145.
- [8] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16(2), 441-455.
- [9] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. In *IJCAI* (pp. 18-25).
- [10] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
- [11] Maksymova, S., Yevsieiev, V., Chala, O., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND THE RULES OF RULE-BASED SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 526-538.
- [12] Невлюдов, І. ІІІ., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
- [13] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [14] Yevsieiev V. Mobile Robots and Autonomous Vehicles in the Mobility as a Service (MAAS) Concept / V. Yevsieiev // *Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025 : Theses of Reports of I st I International Conference*, April 21, 2025. - Kharkiv, 2025. - P.7-8.
- [15] Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025 : Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference*, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17
- [16] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). HR data visualization of the distance to the object in the collaborative robot workspace based on hc-sr04 sensor. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 388-401.
- [17] Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 34-46.
- [18] Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference*, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
- [19] Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 1187-1202.
- [20] НЕВЛЮДОВ, І., ЄВССЄВ, В., & ГУРІН, Д. (2025). МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО ПРОЦЕСНОГО ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ АЛОКАЦІЇ ЗАВДАНЬ МІЖ ЛЮДЬМИ ТА КАЛАБОРАТИВНИМИ РОБОТАМИ В РАМКАХ ІНДУСТРІЙ 5.0. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1(1 (92)), 157-163.

Integration of Artificial Intelligence in Assistive Robots: Challenges and Opportunities

Stetsenko Kateryna¹

1. CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: kateryna.stetsenko2@nure.ua

Abstract: Assistive robots are increasingly becoming an essential component in providing support to people with disabilities and elderly individuals. The integration of artificial intelligence (AI) enhances their capability to interact naturally with humans, understand context, and provide adaptive assistance. This article discusses current AI applications in assistive robotics, technical and ethical challenges, and opportunities for future development. The study also includes an overview of experimental mobile robotic platforms with manipulator capabilities.

Keywords: Assistive robotics, artificial intelligence, human-robot interaction, mobile manipulator, adaptive assistance.

I. INTRODUCTION

Assistive robots are designed to provide support in daily activities, rehabilitation, and social interaction for individuals with limited mobility or cognitive impairments [1,2]. Modern systems increasingly incorporate artificial intelligence (AI) to enhance functionality, enabling autonomous navigation, human recognition, speech understanding, and context-aware responses (Fig.1) [3].



Fig.1. An older person interacting with a robot to study trust in robot-provided drug advice, examining preferences for robot information-based versus recommendation-based guidance[3]

The present study relates these AI advancements to the development of a mobile robotic platform with a manipulator, aimed at assisting people with disabilities. This robot integrates AI-driven modules for speech recognition, voice response, and psychological support, aligning with recent trends in socially assistive robotics [4,5].

II. AI-DRIVEN PERCEPTION AND INTERACTION IN ASSISTIVE ROBOTS

AI enables assistive robots to perceive and interpret multiple modalities of human communication, including speech, facial expressions, gestures, and emotional cues, allowing for highly personalized interactions [1,4]. Advanced natural language processing (NLP) modules, such as speech-to-text recognition and AI conversational engines, allow robots to understand user commands and generate contextually appropriate responses. These systems not only perform functional tasks, but also provide conversational engagement, which is essential for social interaction and psychological support [5]. By enabling responsive dialogue, robots can improve human-robot rapport, increasing trust and acceptance.

AI-powered perception systems leverage state-of-the-art computer vision frameworks such as OpenCV, DeepFace, and YOLO-based object detection models to perceive surroundings with high accuracy [3,6]. Real-time analysis of video streams from onboard cameras allows the detection of obstacles, recognition of familiar faces, tracking of user movements, and assessment of environmental conditions such as lighting and spatial layout. These capabilities enable robots to autonomously navigate indoor spaces, avoid collisions, and execute manipulator tasks safely. For example, a robot can locate and grasp objects, follow a user, or adjust its position in response to dynamic environmental changes (Fig.2).



Fig.2. Screenshot of computer vision object and face recognition in real-time using DeepFace [7]

Machine learning models and decision-making algorithms enhance task prioritization and adaptive behavior [1,8]. Reinforcement learning-based task scheduling and adaptive response logic determine optimal sequences of actions, including which objects to manipulate first, when to provide verbal guidance, or when to engage in social interaction. Such adaptability ensures effective assistance, taking into account both immediate needs and longer-term patterns of behavior.

Developing AI-driven assistive robots requires seamless integration of hardware and software components to ensure real-time performance and reliability [1-3]. This includes combining mobile platforms, manipulator arms, sensors, cameras, microphones, and embedded controllers with AI

modules for speech recognition, computer vision, and decision-making. Each subsystem must communicate efficiently to avoid delays or conflicts during robot operation (Fig.3).

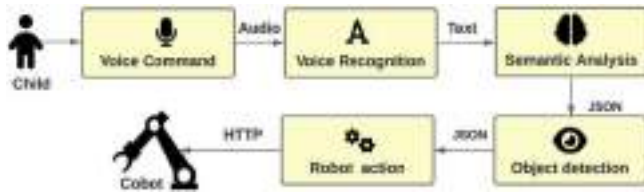


Fig.3. Screenshot of computer vision object and face recognition in real-time using DeepFace [9]

Several real-world assistive robots demonstrate the practical application of these technical features. For instance, the Aibo robotic dog by Sony has been used in therapy for elderly individuals and children with autism. Aibo combines social engagement with autonomous behavioral algorithms, responding to touch, speech, and environmental stimuli to promote emotional well-being and companionship. Its AI-driven adaptive interaction highlights the importance of perceiving user behavior and adjusting responses in real time.

Similarly, the Pepper humanoid robot by SoftBank Robotics has been deployed in hospitals, nursing homes, and rehabilitation centers. Pepper is equipped with speech recognition, facial expression analysis, and emotion detection, allowing engagement in socially assistive tasks such as providing reminders, guiding patients through exercises, or offering conversational companionship. Its humanoid form factor facilitates natural interaction through gestures, posture, and proximity, which significantly enhances user acceptance.

Technically, Pepper integrates multiple sensors—including RGB-D cameras, microphones, and tactile sensors—processed via AI-driven modules to deliver context-aware behavior. Multi-modal perception aligns with the architecture of modern assistive robots, coordinating manipulator actions with voice commands and environmental sensing.

From a hardware perspective, modern assistive robots combine mobile platforms, robotic manipulators, and modular sensor arrays. Mobility is often provided through wheeled or omnidirectional bases, which navigate constrained spaces while avoiding obstacles and interacting safely with humans. Manipulators, ranging from simple two- or three-degree-of-freedom arms to sophisticated anthropomorphic devices, allow robots to perform utility tasks such as fetching objects, pressing buttons, or assisting with feeding. AI enables predictive manipulation strategies, where the robot anticipates user intentions based on prior interactions or contextual cues. For example, if a patient consistently requests water at a certain time, the system can proactively deliver it, demonstrating autonomy and user-centric design.

Software frameworks employ machine learning models, including reinforcement learning for optimizing task sequences and supervised learning for classification tasks such as gesture recognition, emotion detection, and contextual speech interpretation [1,5,8]. Multi-modal interfaces, including gesture-based input, touchscreen

interfaces, and augmented reality overlays, increase accessibility for users with varying cognitive and physical abilities [3,4].

Technical challenges include synchronizing voice recognition with manipulator actions, ensuring accurate facial analysis in dynamic lighting conditions, and managing limited onboard computing power [1-3]. Cloud-based AI processing can mitigate these constraints by handling natural language understanding, contextual reasoning, and adaptive decision-making remotely, balancing computation load and energy efficiency [3,6].

Integrating assistive robots with Internet-of-Things (IoT) devices expands functionality, enabling real-time data sharing, environmental monitoring, and coordinated assistance [8]. Linking robots with smart home devices such as automatic lighting, temperature controls, or smart doors allows adaptive environmental adjustments for user comfort and safety [1,6].

Several technical challenges were observed. One major difficulty was synchronizing voice recognition with manipulator actions. For example, if a user verbally requested an object, the system had to accurately detect the command, interpret its intent via natural language processing, and coordinate the manipulator to pick up the object—all in real time. Any latency could result in incorrect movements or unintended actions [1,2]. Another significant challenge was ensuring accurate facial analysis in dynamic lighting conditions. Varying illumination and shadows affected the robot's ability to correctly recognize users' faces and emotions, which is crucial for personalized assistance and adaptive social interaction [3].

The integration of AI also raises ethical and social concerns, particularly related to privacy, data security, and over-reliance on technology [5]. Assistive robots process sensitive personal information, including speech recordings and facial data, which must be stored and transmitted securely. Ensuring encryption, access control, and compliance with data protection standards is essential. Additionally, social acceptance and trust are critical factors; users may hesitate to rely on robots if they perceive them as intrusive or error-prone [4,5]. Transparent operation, clear feedback, and user-friendly interfaces are necessary to build confidence in assistive robots.

Another key constraint in assistive robotics is the limited onboard computing power. Many mobile platforms have restricted energy and processing resources, making it challenging to run computationally intensive AI algorithms locally. In the master's experimental platform, this limitation was addressed by leveraging cloud-based AI processing for natural language understanding, contextual reasoning, and adaptive decision-making [3,6]. This hybrid approach allows the robot to offload heavy computations while maintaining responsiveness. At the same time, careful optimization of data transmission and energy consumption ensures that the system remains efficient and autonomous during extended operation.

AI enables assistive robots to deliver highly adaptive and personalized support for users with diverse needs and abilities [1,4]. By analyzing user behavior and preferences over time, AI can predict which tasks or interventions are most relevant, thereby anticipating user needs before explicit requests are made. For example, predictive behavior

modeling could allow a robot to autonomously fetch frequently used objects, remind the user of scheduled activities, or suggest exercises based on daily routines. Emotion-aware interaction, achieved through sentiment analysis of speech, facial expressions, and body language, further enhances user engagement, providing psychological support and social interaction for individuals who may experience isolation (Fig.4) [5].

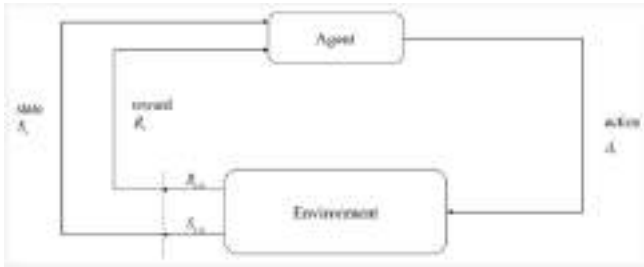


Fig.4. Conceptual diagram of AI adaptive support loop [10]

Integrating assistive robots with Internet-of-Things (IoT) devices significantly expands their functionality, enabling real-time data sharing, environmental monitoring, and coordinated assistance [8]. For instance, linking a mobile robot with smart home devices, such as automatic lighting, temperature controls, or smart doors, allows the robot to adjust the environment dynamically for the user's comfort and safety [1,6]. This connectivity also enables remote monitoring by caregivers or family members, ensuring timely intervention in case of emergencies.

Expanding human-robot interaction channels beyond voice commands further improves usability and accessibility. Gesture recognition, touch interfaces, and augmented reality (AR) overlays provide multi-modal communication pathways, allowing users with varying physical or cognitive abilities to interact effectively with the robot [3,4]. Combining voice commands, real-time visual feedback via a mobile app, and web-based control interfaces enhances accessibility, enabling users to operate the robot independently even in complex environments [3,6].

Despite these advancements, further research is necessary to evaluate long-term human-robot interaction, safety, and AI adaptability in real-life assistive contexts [1-5]. Longitudinal studies could assess how AI-driven support affects user independence, psychological well-being, and trust in technology. Additionally, comparative analysis of AI models for speech recognition, computer vision, and decision-making is essential to optimize system performance, reliability, and ethical compliance [4,8]. For example, evaluating multiple NLP models for contextual understanding or comparing obstacle avoidance algorithms under varying lighting and spatial constraints would inform best practices for deploying assistive robots in domestic environments.

III. CONCLUSION

The integration of AI in assistive robotics presents significant opportunities to improve autonomy, social interaction, and quality of life for people with disabilities. Technical, ethical, and usability challenges must be

addressed for successful deployment. The experimental master's platform demonstrates practical application of AI modules and provides a framework for future development.

REFERENCES

- [1] D. Giansanti, "Integrating AI and Assistive Technologies in Healthcare," *PMC*, 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11898476/>.
- [2] M. Costanzo, "New technologies and assistive robotics for elderly," *ScienceDirect*, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [3] G. L. Masala, "Artificial Intelligence and Assistive Robotics in Healthcare," *MDPI*, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/>.
- [4] G. Nicora, "Systematic review of AI/ML applications in multi-domain rehabilitation robotics," *J. NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2025. [Online]. Available: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/>.
- [5] R. Maure, "Autonomy in Socially Assistive Robotics: A Systematic Review," *Frontiers in Robotics and AI*, 2025. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/>.
- [6] Z. Ahmadi, "Reporting Risks in AI-based Assistive Technology Research: A Systematic Review," *arXiv*, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.12035>.
- [7] S. I. Serengil and A. Ozpinar, "DeepFace – Face recognition framework," *GitHub repository*, 2020. [Online]. Available: <https://github.com/serengil/deepface>.
- [8] K. L. Y. Wong, "Adoption of Artificial Intelligence-Enabled Robots in Long-Term Care," *JMIR Aging*, 2024. [Online]. Available: <https://aging.jmir.org/>.
- [9] "Flowchart detailing the child-robot interaction sequence from voice command to the resulting robot action," *ResearchGate (figure)*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Flowchart-detailing-the-child-robot-interaction-sequence-from-voice-command-to-the_fig2_378947311.
- [10] Y.-J. Chen, B.-G. Jhong, M.-Y. Chen, "A Real-Time Path Planning Algorithm Based on the Markov Decision Process in a Dynamic Environment for Wheeled Mobile Robots," *MDPI (Machines/Robotics)*, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-0825/12/4/166>.
- [11] Невлюдов І. ІІІ. Технічне та програмне забезпечення розробки малогабаритного мобільного робота : монографія / І. ІІІ. Невлюдов, В. В. Євсєєв, Д. В. Гурін // Кривий Ріг: Криворізький фаховий коледж Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут», 2025. – 355 с. - DOI : <https://doi.org/10.30837/978-617-8332-74-7>.
- [12] Maksymova, S., Abu-Jassar, A., Gurin, D., & Yevsieiev, V. (2024). Comparative Analysis of methods for Predicting the Trajectory of Object Movement in a Collaborative Robot-Manipulator Working Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(10), 38-48.

Використання методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації підготовки CAD-документації друкованих плат

Вадим Онищенко¹, Олександр Малий¹, Вадим Мірошніченко¹

1. Кафедра інформаційних технологій електронних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», УКРАЇНА, Запоріжжя, вул. Університетська, 64, email: vfonish@gmail.com, malvi@zpu.edu.ua

Анотація: Розглянуто застосування методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації підготовки CAD-документації друкованих плат. Показано обмеження традиційних ручних підходів і сучасних CAD/CAE-систем у випадках відсутності вихідних проєктних файлів. Проаналізовано ключові етапи процесу — попередню обробку зображень, сегментацію, класифікацію та формування структурованих даних. Окреслено основні виклики та перспективи розвитку, зокрема створення відкритих датасетів і відновлення електричних схем.

Ключові слова: друковані плати, CAD-документація, комп'ютерний зір, штучний інтелект, обробка зображень, сегментація, класифікація компонентів, автоматизація проєктування.

I. ВСТУП

Автоматизоване створення та відновлення документації друкованих плат є актуальним завданням сучасної електронної промисловості. Зростання складності електронних пристроїв, широке використання багатошарових плат та необхідність оперативного технічного супроводу вимагають ефективних рішень для формування конструкторських даних. Особливої важливості ця проблема набуває у випадках, коли відсутня початкова документація від виробника або ж вона втрачена, застаріла чи неповна.

Практична потреба у швидкому відновленні та актуалізації даних про друковані плати виникає у різних сферах: від реверс-інжинірингу та ремонту обладнання до модернізації промислових систем і розроблення навчальних матеріалів. Наявність актуальної CAD-документації є ключовою умовою для коректної експлуатації, повторного виробництва та адаптації електронних пристроїв під нові технічні вимоги.

Традиційний ручний підхід до відтворення документації передбачає значні часові витрати й високу залежність від досвіду інженера-конструктора. Ручна робота ускладнює процес, збільшує ймовірність помилок та знижує загальну продуктивність. Це створює передумови для пошуку нових методів, що дозволять автоматизувати аналіз візуальної інформації та її перетворення у стандартизовані формати CAD.

Метою цієї роботи є аналіз можливостей застосування методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації процесу підготовки CAD-документації друкованих плат. Основними завданнями є визначення ключових проблем ручного підходу, розгляд перспективних напрямів використання сучасних

технологій обробки зображень та окреслення викликів, які стоять перед дослідниками у цій сфері.

II. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ

У сфері створення та відновлення документації друкованих плат тривалий час застосовувалися переважно традиційні методи, що базуються на ручній роботі інженера-конструктора. Такий підхід передбачає аналіз фізичного зразка плати, її замальовування або перенесення контурів у CAD-систему, а також подальше відтворення топології провідників та розташування компонентів. Незважаючи на точність у випадку достатнього досвіду виконавця, цей процес є надзвичайно трудомістким і може займати значні ресурси часу.

З поширенням CAD/CAM/CAE технологій у проєктуванні електронних пристроїв з'явилися засоби, що дозволяють прискорити етапи відновлення документації. Сучасні програмні комплекси підтримують імпорту файлів у різних форматах (Gerber, DXF, ODB++), автоматичне трасування доріжок та бібліотеки електронних компонентів. Проте більшість таких рішень орієнтовані на використання вже наявних електронних проєктів і не передбачають роботи з вихідними зображеннями друкованих плат. Це обмежує їх ефективність у випадках, коли потрібно відновити документацію без доступу до вихідних файлів.

Окремим напрямом досліджень є застосування методів комп'ютерного зору для аналізу зображень друкованих плат. Використовуються алгоритми сегментації, виявлення контурів, класифікації об'єктів, які дають змогу автоматично виділяти доріжки, контактні площадки та елементи монтажу. Такі підходи широко застосовуються у задачах контролю якості друкованих плат, проте їх інтеграція у процес автоматизованого відтворення документації перебуває на початковому етапі розвитку.

В останні роки зростає інтерес до використання методів машинного навчання та глибинних нейронних мереж для розпізнавання складних структур електронних плат. Існують публікації, у яких розглядається застосування convolutional neural networks (CNN) для ідентифікації електронних компонентів або аналізу дефектів на поверхні плат. Ці дослідження демонструють потенціал використання штучного інтелекту у процесах автоматизації, проте вони здебільшого обмежуються окремими завданнями і не вирішують комплексну задачу відновлення CAD-документації.

Таким чином, існуючі підходи можна умовно розділити на три групи:

1. Традиційні ручні методи – точні, але надмірно трудомісткі.

2. Функціонал сучасних CAD/CAE систем – ефективний при наявності проектних файлів, але не придатний для роботи з фото- чи відеозображеннями.

3. Алгоритми комп'ютерного зору та штучного інтелекту – перспективні, але ще недостатньо інтегровані у комплексні системи автоматизації.

У цьому контексті постає завдання формування нового підходу, що об'єднає переваги сучасних технологій комп'ютерного зору та інструментів штучного інтелекту, забезпечуючи можливість безпосереднього перетворення зображень друкованих плат у CAD-документацію.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Процес підготовки CAD-документації друкованих плат на основі їхніх фотографій можна розглядати як багатокрокове завдання, що поєднує методи комп'ютерного зору, алгоритми штучного інтелекту та інструменти автоматизованого проєктування. Основна проблема полягає у перетворенні неструктурованих візуальних даних (цифрових зображень) у структуровану інформацію, придатну для подальшого використання у CAD/CAE-системах.

Підзадачі процесу наведені на рис. 1.

До основних вимог до такого підходу належать:

- достатня точність відтворення топології та компонентів;
- мінімізація ручного втручання на етапах ідентифікації та корекції;
- сумісність отриманих результатів із поширеними CAD-системами;
- масштабованість для різних типів і розмірів друкованих плат.

Таким чином, задача може бути сформульована як розробка концептуального підходу до автоматизації перетворення зображень друкованих плат у CAD-документацію з використанням методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту. Це завдання є міждисциплінарним і потребує поєднання знань у галузях обробки зображень, машинного навчання та інженерії електронних систем.

IV. МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Для розв'язання задачі автоматизованого перетворення фотографій друкованих плат у CAD-документацію ключову роль відіграють методи комп'ютерного зору. Вони забезпечують вилучення структурованої інформації з візуальних даних та формують основу для подальшого застосування алгоритмів штучного інтелекту.

1. Попередня обробка зображень.

На цьому етапі необхідно забезпечити придатність вхідних даних до подальшого аналізу. Використовуються методи фільтрації шумів (медіанна, гаусова фільтрація), корекції контрасту та яскравості, вирівнювання геометричних спотворень, що виникають через нерівномірне освітлення чи кут фотографування.

Також важливим завданням є нормалізація масштабу для забезпечення коректних вимірювань.

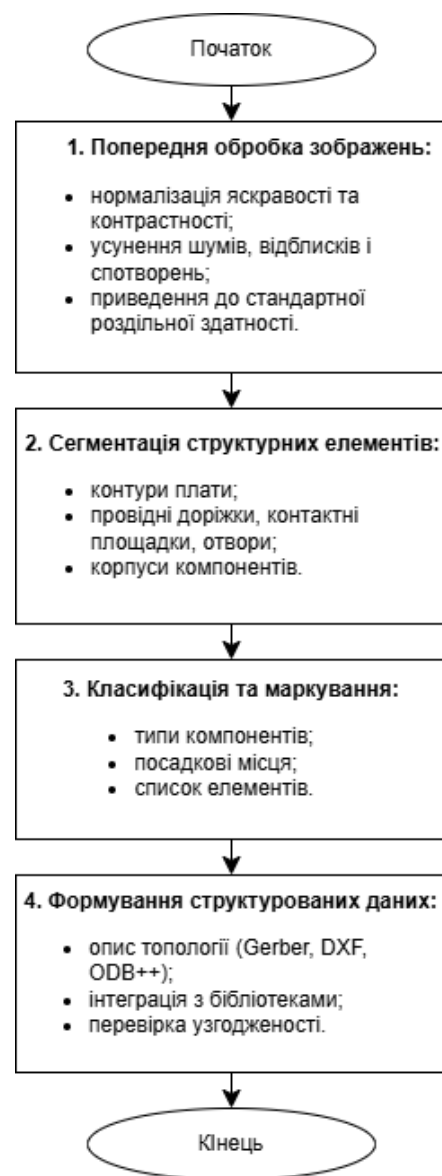


Рис.1. Процес підготовки CAD-документації друкованих плат

2. Виділення контурів та структурних елементів.

Для визначення меж плати, провідників та контактних площадок застосовуються алгоритми аналізу контурів (наприклад, Canny Edge Detection, Sobel) і методи морфологічної обробки. Контури слугують основою для сегментації окремих елементів та створення векторного представлення топології.

3. Сегментація зображень.

Сегментація є ключовою задачею, оскільки друковані плати містять щільно розташовані елементи з різними текстурами та формами. Використовуються алгоритми розділення об'єктів за кольоровими й просторовими ознаками, а також сучасні методи семантичної сегментації, які дозволяють автоматично виділяти провідні доріжки від фону та виділяти корпуси компонентів.

4. Розпізнавання та ідентифікація компонентів.

Комп'ютерний зір може бути використаний для виявлення геометричних форм (прямокутників, кіл, багатокутників), що відповідають посадковим місцям чи корпусам електронних елементів. Додатково застосовуються алгоритми шаблонного співставлення для визначення стандартних компонентів, наприклад резисторів або інтегральних мікросхем.

5. Перетворення растрових даних у векторні представлення.

Після сегментації зображення та виділення контурів необхідно отримати векторну модель, придатну для експорту у CAD-системи. Для цього застосовуються методи трасування контурів, апроксимації кривих та перетворення геометричних фігур у координатні дані.

6. Інтеграція з форматами CAD.

Отримана векторна інформація повинна бути представлена у стандартизованих форматах (Gerber, DXF, ODB++), що дозволяє інтегрувати результати обробки у робочий процес проектування.

Таким чином, методи комп'ютерного зору забезпечують початковий і надзвичайно важливий етап у системі автоматизованого складання документації. Вони дозволяють перейти від «сирого» зображення плати до структурованих даних, які можуть бути подальше оброблені методами штучного інтелекту для класифікації та маркування.

V. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Застосування штучного інтелекту є логічним продовженням використання методів комп'ютерного зору у задачі автоматизації створення CAD-документації друкованих плат. Якщо комп'ютерний зір відповідає за обробку зображень і виділення структурних елементів, то штучний інтелект забезпечує їх інтерпретацію, класифікацію та перетворення у дані, придатні для подальшого використання у CAD-системах.

1. Класифікація компонентів.

Машинне навчання може бути використане для автоматичного визначення типів електронних елементів, розташованих на друкованій платі. Алгоритми класифікації дають змогу відрізнити резистори, конденсатори, інтегральні мікросхеми, роз'єми та інші стандартні компоненти. Це знижує потребу у ручному маркуванні та формуванні специфікації (Bill of Materials, BOM).

2. Сегментація за допомогою глибинних моделей.

Глибинні нейронні мережі (наприклад, архітектури типу U-Net чи Mask R-CNN, які широко застосовуються у задачах сегментації) можуть бути використані для більш точного відділення доріжок і площадок від фону, а також для виділення складних форм компонентів. Це особливо важливо для плат з високою щільністю монтажу.

3. Розпізнавання текстових і графічних позначень.

На багатьох платах присутні текстові маркування: номери компонентів, позначення контактів, виробничі коди. Алгоритми оптичного розпізнавання символів (OCR), підсилені методами штучного інтелекту, можуть автоматизувати процес перенесення цих даних у документацію.

4. Побудова зв'язків між елементами.

Інтелектуальні алгоритми можуть допомогти визначати логічні зв'язки між компонентами, базуючись на просторовому розташуванні доріжок та їх топології. Хоча повне відновлення електричних схем є окремим завданням, використання AI здатне значно спростити цей процес і забезпечити основу для подальшої реконструкції.

5. Виклики у використанні AI:

- відсутність великих і відкритих датасетів для навчання моделей саме на зображеннях друкованих плат;
- необхідність високої точності розпізнавання, оскільки навіть незначні похибки можуть призвести до некоректної документації;
- проблема узагальнення: моделі мають працювати з різними типами плат, кольорами, умовами освітлення та якістю фотографій.

Таким чином, методи штучного інтелекту виступають ключовим інструментом для переходу від «сирих» даних, отриманих комп'ютерним зором, до повноцінної CAD-документації. Їхнє застосування дозволяє суттєво зменшити частку ручної роботи, підвищити точність результатів та створити передумови для інтеграції в сучасні системи автоматизованого проектування.

VI. ОБГОВОРЕННЯ ПРОБЛЕМ І ВИКЛИКІВ

Незважаючи на значний потенціал застосування комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації створення CAD-документації друкованих плат, існує низка проблем і обмежень, які стримують практичне впровадження таких підходів.

1. Якість вхідних даних.

Фотографії друкованих плат можуть відрізнитися за якістю, роздільною здатністю та умовами освітлення. Важливим чинником є наявність відблисків від металізованих поверхонь, тіней або спотворень через неправильний кут зйомки. Такі фактори ускладнюють сегментацію та розпізнавання елементів.

2. Багатошаровість конструкцій.

Сучасні друковані плати зазвичай є багатошаровими. При фотографуванні доступною для аналізу є лише зовнішня поверхня, тоді як внутрішні шари залишаються прихованими. Це обмежує можливості повної реконструкції топології лише за допомогою візуальних методів.

3. Нестача спеціалізованих наборів даних.

Для навчання моделей штучного інтелекту необхідні великі та репрезентативні датасети. Проте відкриті бази зображень друкованих плат майже відсутні, а створення власних потребує значних ресурсів і часу. Це знижує точність та універсальність отриманих моделей.

4. Високі вимоги до точності.

Навіть незначні похибки у відновленні топології (наприклад, пропущена доріжка чи неправильно класифікований компонент) можуть призвести до некоректної документації, що робить подальше використання результатів проблематичним.

5. Сумісність із CAD-системами.

Отримані результати аналізу зображень необхідно конвертувати у стандартизовані формати (Gerber, DXF, ODB++). Це вимагає розробки додаткових алгоритмів для забезпечення повної сумісності та перевірки цілісності даних.

6. Обчислювальні ресурси.

Розпізнавання зображень великої роздільної здатності із застосуванням глибинних моделей потребує значних обчислювальних ресурсів. Це може стати обмежувальним чинником для практичного використання у промислових умовах без доступу до високопродуктивного обладнання.

7. Відсутність комплексних рішень.

На сьогоднішній день більшість досліджень зосереджуються на окремих завданнях – наприклад, виявленні дефектів, класифікації компонентів чи сегментації доріжок. Проте комплексних рішень, які б повністю автоматизували перехід від фотографії плати до готової CAD-документації, поки що не існує.

Отже, успішне вирішення поставленої задачі вимагає не лише подальшого розвитку алгоритмів комп'ютерного зору та штучного інтелекту, але й створення методологічної та технічної бази для їх інтеграції у виробничі процеси.

VII. ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Подальший розвиток напрямку автоматизації підготовки CAD-документації друкованих плат на основі зображень відкриває низку перспектив, які можуть суттєво вплинути як на наукові дослідження, так і на практичні застосування у промисловості.

1. Розширення можливостей для багатошарових плат.

Одним із ключових викликів є робота з багатошаровими конструкціями. Перспективним завданням є створення методів, здатних частково відновлювати внутрішні шари за допомогою комбінації візуального аналізу, статистичних моделей та експертних правил. Це дозволить отримати більш повне уявлення про структуру складних плат.

2. Автоматизоване відновлення електричних схем.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів, які дозволяють формувати не лише геометричну топологію плати, а й її електричну схему. Це створить можливість для інтеграції отриманих результатів у системи моделювання та верифікації.

3. Інтеграція методів перевірки та контролю якості.

Системи, здатні автоматично аналізувати зображення плат і порівнювати їх із еталонними CAD-моделями, можуть стати основою для виявлення відхилень та дефектів у процесі виробництва. Така інтеграція дозволить поєднати завдання відновлення документації з функціями технічного контролю.

4. Створення та поширення відкритих датасетів.

Для розвитку моделей штучного інтелекту необхідні репрезентативні набори даних, які б охоплювали широкий спектр друкованих плат різного призначення. Перспективним напрямом є формування спільних баз зображень для наукової спільноти, що сприятиме підвищенню точності та універсальності алгоритмів.

5. Поєднання різних методів і технологій.

Майбутні системи можуть поєднувати класичні алгоритми комп'ютерного зору, глибинне навчання та експертні системи, що дасть змогу досягти більшої точності та надійності. Використання гібридних підходів дозволить компенсувати обмеження кожного окремого методу.

6. Використання у різних сферах.

Перспективним є застосування описаних підходів не лише у виробництві, але й у сферах ремонту та

модернізації обладнання, технічної освіти (для навчання студентів роботі з CAD-системами на основі реальних зразків плат), а також у військово-промисловому комплексі, де швидке відновлення документації може мати стратегічне значення.

Отже, подальші дослідження у цьому напрямку мають міждисциплінарний характер і потребують співпраці фахівців у галузях електроніки, інженерії, комп'ютерних наук і штучного інтелекту. Реалізація зазначених перспектив сприятиме створенню комплексних систем, здатних значно підвищити ефективність виробництва та обслуговування електронних пристроїв.

VIII. ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто актуальність проблеми автоматизованого відновлення та створення CAD-документації друкованих плат на основі їхніх зображень. Показано, що традиційні методи, які базуються на ручній роботі інженера, є надмірно трудомісткими та не відповідають вимогам сучасного виробництва, де важливими стають швидкість, точність та можливість інтеграції у цифрові виробничі процеси.

Огляд існуючих підходів продемонстрував, що сучасні CAD/CAE-системи забезпечують ефективну роботу за умов наявності вихідних проєктних файлів, але залишаються малопридатними у випадках, коли відновлення здійснюється лише за фотографіями друкованих плат. Методи комп'ютерного зору вже активно застосовуються у суміжних задачах, наприклад, у контролі якості, а їх поєднання з алгоритмами штучного інтелекту відкриває нові можливості для комплексної автоматизації процесу.

Було визначено основні завдання, що потребують вирішення: попередня обробка зображень, сегментація структурних елементів, класифікація компонентів, формування структурованих даних у стандартизованих форматах. Особливу увагу приділено проблемам, серед яких — обмеження роботи з багатошаровими платами, нестача спеціалізованих датасетів, високі вимоги до точності результатів та забезпечення сумісності з CAD-системами.

Перспективними напрямками розвитку є створення методів для аналізу багатошарових конструкцій, автоматизоване відновлення електричних схем, інтеграція з системами контролю якості та формування відкритих баз даних зображень друкованих плат. Реалізація таких підходів потребує міждисциплінарної співпраці та може суттєво вплинути на ефективність електронного виробництва, ремонтних процесів і освітніх практик.

Таким чином, використання комп'ютерного зору та штучного інтелекту у підготовці CAD-документації друкованих плат є перспективним напрямом досліджень, що поєднує наукову новизну та практичну значущість. Подальший розвиток цього напрямку здатен сформувати основу для створення комплексних автоматизованих систем у сфері електронного проєктування та виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Jeong, H., Lee, Y., & Kim, S. (2020). Automatic recognition of PCB components using convolutional

- neural networks. *Electronics*, 9(10), 1673. <https://doi.org/10.3390/electronics9101673>
- [2] Xu, K., Chen, H., & Wang, J. (2022). A vision-based approach for printed circuit board inspection using deep convolutional features. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 542-552. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.010>
- [3] Yang, C., Zhang, T., & Chen, Y. (2023). Intelligent image analysis for PCB design and verification: A review of methods and challenges. *Micromachines*, 14(2), 291. <https://doi.org/10.3390/mi14020291>
- [4] Gao, H., Wu, J., & Zhang, M. (2020). CAD-based automated inspection of printed circuit boards using computer vision techniques. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 10(7), 1210-1220. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2990837>
- [5] Chen, Q., Wang, P., & Liu, D. (2022). Deep learning for electronic design automation: A survey on recent advances. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 27(6), 1-28. <https://doi.org/10.1145/3543733>
- [6] Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). Using the Human Face Recognition Method Based on the MobileNetV2 Neural Network in Authentication Systems. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(3), 882-895.
- [7] Невлюдов, І., Клименко, О., Євсєєв, В., & Максимова, С. (2025). IMPROVEMENT OF THE ENCODING INFORMATION METHOD FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTS QR-CODES DURING SORTING ON A ROBOTIC CONVEYOR LINE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*, (1 (11)), 128-134.
- [8] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [9] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetV2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [10] CAMShift Algorithm for Human Tracking in the Collaborative Robot Working Area / D. Gurin, V. Yevsieiev, S. Maksymova., Ahmad Alkhalaileh // *Journal of Universal Science Research*. – 2024. – Vol. 2(8). – P. 87–101.
- [11] Yevsieiev V. The Sobel algorithm implementation for detection an object contour in the mobile robot's workspace in real time / V. Yevsieiev, S. Maksymova, Ahmad Alkhalaileh // *Technical Science Research in Uzbekistan*. – 2024. – Vol. 2(3). – P. 23-33.
- [12] Yevsieiev V. The Canny Algorithm Implementation for Obtaining the Object Contour in a Mobile Robot's Workspace in Real Time / V. Yevsieiev, S. Maksymova, Amer Abu-Jassar // *Journal of Universal Science Research*. – 2024. – Vol. 2(3). – P. 7–19.
- [13] Yevsieiev V. Object Recognition and Tracking Method in the Mobile Robot's Workspace in Real Time / V. Yevsieiev, Amer Abu-Jassar, S. Maksymova // *Technical science research in Uzbekistan*. – 2024. – Vol. 2(2). – P. 115-124
- [14] Active Contours Method Implementation for Objects Selection in the Mobile Robot's Workspace / V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Starodubtsev, Amer Abu-Jassar // *Journal of Universal Science Research*. – 2024. – Vol. 2(2). – P. 135–145
- [15] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
- [16] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In *2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 61-64). IEEE.
- [17] Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв та ін. ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 427 с.
- [18] Maksymova S. The Lucas-Kanade method implementation for estimating the objects movement in the mobile robot's workspace / S. Maksymova, V. Yevsieiev, Ahmad Alkhalaileh // *Journal of Universal Science Research*. – 2024. – Vol. 2(3). – P. 187-197.

Застосування інтелектуальних систем управління робототехнічними системами для досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування

Дмитро Янушкевич¹, Леонід Іванов², Ігор Толкунов³

1. Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки. 14., email: dmytro.ianushkevych@nure.ua

2. Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки. 14., email: leonid.ivanov@nure.ua

3. Кафедра піротехнічної та спеціальної підготовки, Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, вул. Чернишевська, 94, email: tolkunov_ia@ukr.net

Анотація: У доповіді розглядаються актуальні питання щодо досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних систем. Розв'язання цієї проблеми потребує креативності, комплексного підходу та інтелектуальних систем управління. Це дозволяє розробити моделі управління робототехнічною системою як на рівні прийняття рішень, так і на виконавчому рівні.

Ключові слова: гуманітарне розмінування, робототехнічні системи, сталий розвиток, системи управління.

I. ВСТУП

У вересні 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку відбувся Саміт ООН зі сталого розвитку. Підсумковим документом Саміту було розроблення 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР). Сталий розвиток пов'язується з гармонічним досягненням наступних цілей:

- високої якості навколишнього середовища і здорової економіки для всіх народів світу;
- задоволенні потреб людей і збереженні сталого розвитку протягом тривалого періоду.

Урядом України розпорядженням від 29 листопада 2024 р. № 1190 затверджено розпорядження «Деякі питання забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку в Україні», яким встановлено національні завдання, індикатори їх досягнення, цільові значення до 2030 року. Зокрема, були визначені в умовах воєнного стану, завдання щодо відбудови та відновлення пошкоджень наслідків збройної агресії Російської Федерації, гуманітарного розмінування замінованих територій, екологічної кризи тощо.

Унаслідок російського вторгнення Україна стала однією з найзамінованіших країн у світі. За оцінками Організації Об'єднаних Націй, було встановлено, наприклад, що за роки війни, близько 30 % території України забруднено вибухонебезпечними предметами (міни, снаряди, авіабомби тощо), що не розірвалися. На розмінування територій, забруднених вибухонебезпечними предметами (ВНП) піде до 100 років. Уряд України ставить за мету, щоб за десять років 80 % цих територій були обстежені на наявність вибухонебезпечних предметів ВНП та щоб ці території були безпечними для життєдіяльності мирного населення та військових і необхідна базуватись на креативності підходу до системи гуманітарного

розмінування із застосуванням робототехнічних систем (РТС).

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Гуманітарне розмінування – комплекс заходів, які проводяться з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із ВНП, включаючи нетехнічне та технічне обстеження територій, складення карт, виявлення, знешкодження та/або знищення ВНП, маркування, підготовку документації після розмінування, надання громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачу очищеної території [1].

Гуманітарне розмінування спрямоване на зменшення шкідливого фактору дії ВНП на життєдіяльність людей. Мета розмінування полягає в тому, щоб знизити мінну небезпеку до рівня, при якому люди можуть жити безпечно; при якому економічний, соціальний і фізіологічний розвиток може здійснюватися безперешкодно, не наражаючись впливу обмежень, що викликаються впливом забруднення території України ВНП. Гуманітарне розмінування, на відміну від військового, передбачає комплексний огляд усієї території, де тривали бойові дії, визначення небезпечних районів, виявлення забруднених вибухонебезпечними предметами ділянок та їх очищення, після чого місцевість стає повністю придатною для використання [2]. Існує три види розмінування: оперативне, військове та гуманітарне.

Оперативне розмінування виконується в разі невідкладної необхідності працівниками Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС), саперами поліції та фахівцями Держспецслужби транспорту (ДССТ).

Військове розмінування – це процес, який виконують солдати для розчищення шляху, щоб військові могли просуватися під час конфлікту. У цьому випадку міни знешкоджуються лише в тому випадку, якщо вони блокують стратегічні шляхи, необхідні для просування або відступу солдатів на війні.

Головною метою гуманітарного розмінування є планове очищення землі, щоб цивільні особи могли повернутися до своїх домівок і виконувати свої повсякденні справи без загрози для життя і здоров'я. Задача гуманітарного розмінування – відновлення миру та безпеки на рівні громади.

Пошук та ідентифікація ВНП для гуманітарного розмінування з метою зменшення ризиків з питань безпеки людей, які його здійснюють, є комплексним

завданням та вимагають застосування РТС для його проведення. РТС для проведення гуманітарного розмінування повинні бути оснащені відповідними детекторами (сенсорами, датчиками), засобами прийняття рішень та застосовуватись на етапах розвідки, пошуку, локації, маркування, ідентифікації, знешкодження та знищення ВВП [1].

ВВП можна виявляти за рахунок трьох факторів:

- наявність зосередженої маси вибухової речовини;
- характерна конструкція мін та ВВП (форм, матеріал корпусу, колір тощо);
- порушення однорідності навколишнього фону (кольору рослинності, щільності ґрунту тощо).

Основні цілі та мета гуманітарного розмінування може бути досягнута та повинна базуватися на креативному підході. Креативний підхід передбачає застосування новітніх засобів, зокрема безпілотних літальних апаратів, наземних робототехнічних комплексів та систем, систем зі штучним інтелектом, які можуть без втручання людини визначати наявність небезпеки шляхом дослідження результатів обстеження території БПЛА та управління якістю розмінування.

Система управління якістю розмінування складається з двох частин:

- це гарантія якості, тобто впевненість у тому, що оператор, який заявив свою спроможність розмінувати, дійсно на це спроможний;
- контроль якості.

Пріоритетними для розмінування є об'єкти електро-, водо-, газо-, теплопостачання, критичної й транспортної інфраструктури, сільськогосподарські землі тощо.

Перший етап гуманітарного розмінування розпочинається з оцифрування супутникових даних на предмет кратерів, окопів, траншей, аномалій та інших неоднорідностей по всій території України.

Другий рівень даних – це візуальна інспекція за допомогою БПЛА, який виявляє ВВП на землі.

Третій рівень даних – це вибухонебезпечні предмети під землею. Їх шукають з допомогою магнітометрів, термокамер, мультиспектральних камер, хімічних сенсорів і металошукачів.

Незважаючи на значну кількість наукових робіт із даної тематики, на сьогодні склалася тенденція розмежування зазначених питань.

Роботи по створенню РТС у сфері гуманітарного розмінування ведуться в Україні і за кордоном [1]. В Україні та світі виконано значний обсяг досліджень теоретичного та експериментального характеру, які стосуються розробки мобільних роботів. Наявні окремі дослідження статичних характеристик, розроблені дослідні зразки РТС у сфері гуманітарного розмінування та проведена їх апробація [1, 2].

Тому проблема розроблення креативного підходу до застосування робототехнічних комплексів у сфері гуманітарного розмінування є актуальним завданням.

Еволюція розвитку РТС показує, наскільки швидким є розвиток даної галузі. Від появи першого робота, який міг виконувати самі прості операції, до масового виробництва робототехнічних комплексів пройшло не більше 70 років. Як показує статистика, зростання в індустрії робототехніки продовжує бути вибуховим. Сьогодні існує величезна різноманітність роботів, які застосовуються у гуманітарного розмінування.

Основні етапи процесу гуманітарного розмінування можна розділити на етапи, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Етапи процесу гуманітарного розмінування

Номер етапу	Зміст етапу
1-й етап	Нетехнічне обстеження
2-й етап	Технічне обстеження
3-й етап	Розмінування території, забруднених ВВП та очищення районів ведення бойових дій
4-й етап	Утилізація (знищення, знешкодження) ВВП
5-й етап	Контроль якості розмінування та передача території, забруднених ВВП їх користувачам

Нетехнічне обстеження (НТО) передбачає збір, аналіз та оцінювання інформації стосовно території для подальшої її класифікації за статусом небезпеки, без використання технічних засобів пошуку ВВП.

Технічне обстеження включає збір та аналіз даних про наявність, тип, розподіл та навколишні умови знаходження мін та вибухонебезпечних предметів із застосуванням технічних засобів, щоб точніше визначити місце, де присутні міни та вибухонебезпечні боєприпаси, а де їх немає, для сприяння пріоритизації вивільнення земель та забезпечення прийняття рішень шляхом надання фактів [2].

Розмінування полягає у здійсненні операцій виявлення, видалення або знищення мін та вибухонебезпечних боєприпасів, а для операцій з розмінування може також бути потрібне забезпечення доступу, діагностування, приведення в безпечний стан, остаточна утилізація та (у разі потреби) захисні роботи.

Очищення районів ведення бойових дій передбачає виявлення та знешкодження в певних районах, на яких велися бойові дії і які можуть включати оборонні позиції та місця, де були випущені або скинуті авіаційні або артилерійські боєприпаси, включаючи касетні боєприпаси.

Утилізація, знешкодження (знищення) мін та вибухонебезпечних предметів включає всі аспекти виявлення та знешкодження боєприпасів, що не розірвалися, шляхом проведення операцій з розмінування. Виконання операції зі знешкодження та знищення ВВП варіюється від відносно простих методик знешкодження та відкритого підриву до дуже складних промислових процесів із залученням відповідних фахівців.

Контроль якості розмінування – елемент процесу управління якістю розмінування, який забезпечує повне дотримання вимог щодо ліквідації небезпек, пов'язаних з ВВП, а також контроль за дотриманням вимог щодо якості розмінування.

На теперішній час для гуманітарного розмінування передові країни світу розробляють та використовують сучасні мобільні РТС.

Основна увага приділяється створенню РТС збільшеної автономності. Через специфіку завдань, що підлягають вирішенню, мобільні РТС удосконалюються для забезпечення можливості діяти в реальній

обстановці за умови часткової або повної відсутності вихідної інформації про середовище функціонування. Основною тенденцією здійснення цих проєктів є дооснащення комплексів, що знаходяться на озброєнні, цифровими і аналоговими візуальними системами, засобами автоматизації управління, каналами зв'язку (радіо і оптоволоконними) та засобами управління рухом, заснованими на модульному принципі [6]. Відсутність особового складу в зоні ураження і застосування РТС значно підвищують морально-психологічний стан військовослужбовців і забезпечують ефективність виконання бойових завдань, істотно знижуючи до того ж бойові втрати.

Водночас, одним з актуальних у світі напрямів розроблення РТС, у зв'язку з розвитком різноманітних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), стала активізація ідеї щодо застосування БПЛА для ведення розвідки та картографування територій, забруднених ВНП, пошук, ідентифікація мін та ВНП, а також їх дистанційне знищення. БПЛА здатні піднімати апаратуру вагою понад 50 кг, зависати над об'єктами, літати автономно за закладеною у ньому програмі тощо. БПЛА здатні також виконувати завдання з дистанційного знищення мін та ВНП.

Крім того, під час ведення бойових дій і контртерористичних операцій, виникає необхідність провести приховану інженерну розвідку місцевості, маршруту руху на наявність установлених або відсутності мін, вибухових пристроїв, легкий або тактичний БПЛА вертолітного чи літакового типу, оснащений модульною малогабаритною розвідувальною апаратурою з високою розрізною здатністю, багатозональною телевізійною, тепловізійною, нелінійною радіолокацією, у поєднанні з автоматизованою системою топоприв'язки на основі ГЛОНАСС (GPS) і цифровою обробкою інформації, що дасть змогу на відстані до десятків кілометрів виявляти і визначати координати мінних полів і місць установки мін та ВНП.

До найбільш розповсюджених РТС, які застосовуються у сфері гуманітарного розмінування, відносяться також військові роботи серії SuperDroid Robots.

Основне цільове призначення роботів серії SuperDroid Robots – оперативна розвідка, спостереження, пошук, виявлення, ідентифікація, вилучення, переміщення, знешкодження, утилізація ВНП, очищення приміщень та територій, забруднених ВНП, здійснення гуманітарного розмінування та виконання інших завдань, які вирішуються на тактичному рівні бойового управління. Ці роботи дають змогу зменшити людські втрати під час виконання задач з гуманітарного розмінування, проведенні контртерористичних операцій, оперативної розвідки тощо.

Дистанційний блок керування роботом (блок управління оператора – ОСУ) здійснюється за допомогою цифрових радіосистем, які забезпечують зашифроване дистанційне керування. Для оперативного управління роботів серії SuperDroid Robots застосовуються 3 види дистанційного керування:

- стандартний пульт дистанційного керування. Цей пульт міститься у футлярі, має вбудовані промислові джойстики та 12-дюймовий дисплей;

- обробка відео з чотирьох розділених екранів, яка доступна як опція. Також доступна розширена кінематична модель робота та маніпулятора, що відображається на РК-дисплеї ОСУ, забезпечуючи точний зворотний зв'язок щодо положення маніпулятора та виявлення перешкод та ВНП;

- ретранслятори та вторинні станції дистанційного моніторингу, які доступні для всіх цифрових систем керування роботом. На рис. 1 наведено загальний вигляд робота SuperDroid Robots та пульт дистанційного керування до нього.



Рисунок 1. Загальний вигляд робота SuperDroid Robots та пульт дистанційного керування

Більшість цих елементів керування є стандартними для роботів серії SuperDroid Robots. Але для забезпечення ефективності в складних умовах застосовуються спеціальні методи та пакети оперативного управління.

Бездротове керування та відеоспостереження складні, і на них можуть впливати кілька факторів. Це включає наявність перешкод, стін, електричних перешкод, рельєф та ландшафт місцевості, інші радіочастотні перешкоди тощо.

Найпростіший тип бездротового керування – аналогові RC системи радіочастотного діапазону. Вони, як правило, дешевші та досить стійкі до проблем прямої видимості: наявність стін, дерев, пагорбів тощо.

Недоліком використання аналогової системи є лише односторонній зв'язок обмежена дальність передачі даних та несумісність з ретрансляторами (мережами) системи mesh.

Цифрові системи дистанційного управління доступні в Wi-Fi, Digital і High Bandwidth Smart Radio.

Wi-Fi базовий тип передачі даних та здійснення оперативного управління. Система управління на платформі Wi-Fi сумісна з усіма доступними опціями дистанційного керування. Система Wi-Fi найкраще працює в місцях з мінімальними перешкодами між ОСУ та роботом. Дальність дії – до 100 м.

Digital Radio System (цифрова радіосистема), яка забезпечує підтримувати стабільний мережевий зв'язок на великих відстанях. Типовий діапазон дії від 300 м до 800 м.

High Bandwidth Smart Radio – система радіозв'язку з високою смугою пропускання, яка поєднує діапазон цифрового радіо з можливістю передачі чіткого HD-відео. Оптимізовані канали забезпечують відмінне керування, передачу аудіо та відео інформації. Інтелектуальне мікропрограмне забезпечення встановлює пріоритети для керування, забезпечуючи

безперебійну роботу роботів. Типовий діапазон дії від 300 м до 800 м.

Для оперативного управління роботів серії SuperDroid Robots можуть застосовуватись також дротові варіанти (оптоволоконний кабель, «вита пара»), де застосовування радіочастотного діапазону неможливе.

Одним із шляхів удосконалення систем оперативного управління РТС є рівень «інтелектуальності», що робить розробку РТС дуже важливою темою. Інтелектуальний РТС – це робот, що включає інтелектуальну систему управління (ІСУ) [3].

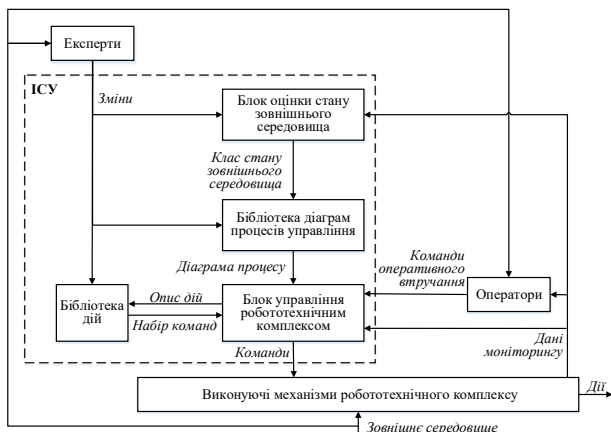


Рисунок 2. Модель ІСУ РТС гуманітарного розмінування

ІСУ означає комп'ютерну систему для вирішення завдань, які людина не може вирішити в режимі реального часу, або їхнє рішення вимагає автоматизованої підтримки або дає результати, які можна порівняти з рішеннями людини. При цьому, серед іншого, мається на увазі, що для розв'язуваних завдань ІСУ не передбачає повноти знань, а сама ІСУ повинна мати можливість упорядковувати дані та експертизу з виділенням суттєвих параметрів, пристосовуватися до змін набору фактів і знань, тощо. Концептуальна модель ІСУ робототехнічними комплексами гуманітарного розмінування на основі вербальних методів наведена на рис. 3.

Модель ІСУ РТС включає такі елементи: блок оцінки стану зовнішнього середовища, бібліотека діаграм процесів управління, блок керування РТС, бібліотека дій, рівень виконання для виконавчих механізмів робототехнічного комплексу (ВМПК), набори команд для ВМПК, групу експертів та операторів.

III. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз дає змогу дійти висновку про складність проблеми досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування із застосуванням РТС. Розв'язання цієї проблеми потребує креативності, комплексного підходу та ІСУ РТС та дозволяє розробити моделі ІСУ як на рівні прийняття рішень, так і на виконавчому рівні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Nevliudov, I., Yanushkevych, D., Ivanov, L. Analysis of the state of creation of robotic complexes for humanitarian demining. / I. Nevliudov, D. Yanushkevych, L. Ivanov // Technology Audit and Production Reserves, 6/2 (62). – 2021. – P. 47-52.
- [2] Янушкевич Д., Іванов Л., Толкунов І. Креативні підходи управління якістю у сфері гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних систем / Д. Янушкевич, Л. Іванов Л., І. Толкунов // Збірник матеріалів V форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2023. – Харків, ХНУРЕ, – С. 55-59.
- [3] O Hutsa, D Yanushkevych, D Yelchaninov, I Tolkunov, L Ivanov, R Petrova, A Morozova (2024) Conceptualization of intelligent control systems conceptual model for humanitarian demining robotic complexes based on verbal methods. Science and Innovation Vol. 20 №. 3 (2024), 82-95.
- [4] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 3046116.
- [5] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (pp. 61-64). IEEE.
- [6] Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв та ін. ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 427 с.
- [7] Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. International Journal of Crowd Science, 9(1), 29-43.
- [8] Невлюдов І. Ш. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi) і мови Python 3.6 : підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв – Харків, 2020. - 257 с.
- [9] Yevsieiev, V., & Starodubcev, N. (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Scientific Collection «InterConf», (140), 648-651.
- [10] Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / V. Yevsieiev, N. Starodubcev // Science in Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, February 6-8, 2023. - Brussels : De Boeck, 2023. - Scientific Collection «InterConf» . - № 141. - P. 331-334.

Digital Technologies for Monitoring the Dielectric Properties of Carbon-Carbon Composites

Vitalii Ovcharenko, Olena Tokarieva

CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: olena.tokarieva@nure.ua

Abstract: The paper discusses the implementation of digital technologies in monitoring the dielectric properties of carbon-carbon composites. It is shown that real-time measurement of complex dielectric permittivity enables control of key parameters during graphitization, pyrolysis, and impregnation processes. The integration of dielectric spectroscopy methods with automated control and digital modeling systems is substantiated, ensuring adaptability and accuracy of modern manufacturing processes.

Keywords: digital technologies, monitoring, dielectric permittivity, CCCM, automation.

I. INTRODUCTION

Modern high-tech materials manufacturing requires monitoring methods capable of tracking dynamic changes in the structure and properties of materials in real time. Each material is characterized by a specific set of electrophysical properties, which are largely determined by its dielectric behavior. The electrical parameters of materials are generally described in terms of electrical conductivity and dielectric permittivity. Conductivity reflects the ability of a material to conduct electric current and is directly related to its specific electrical resistance. At the same time, dielectric permittivity quantitatively characterizes the degree of polarization induced in the material under the influence of an applied alternating electric field. This parameter is one of the key factors that determine the electromagnetic, thermophysical, and electrochemical behavior of a material.

For carbon-carbon composites (CCCM), monitoring dielectric properties is of particular importance, as they serve as indicators of microstructural changes, phase transitions, impregnation level, and the degree of graphitization. Dielectric properties, especially the complex dielectric permittivity, are highly sensitive to thermal, electromagnetic, and chemical factors.

Therefore, they form the basis for building automated control systems for technological processes, since they provide objective feedback directly during material processing. One of the key directions of development is the integration of dielectric spectroscopy methods into digital monitoring systems.

II. MODELING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

Monitoring dielectric properties during the production of CCCM is an effective tool for controlling the key technological parameters of the process. This enables real-time regulation of temperature, pressure, heating rate, and impregnation parameters, ensuring increased stability, reproducibility, and, as a result, high final material quality. The use of dielectric observation methods provides a deeper understanding of the physicochemical changes occurring

inside the composite structure, thereby contributing to the optimization of technological solutions.

The complex dielectric permittivity $\varepsilon^*(\omega)$ is a function of the frequency of the applied electric field and is calculated as follows:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega),$$

where $\varepsilon'(\omega)$ – the real part, which characterizes the ability of the material to accumulate electrical energy;

$\varepsilon''(\omega)$ – the imaginary part, associated with thermal energy losses in the material.

The use of high-frequency measurement systems makes it possible to register both the real and imaginary components of permittivity, which respectively reflect the energy storage capacity of the material and the level of losses. The obtained frequency and temperature dependencies allow real-time identification of relaxation processes, interfacial polarization, and structural transformations that critically affect the quality of the final product.

One of the critical technological parameters is the temperature gradient, which directly affects the direction and intensity of structural formation. A high gradient promotes the development of an ordered, anisotropic structure with improved thermal conductivity, but its excessive increase can induce internal thermal stresses and microcracks. Continuous monitoring of dielectric properties enables tracking the uniformity of material heating and timely adjustment of the temperature field, thus preventing local defects.

The maximum processing temperature is another key parameter regulating the degree of graphitization, final porosity, and electrical conductivity of the composite. To achieve the necessary structural transformation, the temperature is typically set in the range of 1600-2200°C. Insufficient heating results in the preservation of the amorphous phase, whereas exceeding the optimal level may cause excessive shrinkage or structural degradation. Changes in the imaginary component of the complex dielectric permittivity serve as a reliable indicator of structural transformation stages, providing accurate determination of the completion of graphitization.

Furthermore, heating and cooling rates require automated regulation, as rapid thermal changes may cause residual stresses and structural defects. Slow temperature elevation ensures uniform shrinkage and contributes to the stabilization of the internal structure, while real-time dielectric monitoring enables the prompt identification of phase transitions accompanied by changes in polarization mechanisms, thereby allowing adaptive correction of the

temperature profile according to the current state of the sample.

The study of dielectric properties of carbon-carbon composites is highly relevant in the context of monitoring structural changes during their production, particularly under thermogradient processing and multistage impregnation. At low frequencies (50 Hz - 1 MHz), the most suitable methods are those that account for the complex heterogeneous nature of composites, particularly interfacial effects. One of the most effective approaches to modelling the dielectric permittivity of such materials is the generalized Maxwell-Wagner model, which represents a development of the interfacial polarization theory applied to porous, layered, and multiphase systems. In this framework, the complex dielectric permittivity is described as a function of the frequency of the applied electric field:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + j\omega\tau},$$

where ε_∞ – high-frequency dielectric permittivity, which reflects instantaneous polarization (electronic and atomic);

$\Delta\varepsilon$ – dielectric relaxation strength, or the dispersion amplitude, equal to the difference between the static and high-frequency dielectric permittivities;

τ – relaxation time, which characterizes the period required for polarization equilibrium to be established after a change in the electric field.

A characteristic temperature dependence of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity for CCCM, modeled using the Maxwell-Wagner model in the temperature range of 600-1600°C at a frequency of 1 GHz, is shown in Fig. 1.

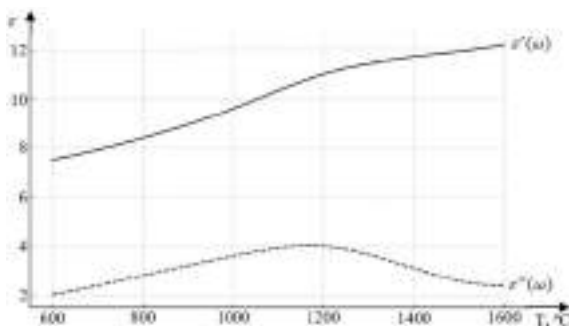


Fig. 1 – Temperature dependence of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity of CCCM

Analysis of the experimental data shows that, with increasing temperature, the real part of the complex dielectric permittivity increases monotonically. This trend directly correlates with an increased degree of graphitization of the material, reduced porosity, and improved structural ordering. At the same time, the imaginary part of the dielectric permittivity demonstrates a pronounced relaxation maximum in the temperature range around 1200°C. This peak indicates intense relaxation processes associated with phase transitions or deep structural rearrangements, including the removal of residual volatile components, local deformations, or changes in the topology of the porous network. Such behavior is typical of heterogeneous composite systems, where interfacial polarization and

heterogeneity of conductive properties cause significant dielectric losses at specific critical temperatures.

The information obtained from $\varepsilon'(T)$ and $\varepsilon''(T)$ can be used as an informative indicator for monitoring internal changes in the material during heat treatment. In particular, stabilization of ε' at high temperatures signals the achievement of a saturated state of graphitization, while local peaks of ε'' allow the identification of temperature ranges in which relaxation or diffusion processes occur.

These functional dependencies can be integrated as a feedback element into automated control systems for the heat treatment of highly loaded composite materials. Such an approach ensures improved final material quality by accurately regulating the temperature profile, optimizing impregnation modes, and minimizing the likelihood of structural defects.

An important component of digital monitoring is the use of mathematical models. Among them, the Maxwell-Wagner model, which describes interfacial polarization in heterogeneous systems, and the Maxwell-Garnett model, which allows evaluation of porosity effects on effective dielectric permittivity, hold special importance. Using these models in combination with experimental data provides a high level of predictive reliability and enables optimization of processing parameters.

Digital technologies make it possible to integrate diagnostic results into automated control systems. The combination of microwave probes, induction heating, and software-based regulation creates conditions for adaptive control of graphitization and pyrolysis processes. This allows timely adjustment of temperature, heating rate, pressure level, and other parameters that affect CCCM microstructure formation.

III. CONCLUSION

The application of digital monitoring technologies has several advantages. First, it ensures continuous control and enables prompt response to any deviations. Second, such integration improves the accuracy and reproducibility of material characteristics. Third, it creates prerequisites for the use of intelligent control algorithms, including artificial intelligence, capable of analyzing large datasets and making optimal decisions without operator involvement.

The results confirm that digital monitoring of dielectric properties is an effective tool for ensuring high-quality CCCM. These technologies can be used both for real-time control and for verification of numerical models applied in the design of technological regimes. This makes them highly promising for widespread implementation in the manufacturing processes of instrumentation, aerospace, and energy industries.

REFERENCES

- [1] Microwave Dielectric Properties of Carbon Nanotube Composites / Liu L., Kong L. B., Yin W. Y., Chen Y. // Carbon Nanotubes, IntechOpen. – 2010, Vol. 3, P.93-108.
- [2] Organizational aspects of quality assurance in the production of carbon-carbon composite material blanks / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XIV International scientific and practical conference «The latest technologies in scientific activity and the educational

- process», December 03 – 06, 2024, Porto, Portugal. International Science Group.2024. P. 398-400.
- [3] Voyevodin V.N., Gribanov Yu.O., Gurin V.A., Gurin I.V., Gujda V.V. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) // Problems of Atomic Science and Technology. – 2015. – № 2 (96). – P. 52–64.
- [4] Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // Problems of atomic science and technology. – 2024, № 1 (149) p. 125-127.
- [5] Застосування ВВКМ для виготовлення високотемпературних нагрівачів теплових вузлів з автоматичним регулюванням температури / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №3, с. 56-66.
- [6] The use of CCCM for the creation of the high temperature detectors of the water wapor / I. Gurin, V. Ovcharenko, O. Tokarieva, O. Moshnik // Problems of atomic science and technology. – 2023, № 2 (144) p. 140-142.
- [7] Дослідження щільності ВВКМ та її вплив на електричний об'ємний питомий опір / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024, №3, с. 61-70.
- [8] Noncontact conductivity and dielectric measurement for high throughput roll-to-roll nanomanufacturing / Orloff N.D., Long C.J., Obrzut J. et al. // Scientific Reports 5. – 2015, № 17019.
- [9] Accurate model for computing dielectric constant of dielectric nanocomposites / Ezzat M., Sabiha N.A., Izzularab M. // Applied Nanoscience. – 2014, №4, P. 331-338.
- [10] Infrared radiation properties of the carbon-carbon composite and their application to nondestructive detection of its defects / M. Eto, T. Ishii, T. Inagaki, Y. Okamoto // Carbon. – 2002, Vol. 39, Issue 3. – P. 285-294.
- [11] Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages / Chao HW., Hsu HC., Chen YR. Chang TH. // Scientific Reports 11 (1). – 2021, № 17475.
- [12] Систематизація методів вимірювання діелектричної проникності / Івах Р.М. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015, вип. 25.2, с. 141-145.
- [13] Homogenization of Maxwell's equations in periodic composites: Boundary effects and dispersion relations / V. A. Markel, J. C. Schotland // Physical Review E. – 2012, Vol. 85, Issue 6, № 066603.
- [14] Application of Bruggeman and Maxwell Garnett homogenization formalisms to random composite materials containing dimers / Mackay T.G., Lakhtakia A. // Waves in Random and Complex Media. – 2015, Vol. 25, Issue 3, P.429-454.
- [15] Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133-137.
- [16] Система автоматичного управління з нейромережевими регуляторами для підвищення якості ВВКМ / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024, №2, с. 104-116.
- [17] Neural network adaptive control system for a vacuum diffusion furnace / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XVI International scientific and practical conference «New ways of improving outdated methods and technologies», December 17 – 20, 2024, Copenhagen, Denmark. International Science Group.2024. P. 317-319.
- [18] Автоматизація регулювання технологічних параметрів виготовлення ВВКМ на основі контролю діелектричних характеристик / Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В., Гурін І.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2025, №2, с. 89-101
- [19] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. Advanced Information Systems, 9(3), 57-65.
- [20] Nevliudov I. Sh. Adjusting the Movements of the Robotic Platform Through Inverse Kinematics / Igor Nevliudov, Dmytro Gurin, Vladyslav Yevsieiev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs, MC&FPGA-2025 : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE. – P. 4-8.
- [21] Nevliudov I. Sh. Mathematical Model of Block Process Planning in Systems of Allocation of Task Between People and Collaborative Robots in the Framework of Industries 5.0 / I. Sh. Nevliudov, V. V. Yevsieiev, D. V. Gurin // Visnyk of Kherson National Technical University. – 2025. - Vol. 1, № 1(92). - P. 157-163.

Modeling the Effect of Porosity on the Effective Dielectric Permittivity of Carbon-Carbon Composites

Olena Tokarieva, Vitalii Ovcharenko

CITAR Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE,
Kharkiv, Nauki Ave. 14., e-mail: olena.tokarieva@nure.ua

Abstract: The study examines the role of porosity in shaping the effective dielectric permittivity of carbon-carbon composites. Based on the Maxwell-Garnett model, it is shown that even a minor increase in pore volume fraction significantly affects the composite's electrophysical properties. Numerical simulation results allow for quantitative assessment of structural defects' impact and optimization of manufacturing regimes. The use of dielectric monitoring data for validating effective medium models is substantiated.

Keywords: porosity, dielectric permittivity, CCCM, modeling, Maxwell-Garnett, automation.

I. INTRODUCTION

Porosity is one of the defining characteristics of carbon-carbon composites (CCCM), directly influencing their electrophysical, thermophysical, and mechanical properties. Even slight changes in the pore volume fraction can lead to significant deviations in material behavior, especially under conditions of high temperatures and exposure to electromagnetic fields. In this regard, the development of models capable of quantitatively describing the influence of porosity on the dielectric properties of CCCM and applying these results in automated control systems for technological processes is highly relevant.

The effective dielectric permittivity of heterogeneous materials, particularly composites with a porous structure, can be described using effective medium models. One of the most convenient and widely applied is the Maxwell-Garnett model. It is based on the representation of a composite as a combination of a matrix with a given dielectric permittivity and inclusions (in this case, pores) filled with gas, whose permittivity is close to unity.

II. MODELING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

In developing mathematical models for quality control in the production of CCCM, it is expedient to apply generalized effective medium models, particularly the Maxwell-Garnett model. This model makes it possible to describe the macroscopic electrophysical properties of heterogeneous materials on the basis of microscopic characteristics of their constituent phases.

The main advantage of this model lies in its analytical simplicity and its ability to account for the influence of the volume fraction of inclusions, the dielectric properties of each phase, and the specifics of their geometrical distribution on the resulting effective characteristics of the composite. For CCCM, the Maxwell-Garnett model allows accurate consideration of the effect of porosity formed as a result of pyrolysis or thermogradient impregnation on the effective dielectric permittivity.

Within this model, the effective dielectric permittivity of a composite is calculated according to the formula:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m \frac{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) + 2f(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) - f(\varepsilon_i - \varepsilon_m)},$$

where ε_m – dielectric permittivity of the matrix material (host medium);

ε_i – dielectric permittivity of the inclusion material (dispersed phase);

f – volume fraction of inclusions in the composite ($0 \leq f \leq 1$), i.e., the ratio of the inclusion volume to the total volume of the composite.

Analysis of the complex dielectric permittivity enables in-depth investigation of relaxation processes occurring at phase boundaries in complex structured materials. This approach is particularly informative for studying the properties of CCCM, since it provides the possibility of interpreting experimental data not only at the level of integral macroscopic values but also in the context of local structural changes, phase composition, and the degree of homogeneity.

The real (ε') and imaginary (ε'') components of the complex dielectric permittivity are expressed as:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1+(\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2}.$$

The analysis of changes in ε' and ε'' across frequency and temperature ranges forms the basis for identifying characteristic relaxation parameters, determining polarization mechanisms and electrical losses, as well as assessing the influence of microstructural features on the overall electrophysical behavior of the material. This methodology underpins the correct interpretation of physical processes occurring during the formation, modification, or operation of CCCM, which in turn is a necessary prerequisite for the development of effective mathematical models and algorithms for technological process control.

The determination of the complex dielectric permittivity of CCCM, according to the chosen model, can be effectively implemented using high-frequency diagnostic methods that allow recording of changes in $\varepsilon'(\omega)$ and $\varepsilon''(\omega)$ over a wide frequency range.

In Fig. 1, a characteristic frequency dependence of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity for CCCM, modeled on the basis of the Maxwell-Wagner model, is presented.

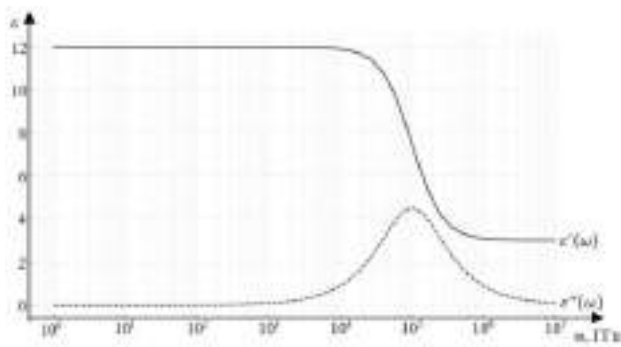


Fig. 1 – Characteristic frequency dependence of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity of CCCM modeled using the Maxwell–Wagner model

Analysis of the presented frequency dependence of the complex dielectric permittivity shows that the real component ϵ' , denoted by the solid line, smoothly decreases from 12 to 3 as the frequency increases. This behavior indicates a transition from dominant interfacial (Maxwell–Wagner) polarization at low frequencies to predominantly instantaneous (electronic and atomic) polarization in the high-frequency range. The characteristic decrease in dielectric permittivity with increasing frequency is typical for heterogeneous composite materials with a non-uniform structure. Meanwhile, the imaginary component ϵ'' , representing dielectric losses (dashed line), exhibits a clearly defined maximum at a certain frequency, corresponding to the relaxation loss peak, which is a distinctive feature of interfacial polarization in carbon–carbon composites.

The obtained dependencies are of high practical significance: they can be used both as a real-time monitoring tool and for validating numerical models applied in the design of optimal technological regimes for CCCM manufacturing.

According to the Maxwell-Garnett model, the effective dielectric permittivity depends on the dielectric properties of the matrix, the permittivity of inclusions, and their volume fraction. For CCCM, this dependence has practical importance, since porosity is formed during pyrolysis processes and multiple impregnation cycles with a carbon binder.

The results of numerical modeling performed using the Maxwell–Garnett model, showing the dependence of the effective dielectric permittivity of CCCM on porosity level (ϕ , %), interpreted as the volume fraction of air inclusions, are presented in Fig. 2.

Numerical modeling shows that even a small increase in porosity from 0 to 2% causes an almost linear decrease in the effective dielectric permittivity of the composite. This is explained by the fact that air inclusions replace the volume of the polarized carbon matrix, reducing the material's ability to accumulate electrical energy. As a result, both the real component of permittivity, associated with energy storage, and the imaginary component, reflecting energy losses, decrease.

Under conditions of uniform distribution of inclusions and their weak interaction, the Maxwell–Garnett model provides a reliable description of changes in the electrophysical properties of composites, offering a quantitative assessment of the influence of microstructural parameters on the macroscopic behavior of the material. The decrease in

effective dielectric permittivity with increasing porosity is a critical factor for designing processing regimes and ensuring quality control of CCCM.

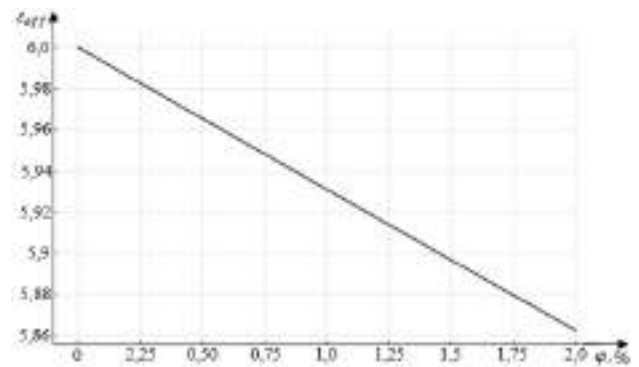


Fig. 2 – Dependence of the effective dielectric permittivity of CCCM on porosity according to the Maxwell–Garnett model

Since dielectric permittivity directly affects the radiofrequency, thermophysical, and sensing characteristics of composites, the ability to control this parameter by regulating porosity enables optimization of materials to meet specific functional requirements. During thermogradient impregnation or multiple carbonization cycles, precise control of pore space structure ensures directed influence on ϵ_{eff} , guaranteeing the formation of a homogeneous, stable microstructure with predictable properties, which is a prerequisite for the production of high-quality composites with reproducible characteristics.

The obtained results confirm that controlling porosity level is a critical stage in ensuring the stability and reproducibility of CCCM properties. In practical manufacturing, this means that the number of impregnation and pyrolysis cycles must be optimized to achieve the required density and homogeneity without excessive time and resource costs.

Modeling using effective medium models not only explains the results of experimental measurements but also allows prediction of material properties at the design stage of the technological process. In particular, the integration of modeling data into digital control systems provides the possibility of adaptive regulation of heating, pressure, and processing duration parameters, focusing on the desired level of dielectric permittivity.

It is important to note that the Maxwell-Garnett model is an approximate tool and assumes uniform distribution of inclusions and their weak interaction. For CCCM, which have a complex anisotropic structure, this may lead to certain deviations. Therefore, a promising direction for further research is the combination of this model with more sophisticated approaches that take into account fiber orientation, heterogeneity of pore space, and interfacial effects.

At the same time, even the basic Maxwell–Garnett model makes it possible to draw important practical conclusions. The decrease in dielectric permittivity with increasing porosity means a deterioration of the material's ability to shield electromagnetic fields and a reduction in its thermal conductivity. This is particularly critical for aerospace applications, where CCCM are used as thermal protection

coatings and structural elements operating under extreme conditions.

III. CONCLUSION

The implementation of dielectric monitoring systems during CCCM fabrication allows real-time assessment of porosity levels using the dependence of permittivity on structure. This creates the basis for building closed-loop automated control systems, where data from measuring probes are integrated into software regulating process parameters.

Thus, modeling the effect of porosity on the effective dielectric permittivity of CCCM is an important tool for developing optimal regimes of heat treatment and impregnation. The obtained results can be used both to explain the physical mechanisms of property changes and to create practical control algorithms in production systems. A promising direction is the further development of hybrid models combining analytical calculations with numerical simulations, which will increase prediction accuracy and make the manufacturing process of CCCM more controlled and economically efficient.

REFERENCES

- [1] Microwave Dielectric Properties of Carbon Nanotube Composites / Liu L., Kong L. B., Yin W. Y., Chen Y. // Carbon Nanotubes, IntechOpen. – 2010, Vol. 3, P.93-108.
- [2] Organizational aspects of quality assurance in the production of carbon-carbon composite material blanks / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XIV International scientific and practical conference «The latest technologies in scientific activity and the educational process», December 03 – 06, 2024, Porto, Portugal. International Science Group.2024. P. 398-400.
- [3] Voyevodin V.N., Gribanov Yu.O., Gurin V.A., Gurin I.V., Gujda V.V. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) // Problems of Atomic Science and Technology. – 2015. – № 2 (96). – P. 52–64.
- [4] Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // Problems of atomic science and technology. – 2024, № 1 (149) p. 125-127.
- [5] Застосування ВВКМ для виготовлення високотемпературних нагрівачів теплових вузлів з автоматичним регулюванням температури / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №3, с. 56-66.
- [6] The use of CCCM for the creation of the high temperature detectors of the water vapor / I. Gurin, V. Ovcharenko, O. Tokarieva, O. Moshnik // Problems of atomic science and technology. – 2023, № 2 (144) p. 140-142.
- [7] Дослідження щільності ВВКМ та її вплив на електричний об'ємний питомий опір / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024, №3, с. 61-70.
- [8] Noncontact conductivity and dielectric measurement for high throughput roll-to-roll nanomanufacturing / Orloff N.D., Long C.J., Obrzut J. et al. // Scientific Reports 5. – 2015, № 17019.
- [9] Accurate model for computing dielectric constant of dielectric nanocomposites / Ezzat M., Sabiha N.A., Izzularab M. // Applied Nanoscience. – 2014, №4, P. 331-338.
- [10] Infrared radiation properties of the carbon-carbon composite and their application to nondestructive detection of its defects / M. Eto, T. Ishii, T. Inagaki, Y. Okamoto // Carbon. – 2002, Vol. 39, Issue 3. – P. 285-294.
- [11] Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages / Chao HW., Hsu HC., Chen YR. Chang TH. // Scientific Reports 11 (1). – 2021, № 17475.
- [12] Систематизація методів вимірювання діелектричної проникності / Івах Р.М. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015, вип. 25.2, с. 141-145.
- [13] Homogenization of Maxwell's equations in periodic composites: Boundary effects and dispersion relations / V. A. Markel, J. C. Schotland // Physical Review E. – 2012, Vol. 85, Issue 6, № 066603.
- [14] Application of Bruggeman and Maxwell Garnett homogenization formalisms to random composite materials containing dimers / Mackay T.G., Lakhtakia A. // Waves in Random and Complex Media. – 2015, Vol. 25, Issue 3, P.429-454.
- [15] Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133-137.
- [16] Система автоматичного управління з нейромережевими регуляторами для підвищення якості ВВКМ / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024, №2, с. 104-116.
- [17] Neural network adaptive control system for a vacuum diffusion furnace / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XVI International scientific and practical conference «New ways of improving outdated methods and technologies», December 17 – 20, 2024, Copenhagen, Denmark. International Science Group.2024. P. 317-319.
- [18] Автоматизація регулювання технологічних параметрів виготовлення ВВКМ на основі контролю діелектричних характеристик / Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В., Гурін І.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2025, №2, с. 89-101.

Автоматизація та динамічне планування робіт: концептуальні рішення для Індустрії 5.0 в автоматизації

Олена Чала, Михайло Краснопопов, Катерина Казановська

1. Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, пр. Науки. 14., email: olena.chala@nure.ua, mykhailo.krasnoporov@nure.ua
kateryna.kazanovska@nure.ua

Анотація: В даному матеріалі узагальнена структура досліджень, спрямованих на розробку інтелектуальних, адаптивних, екологічно чистих та людино-орієнтованих систем планування, здатних відповідати вимогам сучасної промисловості та автоматизації.

Ключові слова: автоматизація, логістика, планування, цифрові двійники, рішення, взаємозвязки, виробництво, технології.

I. ВСТУП

У контексті Індустрії 5.0 планування робіт має розвиватися за межами традиційних підходів, орієнтованих лише на ефективність, і включати адаптивність, сталий розвиток та людиноцентричні принципи [1-8].

Технології Індустрії 4.0, такі як Інтернет речей, цифрові двійники та сенсорні системи, вже дозволили реалізувати планування в режимі реального часу та динамічно-адаптивні моделі управління.

Проте більшість сучасних систем і досі покладаються на статичні алгоритми та не забезпечують комплексного врахування екологічних факторів і людського добробуту у процесі планування.

Для реалізації бачення Індустрії 5.0 у практичних виробничих і логістичних застосуваннях зростає потреба у створенні методів динамічного планування, які інтегрують технологічні, екологічні та соціальні виміри. У зв'язку з обмеженою кількістю досліджень у цій сфері дане дослідження спрямоване на комплексну основу для сталого динамічного планування робіт.

Ця основа може ґрунтуватися на структурованих моделях, які чітко демонструють, як можна систематично інтегрувати динамічні фактори, екологічні параметри та людські аспекти у задачі планування [3, 7, 9-17].

Запропонована структура має на меті створити чітке підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на розробку інтелектуальних, адаптивних, екологічно чистих та людино-орієнтованих систем планування, здатних відповідати вимогам сучасної промисловості.

II. ДИНАМІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ

Наприклад, у внутрішньоскладській логістиці динамічне планування може включати адаптивне перенавчання маршрутів автономних мобільних роботів залежно від рівня завантаженості проходів або появи непередбачуваних перешкод [5, 10-14].

Такі роботи здатні враховувати не лише оптимальність шляху, але й рівень шуму чи освітленості,

щоб зменшити негативний вплив на співробітників складу.

У сфері робототехніки планування робочих завдань для маніпуляторів може доповнюватися параметрами енергоспоживання: система автоматично розподіляє навантаження між роботами так, щоб мінімізувати пікові витрати електроенергії.

Роботизовані візки можуть отримувати завдання з урахуванням стану акумуляторів, що дозволяє уникати критичних ситуацій і підвищує стабільність роботи всієї системи.

У динамічних середовищах, де одночасно працюють люди та роботи, система планування може інтегрувати дані з датчиків безпеки, щоб адаптивно змінювати швидкість руху роботів і уникати конфліктних ситуацій. У практиці складів дедалі більшого значення набуває балансування між швидкістю виконання замовлень і комфортом працівників у пікові години.

Важливим прикладом є використання сенсорів для моніторингу температури та вологості у зоні зберігання: система планування може коригувати черговість обробки товарів, щоб уникнути псування продукції.

У сфері динамічного управління робототехнікою також розглядається можливість кооперативного планування між різними типами роботів: наприклад, мобільні роботи доставляють товари у зону, де маніпулятори виконують точні операції з пакування. Така інтеграція вимагає адаптивних алгоритмів, що враховують не лише технічні параметри, але й екологічні й людські чинники.

Ще один приклад стосується розподілу завдань між людьми й роботами на складі: планувальник може враховувати фізичний стан працівника (наприклад, дані з пристроїв про втому) і спрямовувати найскладніші завдання до роботів [18-24].

У разі зміни попиту на замовлення система здатна перебудовувати графік роботи роботів та персоналу в реальному часі, мінімізуючи затримки.

При цьому інтеграція зелених технологій дозволяє роботам працювати в режимах енергоефективності, що зменшує вплив на довкілля.

Динамічне планування також допомагає запобігати перевантаженню транспортних коридорів у великих складах, забезпечуючи плавний рух як людей, так і машин.

Крім того, системи можуть враховувати фактори шумового забруднення: якщо в певній зоні рівень шуму перевищує допустиму норму, роботи перенаправляються в інші частини складу, щоб знизити стрес працівників.

Сенсори якості повітря можуть сигналізувати системі про перевищення концентрації пилу, що автоматично впливатиме на розподіл завдань, зменшуючи перебування людей у шкідливих умовах.

У випадках аварійних ситуацій, наприклад при несправності обладнання, динамічне планування забезпечує швидке перепризначення завдань між іншими роботами, що зменшує час простою.

Системи прогнозування на основі штучного інтелекту здатні моделювати сценарії завантаженості складу на кілька годин уперед і підлаштовувати графіки роботи під майбутні потреби [5, 17, 25].

На рис 1 наведено блок-схему, яка показує взаємозв'язки між логістикою, робототехнікою, безпекою, екологією та штучного інтелекту/цифровими двійниками у контексті Індустрії 5.0.

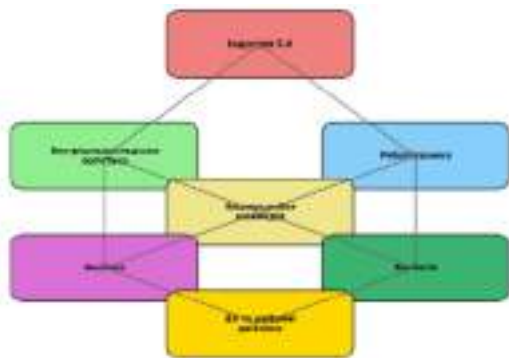


Рис.1. Взаємозв'язок сфер динамічного планування та автоматизації для Індустрії 5.0

На рис. 2 наведено приклади динамічного планування та автоматизації за певними галузями в Індустрії 5.0 за даними 2024 року [1].

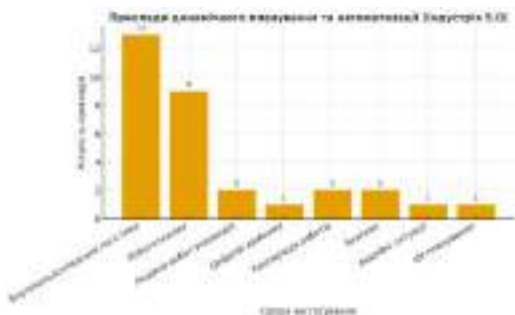


Рис.2. Динамічне планування та автоматизації за певними галузями в Індустрії 5.0

У робототехніці це може проявлятися у вигляді адаптивного навчання: роботи отримують нові стратегії планування завдань на основі даних із минулих змін, щоб уникати повторення неефективних дій.

Важливим аспектом є й підвищення безпеки: система може враховувати історію інцидентів на складі та коригувати маршрути так, щоб уникати ризикових зон.

Динамічне планування також дозволяє інтегрувати гнучкі зміни у випадку нових регуляторних вимог щодо екологічності чи умов праці [26-31].

III. ВИСНОВКИ

Таким чином, у сфері внутрішньоскладської логістики та робототехніки стає очевидним, що майбутнє за системами, здатними враховувати не лише технічну ефективність, але й сталість та людиноцентричність.

Наведені приклади демонструють, що поєднання цифрових двійників, сенсорних технологій, динамічного аналізу даних та гнучких алгоритмів дозволяє побудувати нове покоління планувальників.

Такі рішення створюють не просто автоматизовані системи управління, а справді адаптивні екосистеми, які враховують екологію, безпеку та комфорт людини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A simulation-based modified backtracking search algorithm for multi-objective stochastic flexible job shop scheduling problem with worker flexibility Appl. Soft Comput. (2021)
- [2] Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement J. Manuf. Syst. (2023)
- [3] Abdel-Basset, M., Mohamed, R., & Chang, V. (2025). A multi-criteria decision-making framework to evaluate the impact of industry 5.0 technologies: case study, lessons learned, challenges and future directions. Information Systems Frontiers, 27(2), 791-821.
- [4] Dehghan, S., Sattarpanah Karganroudi, S., Echchakoui, S., & Barka, N. (2025). The integration of additive manufacturing into industry 4.0 and industry 5.0: a bibliometric analysis (trends, opportunities, and challenges). Machines, 13(1), 62.
- [5] Sun, X., & Song, Y. (2025). Unlocking the Synergy: Increasing productivity through Human-AI collaboration in the industry 5.0 Era. Computers & Industrial Engineering, 200, 110657.
- [6] A hybrid differential evolution algorithm for flexible job shop scheduling with outsourcing operations and job priority constraints Expert Syst. Appl. (2022)
- [7] I. Nevliudov, S. Khrustalova, O. Chala and A. Sliusar, "Application of Bayes Theory Model to Determine the Optimal Variant of Technological Process for Production of MEMS Components," 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Zozuli, Ukraine, 2024, pp. 24-28, doi: 10.1109/MEMSTECH63437.2024.10620011.
- [8] Multi-agent deep reinforcement learning for dynamic reconfigurable shop scheduling considering batch processing and worker cooperation Robot. Comput.-Integr. Manuf. (2025)
- [9] Vzhesnievskiy, M., & Chala, O. (2024). Автоматизація внутрішньоскладських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції Industry 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 2(76), 34-38.
- [10] Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. : 2022. – 427 с. (Монографія).

- [11] Gurin, D., & et al. (2024). Web site reliability analysis using the python parsing method. *Journal of Universal Science Research*, 2(5), 113-126.
- [12] Новоселов С. П., Сичова О. В., Теслюк С. І. Багатопотокове програмне керування рухо промислового маніпулятора. Міжнародна науково-практична конференція "Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану", Коблево, 13-16 вересня 2022 р., с. 92-95.
- [13] Maksymova, S., & et al. (2024). Comparative Analysis of methods for Predicting the Trajectory of Object Movement in a Collaborative Robot-Manipulator Working Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(10), 38-48.
- [14] Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
- [15] Yevsieiev, V., & et al. (2025). Development of a program for processing 3d models of objects in a collaborative robot workspace using an HD camera. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 194-210.
- [16] Demska, N., & et al. (2025). Analysis of Methods, Models and Algorithms for a Collaborative Robots Group Decentralized Control. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(2), 235-249.
- [17] Невлюдов І. Ш. Node-RED та технологія промислового Інтернету речей : навч. посіб. / І. Ш. [18] Невлюдов, С. П. Новоселов, О. В. Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : Вид-во Іванченка І. С., 2024. – 207 с. – ISBN 978-617-8332-58-7.
- [19] Gurin, D., & et al. (2024). Using the Kalman Filter to Represent Probabilistic Models for Determining the Location of a Person in Collaborative Robot Working Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 66-75.
- [12] Yevsieiev, V., & et al. (2025). Development of a program for processing 3d models of objects in a collaborative robot workspace using an HD camera. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 194-210.
- [21] Chala, O., & et al. (2024). Analysis of Systems for Coordination of Enterprise Subsystems Control. *Journal of universal science research*, 2(10), 127-137.
- [22] Yevsieiev, V., & et al. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
- [23] Yevsieiev, V., & et al. (2024). Building a traffic route taking into account obstacles based on the A-star algorithm using the python language. *Technical Science Research In Uzbekistan*, 2(3), 103-112.
- [24] Vizir, Y., & et al. (2024). Lighting Control Module Software Development. *Journal of Universal Science Research*, 2(2), 29-42
- [25] Vzhesnevskiy, M., & Chala, O. (2024). Avtomatyzatsiia vnutrishno-skladskykh vyrobnychkh lohistychnykh protsesiv dlia vprovadzhennia kontseptsii Industry 4.0: enerhooshchadlyvist, produktyvnist, mobilnist, modulnist, avtonomnist. *Systemy upravlinnia, navihratsii ta zviazku: Zbirnyk naukovykh prats*, (2[76]), 34-38.
- [26] Вжеснівський М. О. Розробка кінематичної схеми транспортувального шатлу для внутрішньоскладської виробничої логістики / М. О. Вжеснівський, О. О.
- [27] Чала, Ю. В. Ромашов // Комп'ютерно-інтегрованих технології, автоматизація та робототехніка : матеріали І-ої Всеукр. конф., Харків, 16-17 травня : тези доповідей. – Харків, 2024. – С. 6 10. URI <https://openarchive.nure.ua/handle/document/26473>
- [28] Nevliudov, I., Vzhesnevskiy, M., Romashov, Y., & Chala, O. (2023). Mathematical modeling of mechatronic shuttles as automation objects for multilevel systems of intra-warehouse logistics. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (4(26), 135-144. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.26.135>
- [29] Чала, О., Сливка, А. (2023) Рівні засобів IoT в інформаційних технологіях. Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII Міжнародної конференції, Харків, С. 51-60.
- [30] Lighting Control Module Development / Y. Vizir, O. Chala, S. Maksymova, Ahmad Alkhalaileh // *Journal of Universal Science Research*. – 2023. – № 1(12). – P. 645-657.
- [31] Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture / I. Nevliudov, O. Chala, I. Botsman, et al. // *Functional Basis of Nanoelectronics : proceedings of the XII International Scientific Conference*, Odessa, September 20-24, 2021. – Odessa, 2021. – P. 74-77.
- [32] Вжеснівський М. О. Автоматичне керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів / М. О. Вжеснівський, О. О. Чала // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - 2025. - № 1(11). - С. 53-59. - DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1\(11\).06](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).06).
- [33] Nevliudov, S. Khrustalova, O. Chala and A. Sliushar, "Application of Bayes Theory Model to Determine the Optimal Variant of Technological Process for Production of MEMS Components," 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Zozuli, Ukraine, 2024, pp. 24-28, doi: 10.1109/MEMSTECH63437.2024.10620011.
- [34] Nevliudov, S. Khrustalova, O. Chala and A. Sliushar, "Application of Bayes Theory Model to Determine the Optimal Variant of Technological Process for Production of MEMS Components," 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Zozuli, Ukraine, 2024, pp. 24-28, doi: 10.1109/MEMSTECH63437.2024.10620011.

Оцінка технічного стану технологічного обладнання та діагностика неполадок у його роботі в умовах невизначеності

Матвій Білоусов, Микола Стародубцев, Сергій Шибанов,

Вікторія Невлюдова, Геннадій Макаренко

Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки. 14., email:

nikolaj.starodubcev@nure.ua

Анотація: У статті показано, що проблема оцінки технічного стану технологічного обладнання в умовах невизначеності може розглядатися як проблема розпізнавання образів і розроблено класифікаційну модель оцінки технічного стану технологічного обладнання, що реалізує один з можливих підходів до розпізнавання стану об'єкта діагностування – виділення ознак та класифікацію з подальшою ідентифікацією стану об'єкта. Встановлено, що найчастіше аварійна ситуація в роботі технологічного обладнання характеризується неявно вираженими ознаками. Запропоновано модель діагностики неполадок в роботі обладнання, яка дозволяє в умовах неповноти інформації та обмеженості часу діагностування прийняти рішення про тип дефекту з множини можливих.

Ключові слова: технологічне обладнання, технічний стан, класифікаційна модель, модель діагностики неполадок, дефекти, умови невизначеності.

I. ВСТУП

В даний час для виробництва РЕА характерні:

- складні процеси та обладнання;
- велика потужність;
- довгі технологічні ланцюжки;
- висока продуктивність обладнання;
- складні пристрої керування та прилади, які коригують та згладжують неполадки.

У міру ускладнення промислових систем зростають загальні витрати енергії та матеріалів, що викликає нагальну необхідність правильної та своєчасної діагностики роботи обладнання як з точки зору надійності виробництва, так і з точки зору зниження виробничих витрат. При цьому існує необхідність оцінки поточного стану технологічного устаткування. Без вирішення задач оцінки поточного технічного стану неможливе забезпечення якісного функціонування технологічного устаткування.

II. КЛАСИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

Оцінка технічного стану технологічного обладнання може здійснюватися у різних випадках та з різними цілями:

- для виявлення несправності, що зароджується;
- для раннього виявлення ненормального стану технологічного об'єкта;

– для прогнозування тенденції розвитку процесу у бік порушення його нормальної течії;

– для вибору відповідного способу дій з метою виправлення ненормального стану;

– для визначення причини несправності після того, як вона сталася.

Більшість літератури з оцінки технічного стану та виявлення несправностей і відмов у складних технічних системах містить аналітичний апарат, мало придатний для обґрунтування контролю за порушеннями роботи системи за умов невизначеності. Так, в даний час найбільш добре розроблені методи контролю технічних систем, які ґрунтуються на надійнісних характеристиках і відомій апіорній статистичній інформації про стан системи. При розробці методів та засобів діагностування технічного стану систем в умовах ненадійності вимірів та дефіциту статистичних даних доводиться оперувати поняттями з нечіткими, розпливчастими межами. У зв'язку з цим можливість використання традиційних "жорстких", тобто детермінованих та статистичних методів діагностики стає обмеженою, і тому виникає потреба у використанні досвіду розробників. Як правило, досвід і знання розробників мають якісний характер, ґрунтуються на неповній інформації.

Застосування лінгвістичного підходу [1,2] дає можливість використовувати в моделі діагностування поняття професійної мови, а методами теорії нечітких множин – обробити отриману інформацію. Зокрема, сучасні методи та засоби діагностування складних систем таких, наприклад, як електронні системи, є ергатичними, які, як правило, приймають рішення про стан електронних систем в умовах неповноти інформації [3,4].

Проблему оцінки технічного стану технологічного обладнання будемо розглядати як проблему розпізнавання образів. Важливою властивістю методів розпізнавання образів є те, що повне знання розподілу ймовірностей даних не потрібно. Одним з можливих підходів до розпізнавання стану об'єкта діагностування є виділення ознак і класифікація з подальшою ідентифікацією стану об'єкта.

Процедура виділення ознак та класифікації може розглядатися як триступеневий процес. Спочатку виконуються відповідні виміри, результати яких називають простором вимірів. На другому етапі за результатами вимірювань обчислюються або з них виділяються характерні ознаки, що утворюють простір ознак. Ознаки у просторі ознак повинні краще групуватися, ніж вимірювання у просторі вимірювань, і, можливо, утворювати більш прості вирішальні поверхні.

По суті, процес виділення ознак – це утримування класу дискримінуючої інформації та відсіювання класу непотрібної інформації із системи вимірювань. Далі застосовуються різні вирішальні правила по відношенню до простору ознак для класифікації векторів ознак на класи, після чого може бути проведений процес діагностування технічного стану об'єкта. Найпростішим прикладом може бути вектор ознак з двома можливими образами:

- відповідними нормальній роботі обладнання;
- відповідними ненормальній роботі.

Більш корисним є розпізнавання образів для оцінки технічного стану технологічного обладнання на основі вибірки, що класифікується наступним чином:

- комбінація ознак №1, що відповідає технічному стану "дуже погане";
- комбінація ознак №2, що відповідає технічному стану "погане";
- комбінація ознак №3, що відповідає технічному стану "середнє" і так далі.

Вирішальні правила можуть бути обрані апіорі або встановлені в ході процесу навчання. Задача розпізнавання образів, отже, може розглядатися як задача конструювання функцій системи кінцевих векторів ознак різних класів, так щоб функції розбивали простір класифікації на області, кожна з яких містить ознаки одного класу. При конструюванні функцій, які називають дискримінуючими функціями, система образів, для яких відома приналежність до класів, використовується для "тренування" класифікатора. Як тільки класифікатор навчений, він стає частиною системи розпізнавання образів, яка тоді стає здатною обробляти вимірювання невідомого образу, що вводяться, і класифікувати цей образ, відносячи його до одного або декількох відомих класів.

Теоретично, якщо є нескінченно велика кількість результатів вимірювань, так що функції щільності точно відомі, неідентифікований стан процесу може бути віднесено до найбільш ймовірного кластера, наприклад, на підставі їхнього взаємного положення (виміряного будь-яким відповідним способом).

Разом з тим, в умовах невизначеності, наявна сукупність результатів вимірювань може не дати чіткої однозначної відповіді. Тому схема, яка дає ступінь належності до кількох кластерів, може виявитися більш осмисленою, ніж схема, яка прагне дати цілком певний діагноз [5].

Нечітку модель оцінки технічного стану технологічного обладнання представимо у вигляді (X, P, D) , де $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$ – багатовимірний простір ознак, які впливають на оцінку, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ – розбиття X на нечіткі еталонні класи P_i , $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – оцінки, відповідні класам P_i .

Процес побудови нечіткої моделі оцінки технічного стану складається з наступних етапів.

Шляхом опитування експертів виділяється множина ознак $X_1, X_2, \dots, X_m$, що найбільше впливають на вибір рішення $D_i \in D$, і формується простір $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$.

З кожною із виділених ознак X_j пов'язуємо деяку лінгвістичну змінну A_j зі своїми лінгвістичними значеннями $\{a_{kj}, k_j = 1, \dots, S_j, j = 1, \dots, m\}$.

Для всіх лінгвістичних значень шляхом експертного опитування будуються $\mu_{k_1}(x_1), \mu_{k_2}(x_2), \dots, \mu_{k_m}(x_m)$ – функції приналежності на відповідних базових шкалах $X_1, X_2, \dots, X_m$ [6,7].

Якісна структура моделі діагностування представляється у виді таблиці, яка має $S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_m$ рядків і $(m + 1)$ стовпців. Рядки таблиці відповідають різноманітним наборам лінгвістичних значень змінних A_j . Для кожного набору в останньому стовпці таблиці спеціаліст-експерт проставляє в лінгвістичних термінах одну з можливих оцінок $D_i \in D$, яку він поставив би в ситуації, словесно описаній відповідним набором.

На заключному етапі будується нечітка модель оцінки технічного стану, у якій кожен нечіткий клас P_i розбиття P характеризується функцією приналежності μ_i , що задається формулою

$$\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = \bigvee_{\{a_{kj}\} \in R_j} \mu_{k_1}(x_1) \wedge \mu_{k_2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{k_m}(x_m),$$

де R_j – множина наборів $\{a_{kj}, k_j = 1, \dots, S_j, j = 1, \dots, m\}$, яким в таблиці відповідає діагноз D_i .

Нехай ситуація, що характеризує стан об'єкта, представлена точкою $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ в просторі ознак X . Підставимо точку x^0 у функції належності $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Серед усіх $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ знаходимо функцію, що приймає максимальне значення у точці x^0 . Вибираємо оцінку D_i , що відповідає еталонному класу P_i , для якого $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ у точці x^0 приймає максимальне значення.

Запропонований підхід до розпізнавання стану об'єкта діагностування за умов неповноти інформації формалізує досвід фахівця-експерта, а, по суті, імітує поведінку людини в заданій предметній галузі. Модель заснована на використанні інтегрованого досвіду спеціалістів-експертів і може застосовуватися для вирішення слабо формалізованих задач оцінки технічного стану технологічного обладнання. Вона дозволяє отримати якісну оцінку поточного стану технологічного устаткування в лінгвістичних термінах.

III. МОДЕЛЬ ДІАГНОСТИКИ НЕПОЛАДОК У РОБОТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Актуальною проблемою діагностики технологічного обладнання є розробка моделей діагностики неполадок за умов дефіциту часу діагностування та відсутності реальної статистики.

Методи діагностування технологічного обладнання суттєво відрізняються від методів діагностування окремого виду апаратури, оскільки технологічне обладнання є сукупністю технічних засобів, об'єднаних в єдиний комплекс. Реальний процес діагностування технологічного обладнання є прерогативою фахівців високого класу – експертів, які мають високий рівень компетентності в даній галузі. Крім загальнодоступних знань, сконцентрованих у відповідній літературі, довідниках тощо, експерт має індивідуальні знання, засновані на особистому досвіді. З урахуванням цього, засоби алгоритмічного опису та рішення поставленого

діагностичного завдання повинні мати можливість відображати знання та практичний досвід експертів.

Задачу діагностики неполадок сформулюємо в такий спосіб. Нехай $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множина параметрів (ознак), що характеризують технічний стан технологічного обладнання, і нехай $N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}$ – множина можливих неполадок в устаткуванні.

З кожним параметром $x_i \in X$ зв'яжемо лінгвістичну змінну L_i зі своїми значеннями l_{ij} , ($i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, q_i$), наприклад, l_{i1} ="мале значення параметра x_i ", l_{i2} ="середнє значення параметра x_i ", l_{i3} ="велике значення параметра x_i ", або, l_{i1} ="значення параметра x_i знаходиться ліворуч від поля допуску", l_{i2} ="значення параметра x_i знаходиться в межах поля допуску", l_{i3} ="значення параметра x_i знаходиться праворуч від поля допуску", при цьому значення q_i може дорівнювати $1, 2, \dots, Q$.

Утворимо множину $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, елементами якого є значення l_{ij} ; $m = \sum_{i=1}^n q_i$. Зазначимо, що множина S може містити і числові значення параметрів $x_i \in X$.

На основі наявної апіорної інформації та знань експерта зіставимо кожній неполадці N_k ($k = 1, \dots, p$) підмножину $D_k = \{S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{kj}\}$, характерне для неполадки N_k ($D_k \subset S$). Тоді технологічне обладнання як об'єкт діагностування є нечіткою множиною $\tilde{D} = \{\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \dots, \tilde{D}_p\}$, таким, що перетин підмножин $\tilde{D}_k$ не дорівнює порожній множині.

У процесі діагностування рішення про тип неполадки N_k^* визначатимемо максимальним значенням нечіткої міри перетину кожної нечіткої множини $\tilde{D}_k$ з нечіткою множиною $\tilde{E} = \{\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \dots, \tilde{E}_t\}$ ($t \leq n$) значень параметрів, визначених в результаті діагностування технологічного об'єкта, що зводиться до виразу:

$$N_k^* = \arg \max_{D_k} g(\tilde{E} \cap \tilde{D}_k),$$

де g – нечітка міра перетину нечітких множин $\tilde{E}$ і $\tilde{D}_k$.

Технічний стан технологічного об'єкта як об'єкта діагностування опишемо нечіткою множиною

$$\tilde{N}_E = \left\{ \left(N_k, \mu_{\tilde{N}_E}(N_k) \right) \mid N_k \in N \right\},$$

де значення ФП $\mu_{\tilde{N}_E}(N_k)$ визначаються як ступінь нечіткої пов'язаності множин $\tilde{E}$ та $\tilde{D}_k$:

$$\mu_{\tilde{N}_E}(N_k) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{D}_k}(S_i) \wedge \mu_{\tilde{E}}(S_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{D}_k}(S_i)}. \quad (1)$$

Визначимо ступінь впливу неполадки N_k на працездатність технологічного обладнання через нечітку λ -міру множини $\tilde{D}_k$ до [8]. Для нечіткої міри в загальному випадку не повинна виконуватися умова адитивності. Для побудови нечітких мір використовується наступне λ -правило [9]:

якщо A, B - нечіткі множини, $A \cap B = \emptyset$, то

$$g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B), \quad -1 < \lambda < \infty; \quad (2)$$

якщо $A \cap B \neq \emptyset$, то вираз (2) набуває вигляду

$$g(A \cup B) = \frac{g(A) + g(B) - g(A \cap B) + \lambda g(A)g(B)}{1 + \lambda g(A \cap B)}. \quad (3)$$

Так як носії множин $\tilde{D}_k$, що характеризують неполадки, перетинаються, побудуємо на множині $\tilde{D}$ нечітку міру за аналогією з (3). Вираз (3) можна переписати у вигляді:

$$g(A \cup B) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{(1 + \lambda g(A))(1 + \lambda g(B))}{1 + \lambda g(A \cap B)} - 1 \right]. \quad (4)$$

Тоді для v множин $\tilde{D}_k$ ($1 < v < p$) вираз (4) набуває виду:

якщо v – парне, то

$$g(\cup_{k=1}^v \tilde{D}_k) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Pi_1 \Pi_3 \dots \Pi_{v-1}}{\Pi_2 \Pi_4 \dots \Pi_v} - 1 \right], \quad (5)$$

якщо v – непарне, то

$$g(\cup_{k=1}^v \tilde{D}_k) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Pi_1 \Pi_3 \dots \Pi_v}{\Pi_2 \Pi_4 \dots \Pi_{v-1}} - 1 \right], \quad (6)$$

де

$$\Pi_t = \prod_{k_1 < k_2 < \dots < k_t} \left(1 + \lambda g \left(\prod_{i=1}^t \tilde{D}_{k_i} \right) \right),$$

$t = 1, 2, \dots, v$.

Параметр λ знаходиться з умови нормування

$$g \left(\bigcup_{k=1}^p \tilde{D}_k \right) = 1.$$

Тоді для ідентифікації неполадки обчислимо нечіткий інтеграл

$$N' = \arg \int_{\tilde{D}} \mu_{\tilde{N}_E}(N_k) \circ g(\cdot). \quad (7)$$

В результаті обчислення інтеграла (7) отримуємо множину N' найбільш очікуваних дефектів. Так як $N' \subset N$, уточнюємо множину $\tilde{D}$, звужуючи її до $\tilde{D}'$, і відповідно уточнюємо ФП $\mu_{\tilde{N}_E}(N_k)$, $N_k \in N'$. Оскільки носії підмножин $\tilde{D}'$ перетинаються, для ідентифікації неполадки повторно беремо нечіткий інтеграл на області $\tilde{D}'$ по мірі v , що відповідає ступеню стійкості станів S_{k_i} у класі D_k , тобто

$$N_k^* = \arg \int_{\tilde{D}'} \mu_{\tilde{N}_E}(N_k) \circ v(\cdot). \quad (8)$$

Міра $v(\cdot)$ визначається із співвідношення [9]:

$$v(\cdot) = 1 - \eta(\cdot),$$

де $\eta(\tilde{D}_k)$ – ступінь нечіткої пов'язаності множини $\tilde{D}_k$ в $\tilde{D}$, яка обчислюється за аналогією з (1) через

$\eta_1(\tilde{D}_k, \tilde{D}_j)$ – ступінь нечіткої зв'язаності $\tilde{D}_k$ з $\tilde{D}_j$ ($i = 1, \dots, p; i \neq k$); $\eta_2(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j)$ – ступінь нечіткої зв'язаності $\tilde{D}_k$ з $\tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j$ ($i, j = 1, \dots, p; j < i; i, j \neq k$); $\eta_{p-1}(\tilde{D}_k, \cap_i \tilde{D}_i)$ – ступінь нечіткої пов'язаності $\tilde{D}_k$ з $\cap_i \tilde{D}_i$ ($i = 1, \dots, p; i \neq k$):

$$\eta(\tilde{D}_k) = \sum_i \eta_1(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i) - \sum_{i,j} \eta_2(\tilde{D}_k, \tilde{D}_i \cap \tilde{D}_j) + \dots + (-1)^{p-1} \eta_{p-1}(\tilde{D}_k, \cap_i \tilde{D}_i).$$

Значення нечіткої міри $\nu(\cdot)$ для об'єднань множин $\cup_{k=1}^p \tilde{D}_k$ ($1 < \nu < p$) обчислюються аналогічно (5)-(6). Нечіткий інтеграл (8) дозволяє ідентифікувати неполадку N_k^* в роботі технологічного обладнання.

IV. ВИСНОВКИ

Розроблена модель діагностики неполадок реалізує двоетапну процедуру прийняття рішень про тип неполадки. На першому етапі визначається клас найбільш очікуваних дефектів, на другому – ідентифікується неполадка. Розпізнавання технічного стану технологічного обладнання здійснюється з використанням нечіткого інтеграла Сугено. Модель працює в умовах відсутності реальної статистики порушень працездатності технологічного обладнання та дефіциту часу діагностування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Zadeh L. A. Linguistic variables, approximate reasoning and dispositions. Medical Informatics. Volume 8, Issue 3.1983. Pages 173-186.
- [2] Lieb Hans-Heinrich. Linguistic Variables. John Benjamins B.V. 1993. 275 p.
- [3] Поморова О.В. Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем: Монографія. Хмельницький: ТОВ «Тріада-М», 2007. 253 с.
- [4] Герасимов Б. М., Грабовський Г. Г., Рюмшин Н. А. Нечіткі множини в задачах проектування, управління та обробки інформації. К.: Техніка, 2002. 140 с.
- [5] Кутковецький В. Я. Розпізнавання образів. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. 420 с.
- [6] Дмитрієва О. А., Зайцева О. С. Моделі прийняття рішень на основі теорії нечітких множин. Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка: всеукр. наук. зб. Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 10 (153). С. 266–273.
- [7] Кравець П., Киркало Р. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою. НУ «Львівська політехніка». 2009. С. 115-123.
- [8] Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: за редакцією С.А. Ус ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с.
- [9] Sugeno M. Fuzzy measure and fuzzy integral. Trans.SICE. 1972. V.8. №2. P.95-102.
- [10] H. Attar, A. T. Abu-Jassar, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, I. Nevliudov and A. K. Luhach, "Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar", Comput. Intell. Neurosci., vol. 2022, pp. 3046116, 2022.
- [11] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. J. Math. Comput. Sci., 11(1), 520-542.
- [12] Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 9140156, 2022
- [13] Mustafa, S.K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V.. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology, 70(1), 139-145.
- [14] Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. International Research Journal of Multidisciplinary Technovation, 5(6), 9-18.
- [15] Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Filippenko, I. (2020). Development of an architectural model to automate the management of the process of creating complex cyberphysical industrial systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 4(3-106), 44-52.
- [16] Amer Abu-Jassar, Hassan Al-Sukhni, Yasser Al-Sharo, Svitlana Maksymova, Vladyslav Yevsieiev, Vyacheslav Lyashenko, "Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 72, no. 11, pp. 294-306, 2024. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I11P129>
- [17] Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Nataliia Demska, Nikolaj Starodubcev, Oleksandr Klymenko, "Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT", 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), pp.1-5, 2023.
- [18] Nevliudov , I. ., Yevsieiev , V. ., Maksymova , S. ., Gopejenko , V. ., & Kosenko , V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. Advanced Information Systems, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
- [19] Hybrid Approaches to Building Intelligent Robotic Systems on FPGAs and MCUs for Industry 5.0 Tasks / V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska, N. Starodubcev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2025) : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE – P.30-3

Комп'ютерні моделі, методи та інтелектуальні системи для віртуалізації та оптимізації медичних втручань у складних біологічних об'єктах

Дмитро Кухаренко¹, Сергій Середа¹

1. Навчально-науковий інститут електричної інженерії та інформаційних технологій,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, УКРАЇНА,
Кременчук, вул. Першотравнева, 20. email: dkuch100@gmail.com

Анотація: Розроблена інтелектуальна система являє собою універсальну архітектуру, що забезпечує можливість її адаптації для різних органів та патологічних станів. Основна ідея побудови полягає у створенні єдиного середовища, де поєднано віртуальні анатомічні реконструкції, отримані на основі медичних зображень (КТ, МРТ, ультразвукових даних), із динамічними фізіологічними параметрами пацієнта. Такий підхід дозволяє формувати не лише статичну модель органа чи системи органів, але й відображати їх функціональний стан у реальному часі.

Особливістю архітектури є модульність та відкритість: вона передбачає інтеграцію з медичними інформаційними системами, автоматизованими інтерфейсами збору та обробки даних, а також із системами підтримки прийняття лікарських рішень. Інтелектуальні алгоритми дозволяють аналізувати великі обсяги біомедичної інформації, виокремлювати ключові діагностичні ознаки, будувати індивідуальні прогнози та формувати оптимальні сценарії хірургічних чи терапевтичних втручань.

Система орієнтована на вирішення завдань передопераційного планування, де критично важливим є урахування індивідуальної анатомічної мінливості. За рахунок моделювання функціональної взаємодії м'язових і тканинних структур стає можливим прогнозування результатів втручання ще до його проведення. Зокрема, у сфері офтальмології система дозволяє відтворювати співдружну роботу очорухових м'язів обох очей та відновлювати єдину зорову вісь, що створює передумови для повернення бінокулярного зору.

У гастроентерології інтелектуальна система забезпечує побудову тривимірних моделей шлунка з урахуванням індивідуальних геометричних характеристик у декартовій системі координат. Це відкриває можливість високоточного визначення координат на його внутрішній поверхні та оптимального планування малоінвазивних хірургічних втручань.

Таким чином, інтелектуальна система є гнучким і масштабованим інструментом, який здатен інтегрувати різні типи медичних даних, здійснювати автоматизований аналіз фізіологічних сигналів (наприклад, фонокардіограм), моделювати складні біологічні об'єкти та формувати обґрунтовані рекомендації для лікаря. Це забезпечує новий рівень персоналізованої медицини та підвищує ефективність лікувально-діагностичних процедур.

Ключові слова: комп'ютерна модель, методи і моделі, інтелектуальна система, віртуалізація та оптимізація, складні біологічні об'єкти.

I. ВСТУП

У сучасній медичній практиці спостерігається стійка тенденція до переходу від стандартних протоколів лікування до персоналізованої медицини, яка ґрунтується на індивідуальних морфологічних та функціональних особливостях пацієнта. Одним із ключових інструментів цього підходу є комп'ютерне моделювання біологічних процесів, що дозволяє попередньо прогнозувати перебіг патологій та планувати лікування з високою точністю.

Видатні результати в цій сфері продемонстровані дослідниками, зокрема А. Liu та співавторами (2021), які створили моделі кровотоку для оптимізації лікування судинних патологій. Роботи J. T. Oden (2017) зробили значний внесок у розвиток концепції «цифрового пацієнта» — віртуального клону людського організму для симуляції медичних втручань. У вітчизняному науковому середовищі варто відзначити дослідження В.В. Пилипенка (ХНУРЕ), присвячені інтелектуальним системам аналізу біомедичних сигналів, а також розробки Ю.В. Косарева (ІПМЕ НАН України) у галузі моделювання динаміки клітинних процесів. Також О.Г. Аврун, Є.В. Бодяньський та інші дослідники з Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) розробили інтелектуальні технології для медичної діагностики, лікування та реабілітації, що включають моделювання біофізичних процесів та аналіз діагностичних даних.

Незважаючи на значні досягнення, залишається низка проблем, пов'язаних із адаптацією моделей до конкретного пацієнта, поєднанням морфологічних та функціональних параметрів в єдиній системі, а також з інтеграцією аналізу сигналів у віртуальне планування втручань. Особливо гостро ці питання постають у випадках складних біологічних об'єктів, таких як очоруховий апарат, черепно-мозкові структури, шлунково-кишковий тракт тощо.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Вперше побудовано універсальну архітектуру інтелектуальної системи планування втручань із можливістю застосування до різних органів і патологій.
2. Вперше розроблено комплексну модель, що дозволяє об'єднати віртуальні анатомічні реконструкції з даними фізіологічних сигналів;
3. Вперше запропоновано метод автоматизованого аналізу фонокардіограм, орієнтований на інтеграцію з інтерфейсами медичних систем;
4. Вперше запропоновано використовувати інтелектуальну систему передопераційного планування для відновлення бінокулярного зору, шляхом

моделювання співдружної роботи м'язового комплексу обох очних яблук з однією зоровою віссю.

5. Вперше запропоновано метод створення тривимірної моделі шлунку, який за рахунок введення геометричних властивостей шлунку в декартовій системі координат, дозволяє враховувати індивідуальну анатомічну мінливість при комп'ютерному плануванні хірургічних втручань.

6. Вперше запропоновано метод визначення координат на внутрішній поверхні моделі шлунку людини, який за рахунок визначення геометричних властивостей шлунку дозволяє проводити комп'ютерне планування хірургічних втручань.

7. Удосконалено математичні та комп'ютерні моделі складних біологічних об'єктів, що дозволяє враховувати індивідуальну анатомічну мінливість при комп'ютерному плануванні мало інвазивних втручань.

8. Удосконалено математичний опис огинаючої основних тонів фонокардіосигналу у вигляді несиметричних гаусових імпульсів, що підвищує точність автоматизованого аналізу.

II. МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтелектуальна система призначена для автоматизації процесів аналізу біомедичних даних і комп'ютерного планування хірургічних втручань. Її архітектура побудована на модульному принципі, що дозволяє адаптувати програмний комплекс для роботи з різними органами та типами патологій. Система об'єднує кілька ключових функціональних блоків:

- **модуль віртуальних реконструкцій** – формує тривимірні моделі органів на основі результатів КТ, МРТ чи УЗД;
 - **модуль обробки фізіологічних сигналів** – виконує автоматизований аналіз даних, зокрема фонокардіограм, з можливістю інтеграції результатів в анатомічну модель;
 - **модуль передопераційного планування** – дозволяє лікарю моделювати різні сценарії втручання та прогнозувати їх результати.
- У практичному застосуванні система забезпечує:
- персоналізоване планування операцій з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнта;
 - точне визначення координат у тривимірних моделях органів;
 - прогнозування ефективності втручань ще до їх виконання;
 - інтеграцію з медичними інформаційними системами для спрощення документообігу та обміну даними.

Рішення може використовуватися в офтальмології для відновлення біокулярного зору, у гастроентерології для планування малоінвазивних операцій на шлунку, а також у кардіології для аналізу фонокардіосигналів. Завдяки універсальній архітектурі система легко масштабується й може застосовуватись у багатьох медичних галузях.

Проаналізовано теоретичні основи, існуючі методи та програмні засоби моделювання біологічних процесів, стан досліджень в галузі біомедичного моделювання, математичні моделі у медичних дослідженнях,

проблеми точності та адаптації до індивідуального пацієнта. Проведено ґрунтовний аналіз методик побудови адаптивних моделей для біологічних об'єктів, зосереджуючи увагу на сучасних підходах до тривимірної реконструкції анатомічних структур на основі медичних зображень. Особливу увагу приділено алгоритму Marching Cubes, який широко використовується для візуалізації та моделювання в медицині.

Адаптивне моделювання біологічних об'єктів є ключовим напрямом у сучасній біоінженерії та медичній візуалізації. Завдяки розвитку комп'ютерних технологій стало можливим створення високоточних тривимірних моделей анатомічних структур, що сприяє покращенню діагностики, планування хірургічних втручань та навчання медичних фахівців.

Першим етапом є отримання медичних зображень за допомогою методів комп'ютерної томографії (КТ), магнітно-резонансної томографії (МРТ) або ультразвукового дослідження (УЗД). Ці зображення проходять попередню обробку, яка включає нормалізацію контрастності, фільтрацію шумів та покращення чіткості.

Сегментація є критичним етапом, що полягає у виділенні області інтересу (ROI) на зображеннях. Сучасні методи сегментації використовують алгоритми глибокого навчання, такі як U-Net та Mask R-CNN, які демонструють високу точність у виділенні складних анатомічних структур.

Після сегментації здійснюється тривимірна реконструкція анатомічної структури. Одним із найпоширеніших алгоритмів для цього є Marching Cubes, який дозволяє створювати полігональні сітки ізоперхів з тривимірного скалярного поля.

Алгоритм Marching Cubes був розроблений Вільямом Лоренсеном та Гарві Клайном у 1987 році для побудови тривимірних поверхонь з медичних зображень. Він працює шляхом проходження через тривимірне скалярне поле, розбиваючи його на куби та визначаючи, які частини ізоперхів проходять через кожен куб. Це дозволяє створювати високоточні тривимірні моделі анатомічних структур. У медичній візуалізації алгоритм Marching Cubes широко використовується для реконструкції органів та тканин з КТ та МРТ зображень. Його перевагами є висока точність, ефективність та здатність до паралельної обробки даних.

Адаптивні моделі повинні враховувати індивідуальні анатомічні особливості пацієнтів. Це досягається шляхом інтеграції фізіологічних даних, таких як васкуляризація, темп росту та структурні особливості тканин. Такі моделі дозволяють проводити симуляцію змін внаслідок лікування або прогресування захворювання.

Алгоритм роботи універсального методу моделювання може працювати на основі поставленого лікарем діагнозу (включаючи такі методи дослідження, як ультразвуковий, рентгівівська томограма, тощо) і самостійно створювати комп'ютерні моделі складних біологічних об'єктів на основі внутрішньої бази даних з урахуванням вказаної патології.

Також проведено всебічний аналіз сучасних методів побудови адаптивних моделей для біологічних об'єктів з акцентом на особливостях анатомічного моделювання,

персоналізації, а також алгоритмах, що забезпечують високу точність відтворення складних біологічних структур. Основну увагу зосереджено на проблематиці створення моделей, які здатні динамічно змінюватися відповідно до індивідуальних анатомічних характеристик пацієнта — віку, форми органа, локалізації патології, особливостей тканини тощо.

Особливий наголос зроблено на адаптивному моделюванні гемангіом — доброякісних судинних утворень з нерегулярною формою. У зв'язку з тим, що форма і об'єм таких пухлин можуть значно варіюватися, класичні методи вимірювання (за допомогою сіток або прозорих плівок) є неточними та суб'єктивними. Саме тому виникає потреба у застосуванні комп'ютерної візуалізації та тривимірного моделювання, які дозволяють провести точний розрахунок площі, об'єму та глибини ураження тканин.

У роботі представлено методику цифрової реконструкції гемангіоми на основі фотозображень або медичних сканів (МРТ, КТ). За допомогою програмного забезпечення, зокрема середовища LabVIEW, виконано апроксимацію контуру пухлини із застосуванням поліномів 3-го та 5-го ступеня для увігнутих та опуклих ділянок відповідно. Далі було сформовано 3D-модель на основі обчислення тисяч трикутних елементів, що дозволило з високою точністю визначити геометричні параметри пухлини рис.1.

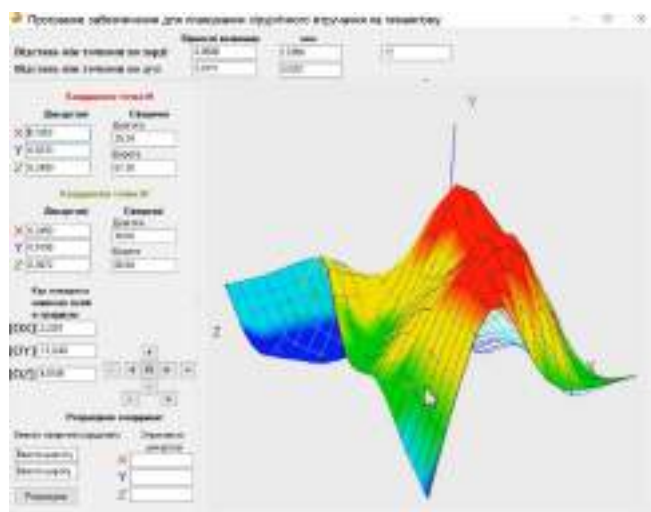


Рисунок 1 – Інтелектуальна система моделювання і передопераційного планування на гемангіому

Розроблений віртуальний пристрій здатний здійснювати широкий спектр операцій обробки зрізів, у тому числі їх реконструкцію у 3D-модель та збереження створеної моделі у STL-форматі.

Розроблена програма була використана для відтворення менінгіоми, зрізи якої були зроблені у 3 площинах, що демонструє можливість відтворювати одну модель, користуючись різними планами біологічного об'єкту.

Для складніших операцій, що включають послідовні обертання навколо декількох осей, використовують добуток кількох матриць обертання у визначеному порядку. Такий підхід дозволяє реалізувати вільне маніпулювання об'єктом у просторі — зокрема, у

хірургічному плануванні, коли важливо оцінити структуру з усіх боків.

Таким чином, використання матриць обертання у системах медичного моделювання забезпечує точне і контрольоване управління просторовим положенням моделей анатомічних структур, що є необхідним для діагностики, візуального аналізу та інтерактивної взаємодії з цифровими об'єктами.

Проведено моделювання патологічних станів шлунково-кишкового тракту (рис.2) та 3D реконструкції менінгіоми та голови людини.

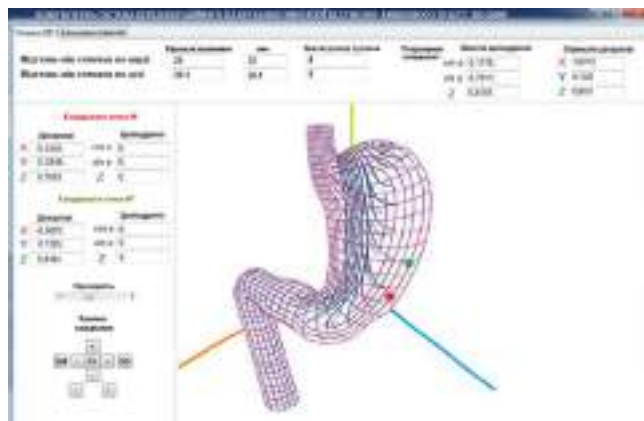


Рисунок 2 – Інтелектуальна система моделювання і передопераційного планування на шлунково-кишковий тракт людини

Запропонована архітектура інтелектуальної медичної системи. Прототип єдиної платформи. Програмна реалізація. Взаємодія з лікарем: візуалізація, управління сценаріями.

Описано алгоритми, що забезпечують визначення меж резекції, обрахунок об'єму ураженої тканини та аналіз зон підвищеного ризику (наприклад, близькість до нервових структур або судин). Такі алгоритми базуються на параметричному описі 3D-моделі та можливості користувача вказувати контрольні точки на поверхні моделі.

Здійснено технічну реалізацію інтерактивного середовища, у якому лікар може:

1. завантажити модель органу пацієнта із запропонованих;
2. обрати сегмент для операції;
3. візуалізувати межі втручання;
4. розрахувати об'єм тканин, що підлягають видаленню;
5. оцінити вплив втручання на сусідні структури.

Програмне забезпечення працює наступним чином: за допомогою лівої клавіші миші встановлюємо фіксовану точку М, за допомогою правої клавіші встановлюємо фіксовану точку М'. У відповідних вікнах відображаються декартові координати. При переміщенні фіксованих точок по поверхні моделі ШКТ декартові координати змінюються. За допомогою колеса маніпулятора типу “миші” можливо здійснювати збільшення моделі ШКТ.

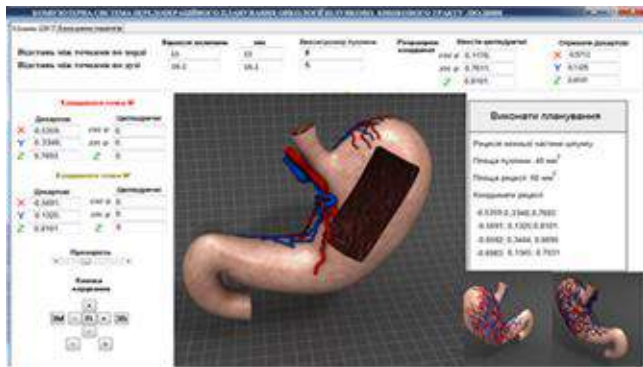


Рисунок 3 – Розвинена інтелектуальна система моделювання і передопераційного планування для шлунково-кишкового тракту людини

Програмне забезпечення також передбачає здійснення розрахунків декартових координат точки, якщо заздалегідь відомі її циліндричні координати (стосується тільки тонкого та товстого кишечника). Для цього в відповідні вікна необхідно ввести циліндричні координати ($\cos \varphi$, $\sin \varphi$ та r) і натиснути кнопку «Розрахунок». В відповідних вікнах отримаємо декартові координати. Якщо натиснути кнопку «Розрахунок» без введення заздалегідь циліндричних координат то отримаємо повідомлення «Введіть циліндричні координати».

Другий спосіб повернути модель можна за допомогою органів керування маніпулятора типу «миша». Для цього необхідно навести курсор маніпулятора на модель, натиснути і утримувати колесо маніпулятора. Пересуваючи маніпулятор по робочій поверхні, модель ШКТ обертається на відповідний кут, який прямо пропорційний величині і напрямку переміщення маніпулятора. Крім визначення декартових і циліндричних координат довільної точки на поверхні моделі ШКТ, програмне забезпечення може робити наступні розрахунки:

1. визначення відстані між точками по хорді і по дузі у відносних одиницях так і в міліметрах;
2. визначення об'єму, маси і координати центра пухлини;
3. розрахунок декартових координат, якщо відомі циліндричні координати;
4. програмне забезпечення дозволяє змінювати параметри пухлини. Для цього необхідно за допомогою маніпулятора типу «миша», підвести курсор до вікон «Ввести розмір пухлини» і вставити відповідні значення. Ці розрахунки необхідні для вдосконалення передопераційного планування.

Приклад роботи інтелектуальної системи для відновлення бінокулярного зору приведений на рисунку

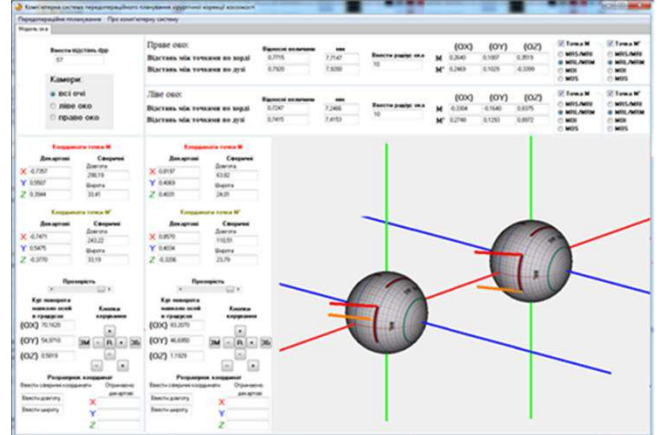


Рисунок 4 – Інтелектуальна система моделювання і передопераційного планування для відновлення бінокулярного зору

Також інтелектуальна система показує високі результати при моделюванні та підборі черепно-мозкових імплантів і черепу зокрема рис.5,6.

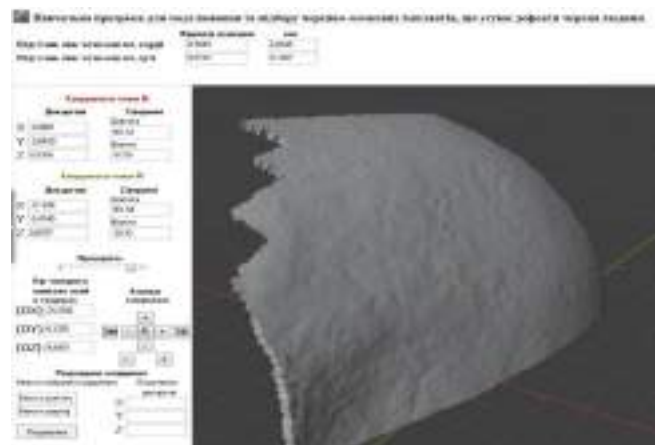


Рисунок 5 – Інтелектуальна система моделювання і підбору черепно-мозкових імплантів, форма та розмір імпланту



Рисунок 6 – Інтелектуальна система моделювання і підбору черепно-мозкових імплантів, суміщення імпланту з черепом людини

III. ВИСНОВКИ

Основні висновки роботи такі:

1. Проведено систематизований аналіз сучасного стану біомедичного моделювання, математичних методів відтворення складних анатомічних структур, програмних засобів візуалізації та передопераційного планування. Виявлено ключові проблеми — зокрема, недостатню адаптивність моделей до індивідуальних особливостей пацієнта та обмежену інтеграцію з фізіологічними даними.

2. Розроблено універсальну архітектуру інтелектуальної системи, яка забезпечує створення віртуальних анатомічних моделей із можливістю їх персоналізації та застосування до широкого кола клінічних задач — від офтальмології до онкохірургії.

3. Побудовано тривимірну модель шлунка людини з урахуванням геометричних характеристик у декартовій системі координат. Запропоновано методику визначення координат на внутрішній поверхні моделі, що дає змогу проводити точне передопераційне планування з урахуванням анатомічної мінливості.

4. Запропоновано математичну модель, яка поєднує цифрову реконструкцію анатомії з аналізом фізіологічних сигналів — зокрема, фонокардіограм. Удосконалено метод опису огинаючої основних тонів ФКГ у вигляді несиметричних гаусових імпульсів, що дозволяє підвищити точність автоматизованого аналізу серцевої діяльності.

5. Реалізовано інтерактивне програмне забезпечення, що забезпечує візуалізацію, вимірювання просторових характеристик, обертання моделі, визначення координат та моделювання хірургічних втручань. Система дозволяє медичному фахівцю працювати з тривимірною моделлю як з анатомічною навігаційною картою.

6. Проведено статистичну оцінку адекватності побудованих моделей із використанням критеріїв Стюдента та Фішера, що підтвердило високу відповідність результатів моделювання реальним клінічним даним.

Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції інтелектуальних адаптивних моделей у клінічну практику для персоналізованого планування втручань, автоматизованої діагностики та медичної освіти. Розроблені методи можуть бути основою для створення комплексних систем підтримки прийняття рішень у високотехнологічній медицині.

7. Запропоновано метод реконструкції черепа за томографічними даними, що дозволило створити комп'ютерну і фізичну модель черепно-мозкового імпланту, що враховує індивідуальну анатомічну мінливість пацієнта.

8. Запропоновано метод відновлення бінокулярного зору за рахунок хірургічного втручання за рахунок передопераційного планування шляхом створення комп'ютерної моделі обох очних яблук з однією зоровою віссю, що враховує індивідуальну анатомію пацієнта.

9. Зроблено аналіз основних похибок при плануванні оперативних втручань на гемангіому, таких як: похибка наведення хірургічного інструменту механічної підсистемою маніпулятора ($\delta_P=0,41$ мм), середньоквадратична помилка візуалізації гемангіоми $\delta_B=2,24$ мм, $\delta_C=1,13$ мм — похибка визначення координат межі здорової тканини; $\delta_M=0,5$ мм — методична похибка визначення координат центру області оперативного втручання, $\delta_T=0,61$ — похибка за радіальними перетинами представлення даних, середньоквадратичної похибки наведення інструменту $\delta_R=2,27$.

10. Запропоновано використовувати інтелектуальну систему на базі нейронної мережі для планування хірургічного втручання на м'язовому комплексі окорухового апарату, шлунково-кишкового тракту, гемангіоми. Створено базу даних пацієнта.

10. Запропоновано використовувати інтелектуальну систему на базі нейронної мережі для планування хірургічного втручання на м'язовому комплексі окорухового апарату, шлунково-кишкового тракту, гемангіоми. Створено базу даних пацієнта.

11. Проведено оцінку конкурентоспроможності розробленої інтелектуальної системи, розрахунок загальної трудомісткості та техніко-економічного рівня розробки методу моделювання складних біологічних об'єктів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] . О.Г. Аврунін, Д.В. Кухаренко, В.О. Пятикоп, В.В. Семенец, М.Ю. Тимкович, В.О. Філатов. Комп'ютерне планування малоінвазивних втручань в офтальмології та нейрохірургії. Харків: ХНУРЕ, 2020 – 148с. (монографія)
- [2]. D. Kukhareno, Oleg G. Avrunin, Sergii O. Romanyukc, Aliya Kalizhanovad, Aynur Toygozhinova, Konrad Gromaszeke. Computer system for forecasting surgery on the eye muscles. Optical Fibers and Their Applications 2015, edited by Ryszard S. Romaniuk, Waldemar Wojcik, Proc. of SPIE Vol. 9816, 98161G · © 2015 SPIE CCC code: 0277-786X/15/\$18 · doi: 10.1117/12.2229033 (Scopus)
- [3]. Janis Peksa, Dmytro Kukhareno, Andrii Perekrst, Dmytro Mamchur. Image Sensor-Driven 3D Modeling of Complex Biological Surfaces for Preoperative Planning of Hemangioma Treatment. Information Technology Faculty, Turība University, Graudu Street 68, LV-1058 Riga, Latvia. Sensors 2025, 25(18), 5781; <https://doi.org/10.3390/s25185781>

Розробка компонентів системи моделювання технологічного процесу виготовлення радіоприладів

Максимова Світлана¹, Ліщевич Артем²

1. Кафедра КІТАР, Харківський Національний Університет Радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, проспект Науки 14., e-mail: svitlana.milyutina@pure.ua

2. Кафедра КІТАР, Харківський Національний Університет Радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, проспект Науки 14., e-mail: artem.lishchevych@pure.ua

Анотація: У роботі розглянуто питання створення компонентів системи імітаційного моделювання технологічного процесу виготовлення радіоприладів. Виділено основні характеристики виробничих маршрутів у приладобудуванні, проаналізовано їхню стохастичну природу та обмеження. Запропоновано формальну постановку задачі оптимізації із застосуванням багатокритеріального підходу. Обґрунтовано використання мови GPSS для реалізації моделей та розроблено архітектуру програмних компонентів. Наведено приклади організації маршрутів і засобів збору статистики.

Ключові слова: приладобудування, технологічний процес, радіоприлади, GPSS, імітаційне моделювання, оптимізація виробництва.

I. ВСТУП

Приладобудування в Україні охоплює широкий спектр напрямів — від виробництва контрольно-вимірювальної техніки до складних електронних систем. Особливе місце посідає галузь радіоприладобудування, адже саме вона формує базу для телекомунікаційних технологій, систем управління, медичних пристроїв та військово-промислового комплексу [1].

Процес виготовлення радіоприладів характеризується рядом специфічних особливостей:

- високі вимоги до точності (похибки навіть у частки відсотка можуть зробити виріб непридатним);
- багатоступеневість технологічних маршрутів (механічна обробка, монтаж, паяння, випробування, калібрування);
- наявність стохастичних факторів (варіативність тривалості операцій, збої обладнання, помилки персоналу);
- ресурсні обмеження (кількість обладнання, енергоспоживання, матеріали).

Традиційні методи планування часто виявляються недостатніми через складність та динамічність таких систем. Тому актуальною є розробка систем імітаційного моделювання, які дозволяють досліджувати технологічні процеси безпосередньо на етапі їхнього проектування чи модернізації.

Метою роботи є розробка програмних компонентів для моделювання технологічних процесів виготовлення радіоприладів із використанням GPSS.

II. ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА РАДІОПРИЛАДІВ

Процеси приладобудування, зокрема у сфері виготовлення радіоприладів, мають низку властивостей, що роблять їх складними об'єктами для оптимізації:

1. Багаторівневність.

Виробничий процес охоплює кілька рівнів:

– операційний рівень (свердління отворів у платах, паяння, монтаж);

– технологічний рівень (комплексування операцій у маршрути);

– виробничий рівень (взаємодія цехів, ділянок, автоматизованих ліній).

Кожен рівень має власні критерії ефективності, але водночас вони взаємопов'язані.

2. Стохастичність параметрів:

– час виконання операцій залежить від випадкових факторів;

– обладнання може виходити з ладу з певною імовірністю;

– якість виробів визначається багатьма факторами, включаючи людський чинник.

Це вимагає використання методів статистичного моделювання.

3. Наявність ресурсних обмежень.

Виробництво характеризується обмеженням парком обладнання, персоналом, матеріалами. При цьому задачі завантаження ресурсів мають конфліктний характер: мінімізація часу може призвести до зростання витрат.

4. Критерії ефективності.

До основних критеріїв належать:

- собівартість продукції;
- продуктивність виробничої лінії;
- якість готових виробів;
- надійність та відмовостійкість процесів.

Таким чином, для дослідження приладобудівних процесів доцільним є використання імітаційного моделювання, яке дозволяє врахувати випадковість, багаторівневність і конфліктність критеріїв. GPSS у цьому випадку виступає як зручна мова опису подієвих систем [2].

III. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Імітаційне моделювання належить до класу методів, що дозволяють відтворювати роботу складних систем у динаміці та досліджувати їх поведінку в умовах впливу випадкових факторів. На відміну від детермінованих методів, які спираються на сувору математичну формалізацію, імітаційні моделі відображають функціонування об'єкта через його події, ресурси та логіку взаємодій. Це робить їх особливо зручними для аналізу виробничих процесів у приладобудуванні, де кожна операція характеризується власною тривалістю, споживанням ресурсів і ймовірністю відмов.

У контексті виготовлення радіоприладів такий підхід є доцільним, оскільки виробництво має стохастичну природу: час виконання окремих операцій може змінюватися залежно від навантаження обладнання,

якість продукції залежить від дотримання технологічних режимів, а виникнення черг та простоїв безпосередньо впливає на ефективність. Імітаційна модель дозволяє відобразити всі ці процеси як дискретно-подієву систему, у якій події визначають моменти зміни стану — початок чи завершення операції, появу черги або вихід обладнання з ладу.

Застосування мови GPSS у такій сфері дає можливість формалізувати поведінку технологічних процесів у вигляді блокових структур. Кожен блок відповідає певній дії — виконанню операції, перевірці умови чи збору статистики. Деталі або вузли виробу у моделі розглядаються як транзакти, що рухаються від однієї операції до іншої, тоді як обладнання й робочі місця виступають ресурсами з обмеженою доступністю [3]. Завдяки цьому можна не лише описати виробничий процес, але й виявити його «вузькі місця», оцінити завантаженість окремих ділянок і спрогнозувати вплив змін у структурі виробництва на загальну ефективність.

IV. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Формально задача моделювання технологічного процесу виготовлення радіоприладів полягає у пошуку оптимального варіанта організації виробництва:

$$\min C(x), \min T(x), \max Q(x),$$

- де: – $C(x)$ — витрати на виготовлення,
– $T(x)$ — середній час виробництва,
– $Q(x)$ — якість кінцевої продукції.

При цьому накладаються обмеження на:

- кількість обладнання;
- тривалість операцій;
- послідовність технологічних етапів;
- допустимий рівень відмов і браку.

Задача ускладнюється стохастичним характером вхідних даних, що робить класичні детерміновані методи малоефективними. Саме тут найбільш придатне імітаційне моделювання [4].

V. РЕАЛІЗАЦІЯ В GPSS

Мова GPSS надає широкі можливості для опису дискретно-подієвих систем, у яких процеси подаються через послідовність подій та стан ресурсів. При моделюванні технологічного процесу виготовлення радіоприладів ключовим є представлення деталей у вигляді транзакцій, які послідовно проходять усі стадії виробництва. Логіка переходу транзакцій між операціями реалізується за допомогою блоків, кожен з яких відповідає певній функції, наприклад виконанню технологічної дії, перевірці умови, створенню затримки чи збору статистики. Таким чином, модель набуває форми блок-схеми, де взаємодія деталей і обладнання відтворює реальний виробничий маршрут.

Особливе значення у такій моделі мають ресурси, що відображають обладнання та робочі місця. Коли транзакт досягає відповідного блоку, він може або отримати доступ до ресурсу, або стати в чергу у разі його зайнятості. Це дозволяє досліджувати ефекти утворення черг, час простою обладнання та ступінь його завантаженості. Наприклад, у процесі паяння деталей система може показати, за яких умов відбувається накопичення надмірної кількості заготовок у черзі, що

безпосередньо вказує на потребу збільшення кількості паяльних станцій чи зміну графіку їх роботи.

Важливою складовою GPSS є вбудовані засоби збору статистики. Під час моделювання автоматично фіксуються показники середньої тривалості операцій, часу очікування, довжини черг та рівня завантаження ресурсів. Ці дані дозволяють здійснювати кількісну оцінку ефективності виробничого процесу та виявляти його «вузькі місця». На основі отриманих результатів можна варіювати параметри моделі, змінюючи кількість обладнання, порядок виконання операцій чи правила пріоритетності, і перевіряти вплив таких змін на загальну продуктивність системи.

VI. ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Використання системи моделювання дозволяє:

- знизити витрати шляхом оптимізації використання обладнання;
- підвищити якість завдяки прогнозуванню відмов та контролю технологічних параметрів;
- зменшити час проектування нових маршрутів;
- провести віртуальні експерименти без зупинки реального виробництва.

Особливу цінність має можливість інтеграції моделей у системи CAD/CAM/CAE, що створює основу для цифрового виробництва («Industry 4.0»).

VII. ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід до створення компонентів системи моделювання технологічного процесу виготовлення радіоприладів із використанням GPSS. Система дозволяє враховувати стохастичність параметрів, аналізувати продуктивність і визначати оптимальні режими роботи. Отримані результати можуть бути використані у навчальних цілях, для підготовки інженерів приладобудівних спеціальностей, а також у практиці підприємств для оптимізації виробництва.

Подальші дослідження передбачають розширення бібліотеки блоків, урахування енергоспоживання та інтеграцію з інформаційними системами управління виробництвом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ілюшина С. В. Методи оптимізації технологічних процесів. *Вісник Казанського технологічного університету*. 2014. Т. 17, №8. С. 323–327.
2. Невлюдов І. Ш., Бортнікова В. О. Структурно-параметрична модель технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометра. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2017. №1(30). С. 6–16.
3. Безкоровайний В. В., Шевченко О. Ю. Модель системної оптимізації технологічних об'єктів. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.* Івано-Франківськ, 2018. С. 327–330.
4. Безкоровайний В. В., Березовський Г. В. Оцінювання властивостей технологічних систем на основі нечітких множин. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2017. №1(1). С. 14–20.

Інтелектуальна система підтримки проектування модульних конфігурацій БПЛА з валідацією сумісності та аналізом характеристик

Наталія Фурманова¹, Олег Савченко¹, Сергій Малий¹

1. Кафедра інформаційних технологій електронних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», УКРАЇНА, Запоріжжя, вул. Університетська, 64, email: nfurmanova@gmail.com

Анотація: В роботі представлено інтелектуальну систему підтримки проектування модульних конфігурацій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що поєднує візуальне компонування, автоматизовану логічну валідацію сумісності компонентів та прогнозне моделювання ключових характеристик. Система реалізована за трирівневою архітектурою, яка включає графічний інтерфейс користувача, ядро валідації та базу даних електронних модулів у форматі JSON. Запропонований підхід дозволяє виявляти помилки інтеграції ще на концептуальному етапі, а також розраховувати сумарну потужність, струм і вагу конфігурації. Додатково розглянуто можливість інтеграції ШІ-помічника на базі сучасних великих мовних моделей, зокрема Mistral-7B, для семантичного аналізу конфігурацій та надання рекомендацій проектувальнику. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні алгоритмічної перевірки з інтелектуальною підтримкою користувача, що підвищує надійність, зменшує ризики несумісності та скорочує час розробки.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; модульне проектування; електронні конфігурації; валідація сумісності; моделювання характеристик; системи підтримки проектування.

I. ВСТУП

Стрімке зростання інтересу до безпілотних літальних апаратів (БПЛА) призвело до трансформації цієї сфери від вузькоспеціалізованої до масової, з особливим акцентом на кастомізацію та спеціалізацію конфігурацій. Сучасні БПЛА є складними мехатронними системами, де апаратна частина складається з десятків взаємопов'язаних електронних модулів: польотних контролерів (ПК), регуляторів швидкості (ESC), силових установок, телеметричних та відеосистем.

Головною проблемою у проектуванні таких систем є висока ймовірність помилок інтеграції на етапі вибору компонентів та їх з'єднання [1]. Навіть незначна несумісність за напругою, протоколами зв'язку (наприклад, DSHOT, PWM, MAVLink, CAN), або типом конекторів, призводить до відмови всієї системи, пошкодження дороговартісних модулів або, що найкритичніше, до втрати апарату під час польоту. Традиційні CAD-інструменти, призначені для розробки друкованих плат, не забезпечують логічної валідації міжсистемної сумісності на рівні компонентів, залишаючи цей процес на відкуп інженеру.

Таким чином, виникає гостра необхідність автоматизації та інтелектуалізації етапу попереднього (концептуального) проектування БПЛА [2, 3], що дозволить мінімізувати помилки, скоротити час розробки та підвищити надійність кінцевого продукту.

Метою даної роботи є розробка та реалізація інтелектуальної системи, здатної:

- забезпечити візуальне, модульне компонування електронної схеми БПЛА;
- автоматично проводити логічну валідацію сумісності обраних компонентів;
- надавати інтелектуальну підтримку проектувальнику на основі аналізу великих мовних моделей (LLM) для виявлення прихованих ризиків та оптимізації характеристик.

II. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ТА МОДУЛЬНИЙ ПІДХІД

Проектування БПЛА, як правило, починається з вибору рами та силової установки, а потім переходить до вибору електроніки [4, 5]. Існуючі інструменти обмежуються або довідниками компонентів (без перевірки сумісності), або програмним забезпеченням для розробки PCB (наприклад, Altium, KiCad), яке не призначене для перевірки логічного зв'язку між готовими модулями, а фокусується на трасуванні доріжок.

Запропонована авторами система заповнює цю прогалину, забезпечуючи архітектурне моделювання на рівні готових модулів.

Система реалізована за трирівневою архітектурою:

1. Інтерфейс користувача (CAD GUI) розроблений на базі Python/Tkinter, забезпечує візуальне перетягування модулів, їхнє з'єднання та відображення статусу валідації.

2. Ядро валідації – основний алгоритмічний блок, відповідальний за обробку конфігурації (JSON-схеми), виконання логічних правил сумісності та розрахунок інтегрованих характеристик.

3. База даних компонентів – централізоване сховище всіх підтримуваних модулів та їхніх технічних паспортів.

Модульність проекту забезпечується за рахунок використання уніфікованого формату опису конфігурації (JSON-схема), що дозволяє легко додавати нові компоненти без модифікації ядра валідації.

Кожен компонент у базі даних описується за допомогою набору обов'язкових атрибутів, які є критичними для перевірки сумісності (табл. 1).

Таблиця 1. Структура бази даних компонентів

Атрибут	Приклад значення	Призначення
id	1	Унікальний ідентифікатор компонента
name	Flight Controller	Назва компонента
model	F4 Omnibus	Модель/серія компонента
processor	STM32F405	Тип процесора (для ПК/контролера)
firmware	Betaflight 4.3	Підтримуване або рекомендоване ПЗ/прошивка
ports	{'UART1': 'full', 'PDB': 'power'}	Опис доступних фізичних та логічних портів
voltage_range	[7.4, 25.2]	Мінімальна/максимальна напруга живлення (В)
current_rating	50	Максимальний постійний струм (А)
dimensions	36×36 мм	Габаритні розміри компонента
weight	15	Вага компонента (г)

Схема проєкту зберігається як ієрархічний JSON-об'єкт. Він містить масиви components (з унікальними ID та посиланнями на DB) і connections (описують зв'язок: source_id, target_id, connection_type). Для підвищення безпеки та захисту від копіювання в інші застосунки ця структура зберігається не у відкритому вигляді, а у зашифрованому форматі .krbt, який є внутрішнім стандартом системи.

III. МЕХАНІЗМИ ВАЛІДАЦІЇ СУМІСНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

А. Алгоритм логічної валідації

Ядро валідації працює за принципом реляційної перевірки умов між з'єднаними модулями. Коли користувач створює зв'язок між компонентом А і компонентом Б (наприклад, силове з'єднання між Акумулятором та ESC), запускається перевірка набору правил:

1. Перевірка напруги: напруга на виході джерела живлення (Voltage Out) повинна повністю або частково перекивати діапазон допустимої напруги на вході споживача (Voltage In).

$$\forall V_{in} \in A.V_{range}, \exists V_{out} \in B.V_{range}: V_{in} = V_{out} \quad (1)$$

2. Перевірка протоколів: якщо з'єднання є сигнальним або даних (UART, SPI, I2C), обидва компоненти повинні підтримувати хоча б один спільний протокол.

$$Protocols(A) \cap Protocols(B) \neq \emptyset \quad (2)$$

3. Перевірка коректності з'єднань: перевірка, чи відповідає тип з'єднання (наприклад, power, signal) логічному призначенню портів на обох модулях.

У разі виявлення несумісності система генерує попередження із зазначенням конкретного порушення (наприклад, "Напруга акумулятора 6S (25,2 В) перевищує максимальну вхідну напругу ПК (20 В)").

Б. Моделювання характеристик

Окрім бінарної (так/ні) валідації, система виконує прогнозне моделювання ключових експлуатаційних характеристик, що відноситься до функціоналу CAE:

1. Аналіз потужності та струму: Розрахунок мінімального та максимального загального струму споживання конфігурацією на основі специфікацій моторів та іншого обладнання. Кінцевий струм споживання (Total Current IT) порівнюється з номінальним струмом ESC (IESC) та акумулятора (IBATT):

$$IT = i = 1 \sum N I_{motor, max, i} + I_{aux} \quad (3)$$

Якщо $IT > IESC \cdot 0.8$, система попереджає про ризик перегріву та збоїв.

2. Розрахунок загальної ваги: сумарна вага всіх компонентів, що є критично важливим для прогнозування льотних характеристик.

3. Візуалізація "вузьких місць": наприклад, система може виділити з'єднання, яке працює поблизу межі своєї потужності (наприклад, VTX живиться від 9В BEC, який має 90% завантаження).

IV. ІНТЕГРАЦІЯ ШІ-ПОМІЧНИКА

Одним із напрямів удосконалення системи є інтеграція інтелектуального помічника, побудованого на базі сучасних мовних моделей, зокрема Mistral-7B-Instruct. Використання таких технологій дозволяє підняти процес валідації й оптимізації конфігурацій БПЛА на новий рівень [6].

Mistral-7B може аналізувати структуровані дані проєкту у форматі JSON, виявляти приховані ризики та надавати користувачу рекомендації. Зокрема, йдеться про:

- виявлення невідповідностей у характеристиках живлення або протоколах зв'язку;
- оцінку доцільності вибору компонентів з урахуванням ваги та вартості;
- формування пояснень і навчальних підказок, що робить систему корисною для початківців.

Таким чином, інтеграція Mistral у систему проєктування БПЛА не лише доповнює функції алгоритмічної перевірки, а й забезпечує інтелектуальний рівень підтримки користувача, роблячи інструмент більш універсальним.

V. ПРИКЛАДНЕ ЗНАЧЕННЯ ТА ПОТЕНЦІЙНІ СФЕРИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ

Розроблена система має значний практичний потенціал як у навчанні, так і в інженерній діяльності. У навчальному процесі вона може використовуватися як інтерактивний інструмент для формування у студентів розуміння принципів побудови електронних

конфігурацій безпілотних літальних апаратів. Завдяки інтеграції ШІ-помічника на базі Mistral-7B користувачі отримують не лише перевірку сумісності обраних компонентів, а й пояснення виявлених помилок та рекомендації щодо їх усунення, що робить процес засвоєння матеріалу більш наочним і доступним. Для інженерів-практиків система виступає засобом прискореної перевірки створених конфігурацій перед фізичним складанням апарата, дозволяє мінімізувати кількість технічних помилок та скоротити час на тестування. У дослідницьких і лабораторних умовах програмний комплекс може виконувати роль інструменту попереднього аналізу схем, сприяти відпрацюванню різних сценаріїв конфігурацій та підвищувати ефективність експериментів. Таким чином, практичне значення системи полягає в об'єднанні освітніх, прикладних і дослідницьких завдань у єдиному середовищі, яке забезпечує ефективний перехід від теоретичних знань до практичного застосування.

VI. ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи було сформовано наукові результати, які стосуються як теоретичного, так і прикладного аспектів проектування безпілотних літальних апаратів. Створено формалізовану модель даних для опису електронних компонентів, яка дозволяє уніфікувати їхні технічні характеристики та забезпечує можливість автоматизованої перевірки сумісності. Реалізоване ядро логічної валідації доводить ефективність використання реляційних правил для аналізу параметрів модулів і демонструє потенціал мінімізації інтеграційних помилок ще на етапі концептуального проектування. Наукова новизна полягає також у поєднанні алгоритмічних перевірок із можливістю семантичного аналізу конфігурацій за допомогою локально інтегрованого ШІ-помічника на базі Mistral-7B, який здатний інтерпретувати опис системи та виявляти ризики, що виходять за межі формальних правил. Це свідчить про перспективність використання сучасних мовних моделей як інструменту підтримки інженера в процесі проектування.

Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід дозволяє зменшити час розробки, підвищити надійність конфігурацій та розширити доступність інструментів проектування для користувачів із різним рівнем підготовки. Подальші дослідження у цьому напрямі можуть бути зосереджені на розвитку функцій системи, зокрема на інтеграції

тривимірного моделювання для перевірки фізичної сумісності компонентів, створенні модулів прогнозування льотних характеристик, а також розширенні бази даних і вдосконаленні алгоритмів інтелектуального аналізу. У перспективі це сприятиме формуванню комплексного середовища підтримки інженера, де поєднуються методи автоматизованого проєктування, інтелектуальні підказки та практичні інструменти оптимізації у сфері безпілотних технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Malyi, O. Y., Pospeieva, I. Y., Furmanova, N. I., Onyshchenko, V. F., Zaluzhnyi, M. Y., & Ivanov, V. V. (2024). Методика передпроектного вибору компонентів FPV квадрокоптерного типу за заданими значеннями тяги, швидкості та часу польоту. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (1), 35-49.
- [2] Hossain, N. U. I., Lutfi, M., Ahmed, I., Akundi, A., & Cobb, D. (2022). Modeling and Analysis of Unmanned Aerial Vehicle System Leveraging Systems Modeling Language (SysML). *Systems*, 10(6), 264. <https://doi.org/10.3390/systems10060264>
- [3] Gromada, K. A. (2021). Designing a Reliable UAV Architecture Operating in a Real Environment. *Applied Sciences*, 12(1), 294. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/294>
- [4] Thurlbeck, A. P., & Cao, Y. (2019, June). Analysis and modeling of UAV power system architectures. In *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 1-8). IEEE.
- [5] Michel, N., Wei, P., Kong, Z., Sinha, A. K., & Lin, X. (2022). Modeling and validation of electric multirotor unmanned aerial vehicle system energy dynamics. *ETransportation*, 12, 100173.
- [6] Samplawski, C., Cobb, A. D., & Jha, S. (2025). AGENT: An Aerial Vehicle Generation and Design Tool Using Large Language Models. *arXiv preprint arXiv:2504.08981*.

Наукове видання

**Ігор НЕВЛЮДОВ,
Владислав ЄВСЄЄВ,**

**IX Міжнародна Конференція
«Виробництво & Мехатронні Системи»**
(укр., англ., пол.. мовою)

Відповідальний редактор – Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР)
61166, Харків, проспект Науки, 14
корпус "А"
ауд. 162-1
тел .: +38 (057) 702-14-86
e-mail:m_ms@nure.ua

Підписано до друку 10.10.2025
Формат А4 (210x297мм). Папір 80г/м² .
[електронний друк]