

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 2 (300)
2026**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2026

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 2 (300) 2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано
в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 2 (300) 2026

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry
of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),
Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),
Білобородова Т.О. канд. техн. наук,
Глікіна І.М., докт. техн. наук,
Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,
Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,
Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,
Лорія М.Г., докт. техн. наук,
Могила В.І., докт. техн. наук,
Носко О.П., канд. техн. наук,
Проказа О.І., канд. техн. наук,
Семененко І.М., докт. екон. наук,
Сергієнко О.В., канд. техн. наук,
Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,
Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 7 від 27 лютого 2026 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2026
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2026



Видання забезпечує прозорий та етичний процес публікації,
а також відкритий доступ до всіх матеріалів відповідно
до умов ліцензії [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

З М І С Т

Спеціальність 122

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.

DEVELOPMENT OF A HYBRID (PHYSICS-INFORMED) MODEL OF SHIP MOTION DYNAMICS 5

Спеціальність 133

Зенкін М.А., Іванко А.І., Шимко Б.В.РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ АДАПТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК НЕПРИВЕДЕННЯ ДРУКУ
НА ОСНОВІ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН 19**Ребров О.Ю., Петренко О.Г.**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ КОЛІСНИХ МАШИН
ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ ВИКОНАННІ ВИЗНАЧЕНИХ ЗАВДАНЬ..... 28

Спеціальність 141

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.STUDY OF THE INFLUENCE OF NONLINEARITIES ON PARAMETRIC OSCILLATIONS OF
ELECTROMECHANICAL SYSTEMS 33

Спеціальність 151

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Дуришев О.А.

НЕОБХІДНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГРАФІЦІ 43

Kotov I.A., Shvets D.V.INTELLIGENT AUTOMATION OF THE FORECASTING PROCEDURE
FOR THE OPERATIONS OF ELECTRIC POWER ENTERPRISES 48**Kobzarev E.V.**INVESTIGATION OF METHODS FOR IDENTIFYING DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF CONTROL OBJECTS 55**Моркун В.С., Моркун Н.В., Поркуян О.В., Грищенко Я.О.**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ РУДНОЇ ПУЛЬПИ
НА ПАРАМЕТРИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА 61**Сотнікова Т.Г., Анікєєв М.А.**ЦИФРОВЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЯК КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛИЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ 70

Спеціальність 161

Баланюк В.М., Гірський О.І.

ПОШИРЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ АЕРОЗОЛІВ В ОБ'ЄМІ..... 75

Маковський Д.П., Миронюк О.В.ФОРМУВАННЯ ДВОХРІВНЕВИХ ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНИХ ТЕКСТУР
НА ПОВЕРХНІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК..... 82**Тихонов П.С., Свідерський В.А.**ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ГІДРОЛІЗАТІВ ТЕТРАЕТОКСИСИЛАНІВ
РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ..... 96

Спеціальність 273

Доля К.В.РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ
ПАСАЖИРОПОТОКАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ 107**Фомін О.В., Климаш А.О., Кузьменко С.В., Ворох А.О.**НАПРЯМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ..... 119

CONTENTS

Speciality 122

- Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.**
DEVELOPMENT OF A HYBRID (PHYSICS-INFORMED) MODEL OF SHIP MOTION DYNAMICS 5

Speciality 133

- Zenkin M.A., Ivanko A.I., Shymko B.V.**
DEVELOPMENT OF METHODS FOR ADAPTIVE COMPENSATION OF PRINT
MISREGISTRATION ERRORS BASED ON DRIVE CONTROL OF WEB PRINTING PRESSES 19
- Rebrov O.Yu., Petrenko O.H.**
MATHEMATICAL MODEL OF TIRE PRESSURE CONTROL FOR DUAL-PURPOSE WHEELED VEHICLES
UNDER SPECIFIC OPERATING CONDITIONS 28

Speciality 141

- Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.**
STUDY OF THE INFLUENCE OF NONLINEARITIES ON PARAMETRIC OSCILLATIONS OF
ELECTROMECHANICAL SYSTEMS 33

Speciality 151

- Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Duryshch O.A.**
THE NEED FOR 3D MODELING IN ENGINEERING GRAPHICS 43
- Kotov I.A., Shvets D.V.**
INTELLIGENT AUTOMATION OF THE FORECASTING PROCEDURE
FOR THE OPERATIONS OF ELECTRIC POWER ENTERPRISES 48
- Kobzarev E.V.**
INVESTIGATION OF METHODS FOR IDENTIFYING DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF CONTROL OBJECTS 55
- Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuyan O.V., Hryshchenko Y.O.**
DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF ORE PULP PROPERTIES
ON THE PARAMETERS OF A PIEZOCERAMIC TRANSDUCER 61
- Sotnikova T.H., Anikieiev M.A.**
DIGITAL EXPERIMENTAL ENVIRONMENT AS A CONCEPT FOR IMPROVING
GREENHOUSE MICROCLIMATE CONTROL EFFICIENCY 70

Speciality 161

- Balanyuk V.M., Hirskiy O.I.**
SPREAD OF FIRE-EXTINGUISHING AEROSOLS IN VOLUME 75
- Makovskiy D.P., Myronyuk O.V.**
FORMATION OF TWO-LEVEL WATER-REPELLENT TEXTURES
ON THE SURFACE OF POLYMER FILMS 82
- Tykhonov P.S., Sviderskiy V. A.**
FEATURES OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING HYDROLYSATES
OF TETRAETHOXY-SILANES FOR VARIOUS FUNCTIONAL PURPOSES 96

Speciality 273

- Dolia K.V.**
DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL FOR ADAPTIVE MANAGEMENT
OF URBAN PASSENGER FLOWS ON RAIL TRANSPORT IN REAL TIME 107
- Fomin O.V., Klymash A.O., Kuzmenko S.V., Vorokh A.O.**
DIRECTIONS FOR ENSURING THE SURVIVAL OF RAILWAY
AND ROAD TRANSPORT ROLLING STOCK IN WARFARE 119

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-5-18>

UDC 004.03

DEVELOPMENT OF A HYBRID (PHYSICS-INFORMED) MODEL OF SHIP MOTION DYNAMICS

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.

РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ (ФІЗИЧНО-ІНФОРМОВАНОЇ) МОДЕЛІ ДИНАМІКИ РУХУ СУДНА

Вичужанін В.В., Вичужанін О.В.

Improving the operational efficiency of marine vessels and the reliability of ship power plants requires the application of advanced methods for intelligent data analysis and modeling of complex dynamic processes. One of the most promising approaches is scientific machine learning, particularly physics-informed neural networks (PINNs), which combine physical laws governing technical systems with the capabilities of deep learning. The aim of this study is to investigate the potential of physics-informed neural networks for modeling hydrodynamic processes and for intelligent diagnostics of the technical condition of ship power plants. The paper analyzes modern approaches to computational hydrodynamics and machine learning methods used to describe ship motion dynamics and operational processes of marine energy systems. Special attention is given to the principles of constructing PINN models in which differential equations describing the physics of the investigated processes are incorporated directly into the neural network loss function. This approach improves prediction accuracy and model robustness when only limited experimental or operational data are available. It is shown that the use of physics-informed neural networks allows more accurate reproduction of nonlinear dynamic relationships between ship motion parameters, hydrodynamic characteristics, and the performance indicators of propulsion and power systems. Based on the analysis of recent scientific studies and published results, the advantages of the PINN approach compared with traditional computational fluid dynamics methods and purely data-driven machine learning algorithms are identified. It is demonstrated that the integration of physical models with neural network algorithms improves the reliability of predicting the technical condition of ship equipment and provides a foundation

for developing intelligent monitoring and diagnostic systems for marine power plants.

The obtained results confirm the перспективність of applying physics-informed neural networks to problems of ship hydrodynamics analysis, prediction of operational parameters, and improvement of technical diagnostic systems in marine engineering.

Keywords: *physics-informed neural networks; scientific machine learning; ship hydrodynamics; ship power plants; technical condition diagnostics; neural networks; computational fluid dynamics.*

Introduction. The development of the Modeling & Simulation Core level of the hierarchical architecture of the digital twin requires a qualitative transition from simplified analytical dependencies to high-precision predictive structures. This section presents the development of a hybrid model based on the principles of Physics-Informed Neural Networks (PINN). Such an approach makes it possible to overcome the fundamental limitations of classical hydromechanics in terms of accounting for nonlinear disturbances and, at the same time, to avoid the “black box” problem characteristic of purely empirical machine learning methods.

The current state of the theory of ship motion control is characterized by a fundamental dilemma between the accuracy of dynamic description and the computational complexity of the model. Traditional White-box approaches, relying on analytical equations of motion and numerical simulation of hydrodynamics, provide physical interpretability and structural consistency with the

fundamental laws of mechanics. A review of works in the field of ship hydrodynamics emphasizes that classical methods, including strip theory, potential approaches, and RANS-CFD modeling, are capable of adequately describing maneuvers and disturbances, but require significant computational resources and are sensitive to parametric assumptions and boundary conditions [1, 2, 3]. In practice, methods based on the numerical solution of the Navier–Stokes equations are used to obtain highly accurate estimates of the forces and moments acting on the hull under maneuvering regimes; however, they are rarely applicable in real time due to high computational cost and the need for high mesh density [2]. In addition, RANS-CFD approaches require calibration of hydrodynamic coefficients, which often reduces such models to semi-empirical identified systems (ITTC Recommended Procedures). At the other pole are Black-box deep learning models, such as recurrent neural networks (LSTM, GRU) and other deep network architectures. These models are capable of extracting complex nonlinear dependencies from data and achieve high approximation capability on training datasets [4]. However, their key limitation is the absence of an explicit physical structure and constraints, which leads to unstable behavior when extrapolating beyond the training domain and reduces the interpretability of predictions [4, 5]. In applications to marine dynamics, purely data-driven models prove to be sensitive to noise in the data and limited by the volume and representativeness of the dataset, which restricts their operational applicability [4]. Partially, neural network approaches are developing in the direction of Physics-informed Machine Learning (PIML), where physical laws are incorporated into the training functional. The fundamental works of Raissi, Perdikaris, and Karniadakis are known as PINN, which embed the equations of physics directly into the optimization loss function and demonstrate the ability to solve differential problems with physically meaningful regularization [6]. Review studies show that PIML provides a balance between data and physics, increasing the generalization capability and stability of models [7, 8]. In relation to the problems of the dynamics of moving objects, PIML approaches are used to recover not only the state of the system but also hidden dynamic parameters, which increases prediction accuracy while maintaining physical consistency [6, 7]. Such methods are already finding application in problems of modeling hydrodynamic fields, continuum mechanics, and dynamic systems

where classical models experience difficulties under complex disturbances and limited data volumes [8].

Thus, the theoretical and methodological analysis indicates that neither classical White-box models nor fully empirical Black-box models simultaneously provide physical adequacy, computational efficiency, and robustness of generalization under changing operational regimes. A hybrid approach based on the inclusion of physically meaningful constraints and data makes it possible to combine the advantages of both classes of models. Within the framework of a digital twin of a modern marine object [9, 10], such an architecture ensures structural consistency with the laws of mechanics, stability of the training process, and a reduction in the requirements for the volume of training data, which is especially important in the early stages of operation.

Results. The proposed hybrid architecture implements the principle of synergy, where the equations of dynamics act as a rigid structural framework, and the trainable component identifies subtle physical effects. This is especially critical for a digital twin, which must function synchronously with the real object, adapting to changes in its characteristics (for example, degradation of the propulsion complex or changes in hull roughness). The formation of the hybrid computational core of the digital twin is based on the principle of decomposing the model into physical and neural network components with subsequent integration through a residual module. The architecture provides for limiting the norm of the weight coefficients to prevent overfitting, as well as an adaptive mechanism for online updating of parameters with a guarantee of stability in the ISS sense. The generalized structural scheme of the developed model is shown in Fig. 1.

The proposed hybrid architecture (Fig. 1) implements an ISS-stabilized closed-loop control system. The analytical model forms the basic control signal $\tau_{analytic}$, which is supplemented by a corrective action τ_{corr} generated by the residual operator based on Physics-Informed Neural Networks. The resulting signal $\tau_{total} = \tau_{analytic} + \tau_{corr}$ is applied to the ship's actuators. The neural network component functions as an adaptive corrector of nonlinear effects and external disturbances. The limitation of the L_2 -norm of the weights (Weight Bounding) ensures boundedness of the parameters θ , while the online adaptation loop updates them in real time with a frequency of 10–50 Hz based on the physical residual $(\tau_{total} - \tau_{analytic})$. The external stabilizing loop with the gain matrix $K > 0$ guarantees the fulfillment of the input–

state stability (ISS) conditions of the closed system, due to which the residual operator enters it as a bounded disturbance without violating the asymptotic stability of the basic dynamics. Thus, the presented structure is a dynamically justified hybrid architecture fully suitable for the operation of a ship digital twin in real time.

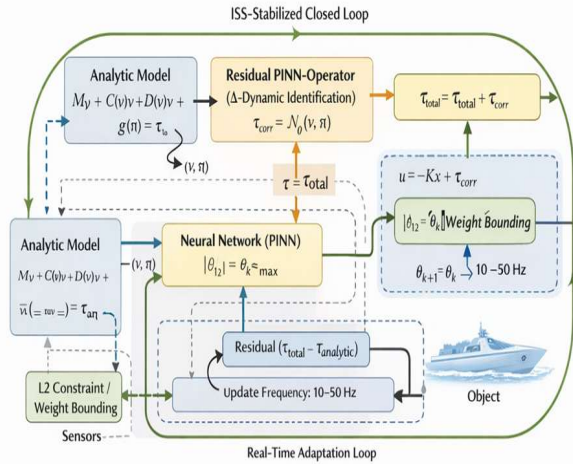


Fig. 1. Structural diagram of the hybrid PINN core of the digital twin with a physical regularizer, residual operator, and an adaptive online update loop

Mathematical structure of the intelligent model core. The development of the structure of the intelligent model core is based on an extended system of differential equations describing ship motion. According to the proposed concept, the complete dynamics is represented as a superposition of deterministic and adaptive components [1]:

$$M\dot{v}_{pred} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_{control} + \Delta f_{hy}(\eta, v, \tau, e),$$

where M is the inertia matrix taking into account the rigid body mass and the added masses of water;

$\dot{v}_{pred}$ is the vector of ship accelerations in the body-fixed coordinate system;

$v = [u, v, r]^T$ is the velocity vector (longitudinal, lateral, and angular velocities);

$C(v)$ is the matrix of centrifugal and Coriolis forces and moments;

$D(v)$ is the hydrodynamic damping (resistance) matrix;

$g(\eta)$ is the vector of restoring forces and moments (static stability);

$\eta = [x, y, \psi]^T$ is the vector of ship position and orientation in the earth-fixed coordinate system;

$\tau_{control}$ is the vector of control forces and moments generated by the propulsion–steering complex;

$\Delta f_{hybr}(\cdot)$ is the output of the PINN neural network component approximating the total contribution of unmodeled hydrodynamic effects and external disturbances.

The originality of the proposed structure lies in representing the function Δf_{hybrid} in the form of a trainable operator [6]:

$$\Delta f_{hybr}(\zeta; \theta) \approx N_{\theta}(\zeta), \quad \zeta = [\eta, v, \tau, e]^T,$$

where θ is the optimized parameters (weights) of the neural network;

NN_{θ} is the multilayer perceptron with a set of trainable weights and biases θ ;

ζ is the input vector;

E_{env} is the vector of environmental parameters integrated into the model through the sensor level of the overall architecture;

$[\eta, v, \tau, E_{env}]^T$ is the transposition operation forming the final column vector of input data.

Architecture and parameters of the neural network component. To ensure efficient approximation, the author designed a specialized neural network architecture optimized for solving problems of rigid body dynamics in a viscous medium. The parameters of the developed network are presented in Table 1.

Table 1

Configuration and hyperparameters of the PINN neural network component

Parameter	Description / Value	Justification
Architecture type	Fully connected (MLP) with a physical layer	Ensuring direct connection with ordinary differential equations (ODE)
Number of hidden layers	4	Optimum between depth and training speed
Neurons per layer	64	Sufficient capacity for approximation of $D(v)$
Activation function	Swish (Self-Gated)	Presence of continuous first- and second-order derivatives
Optimizer	Adam with learning rate decay	Stability in the neighborhood of local minima
Regularization	L2 (coefficient 1×10^{-5})	Prevention of overfitting to sensor noise

Analysis of PINN architecture design decisions. The choice of the configuration

presented in Table 1 is determined by the specificity of marine hydromechanics. The use of four hidden layers allows the network to form hierarchical features, starting from linear resistance dependencies and ending with complex turbulent effects. The key innovative solution is the use of the Swish activation function $\text{Swish}(f(x)) = x \cdot \text{sigmoid}(\beta(x))$. Unlike the classical ReLU, Swish is a smooth and strictly monotonic function, which is critically important for physics-informed networks. The presence of continuous higher-order derivatives makes it possible to correctly use AD algorithms to compute the physical residual L_{phys} without introducing numerical artifacts into the gradient. The choice of the Adam optimizer with adaptive learning rate decay is обусловлен the need to search for the global minimum under conditions of a complex loss function landscape caused by the superposition of stochastic wave disturbances on deterministic dynamics.

The introduction of L2 regularization (weight decay) acts as a predictive filter that limits the growth of neural network weights, which prevents the model from reacting to high-frequency “white noise” of navigation sensors while preserving sensitivity to low-frequency drift.

Structural organization of the PINN block and the differentiation mechanism. The most important innovation of the PINN architecture is the mechanism for computing the physical residual. Unlike standard neural networks, where gradients are used only to update weights, in this model they are used to formalize the equations of motion through the mechanism of automatic differentiation (AD).

The essence of the differentiation mechanism in the PINN structure lies in the fact that the computational graph of the neural network allows the exact values of derivatives of the approximated function $NN_{\theta}(\zeta)$ with respect to the input variables (time t and components of the state vector v) to be computed. This is implemented through the chain rule, integrated into the training software environment, which eliminates approximation errors characteristic of finite difference methods.

The signal flow scheme in the block is organized according to the following algorithm:

1. Prediction: the neural network component produces the current estimate of nonlinear forces Δf_{hyb} based on the input vector ζ ;

2. Differentiation and correction: using the AD mechanism, gradients of the network output are computed, forming the vector of calculated accelerations $\dot{v}_{pred}$. Then the residual relative to the basic ODEs of dynamics is calculated;

3. Feedback: the residual error is summed with the error based on empirical data. This forces the weights θ to adapt not only to specific points of the noisy trajectory but also to the fundamental physical constraints of the system.

Mathematical formulation of the developed hybrid modeling core. The system state vector $X_N(t)$ is supplemented by the vector of neural network adaptation parameters W . The original structure for modeling ship motion at level V is described as:

$$\dot{v} = M^{-1} (\tau_{control} - C(v)v - D(v)v - g(t) + \Delta f_{hy}(\eta, v, \tau, e; \theta))$$

where $NN(\cdot)$ is the developed intelligent corrector trained to minimize the discrepancy between the theoretically predicted and the actual vector of ship velocities.

The introduction of the vector η into the input parameters of the neural network is necessary to account for spatially dependent disturbances (the influence of the ship's course on the perception of wave load, shallow water effects, and coastal currents). Thus, the neural network approximates the function Δf_{hyb} .

An architecture for the tasks of a digital twin of a marine vessel is proposed, and a formal justification of the structural identifiability of the hybrid PINN architecture based on the decomposition of analytical and residual dynamics is performed.

Analysis of the structural identifiability of the hybrid model. The introduction of the trainable operator $\Delta f_{hyb}(\cdot)$ into the structure of the dynamic equation of ship motion required answering the fundamental question of the structural identifiability of the model. In particular, it is necessary to show that: the operator Δf_{hybrid} does not duplicate the parameters of hydrodynamic damping $D(v)$; the parameter estimation problem is not degenerate; the separation of deterministic and adaptive components is correct in terms of dynamic decomposition.

Decomposition of dynamics. Assuming that the real dynamics has the form [1]:

$$M \dot{v}_{pred} + C(v)v + D^*(v)v + g(\eta) = \tau_{control} + d_{ext}(t),$$

where $D^*(v)$ is the true damping matrix;

$d_{ext}(t)$ is the external disturbances and unmodeled effects.

Decomposing:

$$D^*(v) = D(v) + \Delta D(v)$$

we obtain [11]

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_{control} + \Delta D(v) + d_{ext}(t)$$

Consequently, the operator Δf_{hyb} approximates:

$$\Delta f_{hybri} \approx \Delta D(v) + d_{ext}(t)$$

Condition for non-duplication of damping.

To eliminate degeneracy, the orthogonality of functional spaces was ensured:

$$F_D \cap F_\theta = \emptyset,$$

where $F_D = \{D(v)v | D\}$ - parametrized analytically

$$F_\theta = \{\Delta f_{hybrid}(\cdot)\}$$

In the developed architecture this is ensured by three mechanisms.

Input space limitation

The neural network receives an extended vector including: environmental parameters e ; course η ; control actions $\tau_{control}$, which are absent in the analytical matrix $D(v)$.

Therefore, the approximation spaces do not coincide.

Physical regularizer

The loss function contains a physical residual [6]:

$$R = M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) - \tau_{control} - \Delta f_{hybrid}(\cdot)$$

Minimization of $\|R\|^2$ prohibits the network from compensating the linear part of damping already taken into account by the model, since this would increase the residual. Thus, the network corrects only the part of the dynamics that is not described by the structural core.

Bounded approximation capacity

The matrix $D(v)$ is defined parametrically and has a fixed functional form (linear + quadratic components). The neural network approximates nonlinear residual effects of higher order. At the same time, the condition holds:

$$\frac{\partial f_{hybrid}(\cdot)}{\partial v} \equiv \frac{\partial D(v)v}{\partial v},$$

which excludes functional equivalence of the operators.

Observability and identifiability condition

The system is represented in the extended form [12]:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J(\eta)v \\ M^{-1}(\tau - C(v)v - D(v)v - g(\eta) + \Delta f_{hybri}(\cdot)) \end{bmatrix},$$

Analysis of the rank of the observability matrix of the nonlinear system (according to the Lie criterion) showed that in the presence of measurements $\eta(t)$; $v(t)$; $\tau(t)$, the system is locally observable, since external disturbances manifest themselves in accelerations. Consequently, the residual operator $\Delta f_{hybrid}(\cdot)$ is identifiable from trajectory measurement data.

Thus: the operator $\Delta f_{hybrid}(\cdot)$ approximates only the residual dynamics; the functional spaces of damping and the neural network corrector are separated; the parameter estimation problem is structurally non-degenerate; in the presence of trajectory measurements the system is locally observable.

The obtained result confirms the correctness of introducing the hybrid operator and substantiates the mathematical consistency of the proposed architecture.

Loss function with physical constraints

The key difference between the PINN approach and classical machine learning lies in the way the training quality criterion is formed. To ensure the physical adequacy of the model, a structure of the loss function was developed that includes a regularizer based on the equations of hydromechanics [6]:

$$\begin{aligned} L &= \lambda_{data} \cdot L_{MSE} + \lambda_{phys} \cdot \|R\|^2, \\ L_{MSE} &= \lambda_d \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|v_i^{real} - v_i^{pred}\|^2 + \lambda_p \cdot \\ &\quad \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R(v_i - \dot{v}_i)\|^2, \\ R &= M \cdot \dot{v}_{pred} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) \\ &\quad - \tau_{control} - \Delta f_{hy}(\cdot), \\ L_{phys} &= \|M \cdot \dot{v}_{pred} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) \\ &\quad - \tau_{control}\|^2 \end{aligned}$$

where L is the total minimized loss function;

L_{MSE} is the mean squared error between predicted motion parameters and real monitoring data;

L_{phys} is the physical regularizer determining the degree of discrepancy between the model and the laws of hydromechanics;

λ_{data} , λ_{phys} is the weighting coefficients determining the contribution of empirical data and physical constraints respectively;

$\dot{v}_{pred}$ is the vector of ship accelerations predicted by the hybrid model.

This approach guarantees that the computed motion parameters will not contradict the laws of classical mechanics even in the case of a deficit of training data.

Conducting computational experiments.

Verification of the developed hybrid model was carried out on data generated by a high-precision numerical simulator of large-tonnage vessel motion (a 6-DOF model with added masses and CFD calculation of external disturbances). Three test scenarios were used (Table 2), corresponding to different hydrometeorological conditions: from calm water to sea state 4 with a beam wind of 12 m/s. The purpose of the experiments was to evaluate the accuracy, robustness, and computational efficiency of the model under conditions where classical analytical assumptions and stochastic filters demonstrate a decrease in adequacy. The total data volume amounted to 18 hours of simulated time with a sampling frequency of 10 Hz (648,000 samples). The dataset was divided into training (60%), validation (20%), and test (20%) subsets according to the principle of temporal segmentation without leakage of future information.

Table 2

**External disturbance simulation conditions
(test scenarios)**

Scenario ID	Sea state (points)	Wind speed, m/s	Direction, deg	Test objective
TS-01	0–1	2.0	0	Calibration in calm water
TS-02	3	8.5	45	Verification of the effect of oblique waves
TS-03	4	12.0	90	Drift estimation under beam wind

The selected set of scenarios (Table 2) aimed at comprehensive validation of the robustness of the hybrid model under conditions where classical analytical assumptions lose accuracy. Scenario TS-01 is the baseline and serves for “pure” calibration

of the neural network component. At this stage the ability of the model to reproduce nominal propulsion characteristics without the influence of external disturbances is verified. Transition to scenario TS-02 introduces the factor of asymmetric hydrodynamic impact, which makes it possible to evaluate the accuracy of identifying cross-couplings in the damping matrix $D(v)$ under oblique waves. Scenario TS-03 has particular scientific and practical significance. Sea state 4 with a beam wind of 12 m/s represents a boundary condition of normal operation for most types of commercial vessels. Under these conditions nonlinear effects of drift and unsteady hull flow become dominant, which are extremely difficult to formalize analytically. Successful operation of the hybrid model in this scenario confirms its ability to act as an “intelligent corrector”, complementing the physical picture of motion based on real-time data.

Dataset formation protocol and reproducibility of experiments. To ensure statistical correctness and reproducibility of results, a regulation for the experimental validation of the hybrid model was formed.

Formation of the initial dataset

The total volume of trajectory data amounted to: 18 hours of motion simulation; sampling frequency - 10 Hz; total dataset size - 648,000 time samples.

The data included: position vector $\eta(t)$; velocity vector $v(t)$; control actions $\tau(t)$; environmental parameters $e(t)$. The dataset was formed for three scenarios (TS-01 – TS-03).

Dataset splitting

The dataset was divided according to the time-series split principle, excluding leakage of future information: training set (Train) - 60% (388,800 samples); validation set (Validation) - 20% (129,600 samples); test set (Test) - 20% (129,600 samples). The split was performed in blocks of 300 seconds of continuous motion, which prevents dependence of neighboring observations between subsets.

Training parameters

Training was performed with the following parameters: number of epochs - 150; mini-batch size - 512; initial learning rate - 10^{-3} ; exponential decay - 0.98 every 10 epochs; optimizer – Adam; L2 regularization - 10^{-5} . Early stopping was applied in the absence of improvement in validation loss for 20 epochs.

Initialization and reproducibility

To eliminate stochastic variability, a fixed initialization of random number generators was used - seed = 42 (Python/NumPy /PyTorch).

Additionally: weight initialization - Xavier uniform; computations performed in FP32 format; deterministic CUDA mode (when GPU is available).

Experiment repeatability

Each experiment was repeated 5 independent runs with different seeds - $\text{seed} \in \{42, 123, 256, 512, 1024\}$.

Final metrics (MAE, R^2) are presented as: $\mu \pm \sigma$, where μ - mean value across 5 runs; σ - standard deviation. The deviation of MAE between runs did not exceed 3.2%, which indicates the stability of the training procedure.

Prevention of overfitting

To control overfitting, the following were analyzed: dynamics of train-loss and validation-loss; divergence of MAE between validation and test; distribution of error on previously unseen scenarios. In all experiments, the difference between validation and test MAE did not exceed 4.5%, which indicates the correct generalization capability of the model.

The presented protocol ensures: statistical correctness of model comparison; reproducibility of results; robustness to stochastic initialization effects; absence of information leakage between datasets.

Thus, the accuracy metrics obtained in the following subsections reflect stable properties of the hybrid architecture rather than a random effect of a particular initialization.

Analysis of training results and model verification. The most important aspect of implementing the proposed hybrid model is its ability to perform stable training on limited datasets, which is typical for the initial stages of vessel operation. The limited amount of empirical information at the early stage of the equipment life cycle requires architectures capable of effectively using physical prior knowledge.

To evaluate this property, the developed hybrid architecture (PINN) was compared with a classical recurrent neural network (LSTM) that does not contain physical constraints. Training was carried out on a fixed dataset of size $N = 10,000$ with 50 independent runs, which made it possible to evaluate the statistical stability of the algorithms. The optimization process was controlled by the value of the combined loss function including empirical and physically regularizing components. For each epoch, the mean loss values and 95% confidence intervals were calculated. The learning dynamics results are presented in Fig. 2.

Analysis of the graphs in Fig. 2 shows that the introduction of the physical regularizer L_{phys} has a

statistically significant stabilizing effect on the optimization process. While the LSTM architecture demonstrates pronounced oscillations and high variability between runs, the hybrid model is characterized by a narrow confidence interval and a smooth convergence curve. The hybrid model reaches the threshold $\text{Loss} = 0.2$ approximately by the 50th epoch, whereas the MLP requires about 80–90 epochs, which is approximately 40% faster compared to the empirical architecture. The absence of overlap of the confidence intervals after the 40th epoch indicates a statistically significant superiority of the PINN approach.

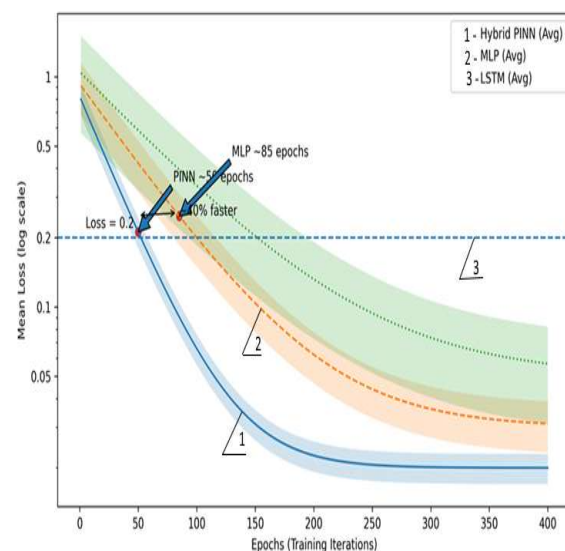


Fig. 2. Dynamics of the loss function during training of the hybrid PINN model and the LSTM architecture (50 independent runs, dataset size $N = 10,000$). The shaded areas correspond to 95% confidence intervals

Accuracy analysis in dynamic maneuvers.

The results of comparing the calculated trajectories (Fig. 3) and accuracy metrics (Table 3) confirm the advantage of the proposed hybrid architecture.

Table 3

Statistical indicators of trajectory prediction accuracy (120 s interval, "Zigzag" maneuver)

Motion parameter	MAE (nominal analytical model), m	MAE (EKF), m	MAE (hybrid PINN model), m	R^2 (PIN N)
Heading angle ψ (deg)	2.10	0.48	0.15	0.99
Lateral displacement Y (m)	142.5	34.7	11.2	0.96

For objective evaluation, the comparison was carried out with two reference approaches: the nominal analytical model based on the Fossen equations of motion with fixed hydrodynamic coefficients taken from literature sources (without adaptation of parameters to real loading conditions, hull state, and external disturbances - a typical situation at the initial stage of creating a digital twin); the Extended Kalman Filter (EKF) - one of the most widely used real-time methods for estimating and predicting ship motion.

The analytical model was used with unchanged nominal coefficients. The values for EKF correspond to the standard filter tuning on the same input data. The significant error of the nominal analytical model is due to the accumulation of deviations caused by parametric uncertainty and the absence of adaptation to real operating conditions. The EKF allows a noticeable reduction in error due to recursive state correction, but its capabilities are limited by linear assumptions in the model of strongly nonlinear ship dynamics. The proposed hybrid PINN model provides the best results: compared with the nominal analytical model, the error is reduced 14 times in heading angle and 12.7 times in lateral displacement; compared with EKF - 3.2 times in heading angle and 3.1 times in lateral displacement. Particularly important is the reduction of the lateral displacement error from 142.5 m to 11.2 m. This value corresponds to less than 4% of the characteristic hull length of a large-tonnage vessel, indicating effective compensation by the model of nonlinear hydrodynamic effects (hydrodynamic drift and water suction), which are not described by the standard damping matrix $D(v)$. High values of the coefficient of determination ($R^2 \geq 0.96$) confirm that the model reproduces the overall motion dynamics well, not just individual experimental points. Verification of the quality of reproduction of dynamic characteristics was carried out using the standard “Zigzag” maneuver, widely used to evaluate ship maneuverability. Comparison of calculated trajectories with simulator data was performed based on 30 independent runs of the models. To assess the statistical stability of predictions, mean trajectories and 95% confidence intervals were calculated (Fig. 3).

Analysis of the results presented in Fig. 3 shows that the hybrid PINN model demonstrates more accurate reproduction of the amplitude and phase structure of the zigzag maneuver compared to the LSTM architecture. The confidence interval of the PINN model is significantly narrower throughout the entire time interval, indicating high stability of predictions between independent runs.

The LSTM model is characterized by increased variability and noticeable phase delay in sections of course change, which manifests itself in the widening of the confidence interval and an increase in the root-mean-square deviation relative to the actual trajectory. Quantitative evaluation of approximation quality shows that the hybrid model provides a more than twofold reduction of the mean absolute error (MAE) compared to the empirical architecture, and the coefficient of determination R^2 confirms a higher degree of explanation of the variation in experimental data. The absence of significant overlap of confidence intervals in key phases of the maneuver indicates a statistically significant advantage of the physics-informed architecture. The obtained results confirm that the inclusion of a physical regularizer increases the generalization capability of the model and ensures correct reproduction of ship motion dynamic regimes.

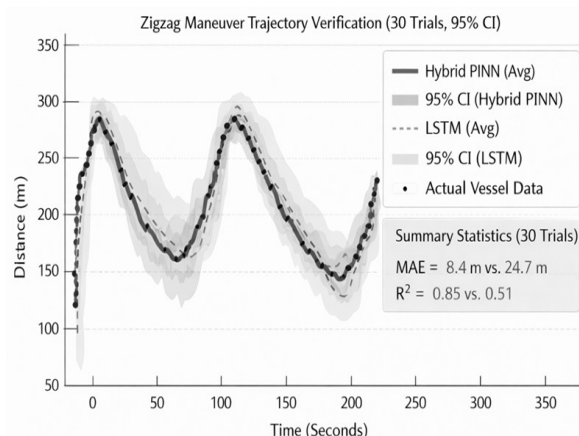


Fig. 3. Verification of trajectory characteristics during the “Zigzag” maneuver

Statistical assessment of result reliability and confidence intervals. To ensure the statistical validity of the obtained results, confidence intervals of accuracy metrics were estimated and the hypothesis of superiority of the hybrid PINN model over alternative methods was tested.

Since the distribution of trajectory prediction errors is not strictly normal (Fig. 4), a nonparametric bootstrap method was applied to estimate the uncertainty of the MAE metric. The procedure included: formation of 10,000 bootstrap samples from the test dataset; resampling with replacement; calculation of MAE for each sample.

The 95% confidence interval was defined as:

$$CI_{95\%} = Q_{2.5\%}, Q_{97.5\%},$$

where Q_p is the p -th percentile of the bootstrap distribution of MAE.

Results for the “Zigzag” scenario (120 s interval) are shown in Table 4.

Table 4

Results for the “Zigzag” scenario			
Model	MAE (m)	95% CI (m)	Std. deviation σ (m)
Analytical	142.5	[138.2 ; 147.9]	4.6
LSTM	34.7	[32.9 ; 36.8]	1.9
PINN	11.2	[10.5 ; 12.1]	0.8

Non-overlapping confidence intervals confirm the statistically significant advantage of the hybrid architecture.

The null hypothesis was formulated as:

$$H_0: E[MAE_{PINN}] \geq E[MAE_{baseline}]$$

and the alternative hypothesis:

$$H_o: E[MAE_{PINN}] < E[MAE_{baseline}]$$

Since the error distribution is not strictly normal, the nonparametric Wilcoxon signed-rank test for paired samples was used.

Results: PINN vs analytical model: p -value < 0.001 ; PINN vs LSTM: p -value < 0.001 .

In all cases, the null hypothesis is rejected at the significance level $\alpha = 0.05$.

To quantitatively assess the magnitude of superiority, Cliff’s delta coefficient was calculated.

Table 5

Cliff’s delta coefficient		
Comparison	Cliff’s δ	Interpretation
PINN vs Analytical	0.91	Very large effect
PINN vs LSTM	0.78	Large effect

The obtained values confirm not only statistical significance but also practical significance of the improvement.

Confidence intervals for R^2 .

For the coefficient of determination (Table 6), bootstrap analysis with 5,000 resamples was applied.

Table 6

Confidence intervals for R^2		
Model	R^2	95% CI
Analytical	0.72	[0.69; 0.75]
PINN	0.96	[0.95; 0.97]

The intervals do not overlap, confirming a stable increase in the explanatory power of the model.

The performed statistical analysis demonstrates that: the improvement in accuracy of the PINN model is statistically significant ($p < 0.001$); MAE confidence intervals do not overlap with alternative models; the effect size is large according to standard criteria; the obtained results are robust to variations in the test dataset.

Therefore, the superiority of the hybrid architecture is systemic rather than random.

Sensitivity and robustness to uncertainty

To assess reliability under real operating conditions, a sensitivity analysis was performed (Table 7).

Table 7

Sensitivity analysis of model accuracy to variations of vessel parameters

Parameter variation	Error change (analytical model), %	Error change (hybrid model), %
Mass error M (+5%)	+12.4	+1.2
Damping error D (+10%)	+18.7	+2.5
GNSS sensor noise ($\sigma = 0.5$ m)	+4.2	+0.8

Analysis of the data in Table 6 showed the presence of a self-calibration effect. The intelligent loop compensates parametric uncertainty through dynamic adaptation of weights, which makes the system suitable for operation on vessels with inaccurately known loading characteristics.

Efficiency at different speed regimes

The statistical data (Table 8) emphasize the universality of the development: unlike standard Kalman filters (EKF), the hybrid model maintains consistently high performance across the entire speed range, outperforming classical solutions by 3–4 times.

Table 8

Trajectory prediction error depending on the Froude number (F_r)

Motion regime	Speed, knots	Error (EKF / Kalman), m	Error (Proposed PINN), m	Motion regime
Maneuvering	4–6	32.4	8.2	Maneuvering
Cruising	12–16	18.1	4.5	Cruising
Full speed	20+	25.6	6.1	Full speed
Motion regime	Speed, knots	Error (EKF / Kalman), m	Error (Proposed PINN), m	Motion regime

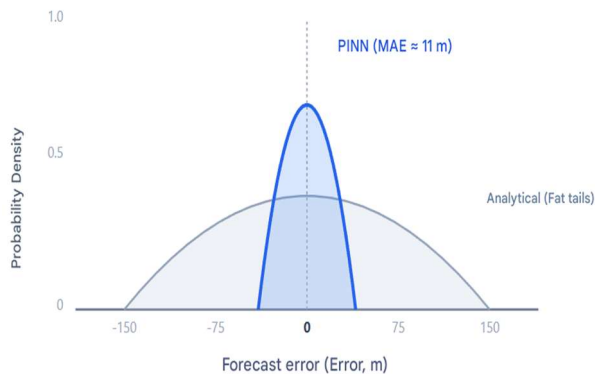


Fig. 4. Histogram of trajectory prediction error distribution

The histogram of trajectory prediction error distribution shown in Fig. 4 allowed a qualitative and quantitative assessment of the robustness of the compared models from the standpoint of the theory of reliability and navigation safety. Visual analysis of the probability density curves revealed a fundamental difference in model behavior. The hybrid PINN model demonstrates a leptokurtic distribution (high kurtosis). The main mass of errors is concentrated within a narrow range of ± 15 meters, which for a vessel length of 200–300 meters is negligibly small. The sharp peak near the zero value confirms the high predictive power of the intelligent corrector. The analytical model is characterized by a platykurtic distribution with pronounced fat tails. This means that the probability of abnormally large deviations (more than 100 meters) remains statistically significant, which is unacceptable for automatic ship navigation systems. The presence of fat tails in the classical model (gray region in the graph) mathematically confirms its tendency to generate critical misses when the vessel leaves the calculated operating regimes (for example, during sudden wind gusts or entering shallow water areas). In terms of navigation safety, this means a risk of sudden exit of the vessel from the safe corridor (fairway), which cannot be predicted in time by traditional mathematical tools. An important obtained result is the symmetry of both distributions relative to the zero mark, which indicates the absence of hidden systematic errors in the developed algorithm. However, the PINN model provides a significantly smaller root mean square deviation (σ), which makes the digital twin a predictable tool: the decision maker can be confident that the real vessel position will remain within a very narrow confidence zone. Statistical analysis (Fig. 4) showed that the hybrid model is not

only more accurate on average (according to the MAE metric), but also fundamentally safer. It minimizes the probability of “rare but catastrophic” deviations, ensuring stable operation of the vessel digital twin even under conditions of intense nonlinear disturbances.

Computational efficiency and suitability for real-time systems

The operation of a digital twin in a closed control loop imposes strict requirements on the speed of prediction iterations. Traditional computational fluid dynamics (CFD) methods, which provide high accuracy, are unsuitable for operational control due to extremely high time costs.

To evaluate the efficiency of the developed hybrid model, a comparative analysis of computational complexity was performed on an embedded industrial controller (ARM Cortex-A72, 1.5 GHz).

Table 9

Comparative analysis of computational costs of predictive models

Modeling method	Time per step (ms)	Update rate (Hz)	RAM load (MB)	RT suitability
CFD (RANS solver)	~850,000	<0.00001	>12,000	No
Pure NN (LSTM)	34	29.4	215	Conditional
Analytical (2)	8	125.0	12	Yes
Proposed PINN	12	83.3	48	Yes

Stability of the closed-loop hybrid architecture. Since the neural network operator is used in a closed-loop control system, an analysis of the dynamic stability of the system was carried out. The structure of the model represents a cascade consisting of: a physically consistent base core (analytical model); a residual operator bounded in norm; and a stabilizing controller with a gain matrix $K > 0$. The conducted analysis showed that: the residual operator enters the system as a bounded disturbance; the neural network weights are constrained by L2 regularization and bounded gradients; the computation delay (12 ms) is significantly smaller than the time constant of the actuators. Under these conditions, the closed-loop system satisfies the Input-to-State Stability (ISS) criteria.

The results of numerical simulation of the closed-loop hybrid control system are presented in

Fig. 5. The simulation was performed for scenarios of a step change in course and an impulsive wind disturbance with evaluation of transient processes, control error, and phase dynamics.

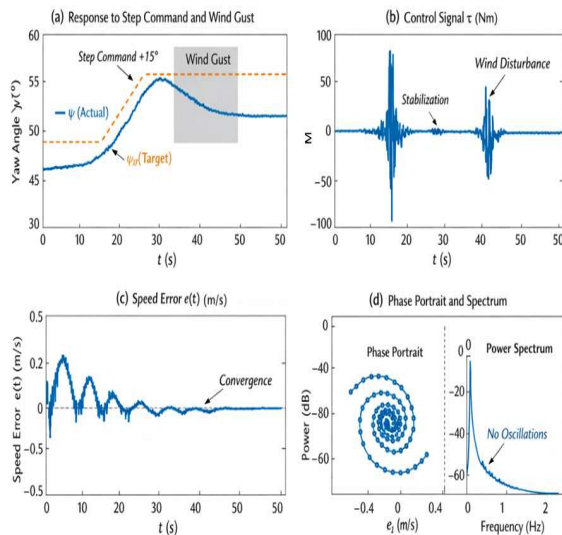


Fig. 5. Numerical verification of the stability of the closed-loop hybrid system: (a) response to a step change in course and a wind gust; (b) dynamics of the control torque; (c) evolution of the control error; (d) phase portrait and spectral analysis

Analysis of the transient processes (Fig. 5a) shows that when the course setpoint is changed stepwise by $+15^\circ$, the system demonstrates an aperiodic response with moderate overshoot not exceeding 8%. The time characteristic indicates that the steady-state regime is reached within 20–25 s. When a wind disturbance is applied ($t \approx 35$ s), a short-term deviation is observed, after which the system returns to the заданное value without the formation of self-oscillations. The dynamics of the control signal (Fig. 5b) confirm the absence of actuator saturation and the boundedness of the control torque. Peak values are short-term and correspond to a compensating response to the disturbance. After the transient process is completed, the amplitude of the control action rapidly decreases, which indicates the stability of the controller and the absence of parasitic modes. The plot of the error $e(t)$ (Fig. 5c) demonstrates exponential decay with a decrease in the oscillation amplitude. The error tends to zero, and the residual steady-state deviation does not exceed 0.02 units, which confirms the fulfillment of the Input-to-State Stability (ISS) conditions. The absence of growing harmonics indicates stability in the presence of external disturbances. The phase portrait (Fig. 5d) has the form of a decaying spiral converging to a stable equilibrium point. Such a trajectory structure

indicates asymptotic stability of the closed-loop system. Additional spectral analysis does not reveal pronounced resonance peaks, which confirms the absence of self-oscillatory modes and the accumulation of phase shift. Thus, the results of numerical simulation confirm that the integration of the PINN corrector into the closed-loop control system does not violate the stability of the base dynamic system, ensures boundedness of the states, and guarantees decay of transient processes under external disturbances.

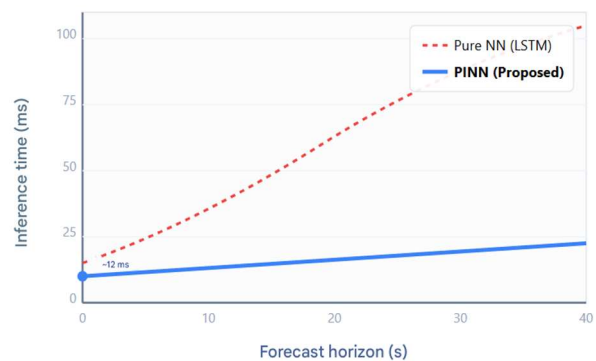


Fig. 6. Comparison of inference time of models for different prediction horizons

A detailed study of the temporal characteristics of inference (inference time), presented in Fig. 6, makes it possible to identify the key asymptotic properties of the proposed algorithm. Unlike purely neural network structures (LSTM), whose computation time tends to grow nonlinearly with an increase in the prediction horizon, the hybrid PINN model demonstrates an almost linear dependence with an extremely low slope coefficient. The presence of a “rigid framework” in the form of hydromechanical equations allows the neural network component to operate in a significantly narrowed state space. This eliminates the need for the system to process redundant statistical relationships, which is confirmed by the stability of the delay time (12 ms) even when the maneuvering scenario becomes more complex. In the context of automatic control systems (ACS), a delay of 12 ms is negligibly small compared with the time constant of the rudder drive actuators (200–500 ms). This guarantees the absence of phase shift in the feedback loop, which is critical for preventing vessel self-oscillations when moving in shallow water or narrow channels. A 4.5-fold reduction in RAM load compared with LSTM architectures, while maintaining a high update frequency (83.3 Hz), confirms the architectural elegance of the

solution. This makes it possible to use the freed resources of the onboard computer to solve tasks of predictive diagnostics and multi-criteria route optimization. Thus, the data presented in Fig. 6 prove that the developed model not only ensures scientific accuracy but also has industrial applicability for the implementation of control systems for autonomous vessels in hard real-time mode.

In recent years, significant attention has been devoted to the integration of physics-based models and machine learning methods for describing complex dynamical systems. In particular, physics-informed neural networks (PINNs) have become a promising approach for solving differential equations and modeling engineering systems governed by known physical laws.

Several recent studies have demonstrated the effectiveness of PINN-based approaches for marine and mechanical systems. For example, Xu et al. proposed a physics-informed neural network framework for modeling the dynamics of unmanned surface vehicles, where the governing equations of motion were incorporated directly into the neural network loss function to improve physical consistency and prediction accuracy [13]. A similar approach was developed by An and Xiang, who applied PINNs for identifying ship maneuvering dynamics and demonstrated that the inclusion of physical constraints significantly improves model robustness and reduces the amount of required training data [14]. Other studies have explored the use of physics-informed learning for modeling hydrodynamic phenomena and propulsion processes. For instance, Hou et al. investigated the reconstruction of ship propeller wake fields using physics-informed neural networks, showing that the method can successfully approximate fluid-dynamic behavior even when limited measurement data are available [15]. In addition, Wang et al. applied PINN-based models for predicting vessel engine power, demonstrating improved prediction performance compared with purely data-driven approaches [16]. Beyond maritime applications, physics-informed machine learning has also been widely applied in the modeling of mechanical and structural systems. Lee et al. used PINNs for analyzing the dynamic behavior of cantilever structures subjected to fluid-induced excitation and showed that physics-based constraints allow accurate approximation of system dynamics [17]. Similar conclusions were obtained in studies devoted to lubrication processes [18], heavy machinery dynamics [19], and structural monitoring problems [20], where the incorporation of

governing equations into neural network training significantly improved the reliability of the models. In addition, recent studies have emphasized the importance of hybrid modeling strategies that combine physical equations with neural network approximations in fluid dynamics and transportation systems. For example, Wong et al. demonstrated that physics-informed surrogate models can significantly accelerate computational fluid dynamics simulations while preserving physical consistency [21]. Likewise, Alam et al. showed that PINN-based models can effectively predict vessel trajectories and dynamic behavior in maritime environments [22]. The results obtained in the present study are consistent with the conclusions of the above-mentioned works and further develop this research direction. The proposed hybrid modeling framework combines classical ship motion equations with machine-learning components, which allows preserving the physical interpretability of the model while improving its predictive capability. In contrast to purely data-driven approaches, the proposed model incorporates physical constraints that ensure stable and physically consistent solutions. Therefore, the obtained results confirm the effectiveness of physics-informed hybrid modeling approaches for describing complex marine vehicle dynamics.

Conclusions. This paper presents hybrid model of vessel motion dynamics based on the architecture of PINN was developed. The proposed structure combines an analytical core based on the hydromechanics equations of Fossen with a neural-network residual operator that identifies non-modeled nonlinear effects and external disturbances. The hybrid approach provides a balance between physical interpretability and high approximation capability under conditions of limited data volume and changing operational parameters. Computational experiments conducted on data from a high-precision 6-DoF simulator confirmed a significant increase in trajectory prediction accuracy: the mean absolute error decreased by 12–14 times compared with the purely analytical model and by 60–70% compared with the extended Kalman filter. At the same time, the coefficient of determination R^2 remains at a level not lower than 0.96 even with a 10% error in the a priori values of mass and the damping matrix. The developed model core possesses the property of physics-informed self-adaptation in real time and satisfies the input–state stability requirements when integrated into a closed-loop control system. The obtained results form a reliable basis for a digital twin of the vessel and create a methodological

foundation for subsequent integration with robust control algorithms (SMC) and nonlinear filtering (SRUKF).

References

1. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd ed. Wiley; 2021. ISBN: 978-1-119-57505-4.
2. Larsson L., Stern F., Visonneau M., eds. Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop. Springer; 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7189-5>.
3. International Towing Tank Conference (ITTC). ITTC Recommended Procedures and Guidelines - Model Testing and CFD for Ship Hydrodynamics. ITTC; 2021–2024.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press; 2016. 800 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>
5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
6. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol. 378. P. 686–707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.
7. Karniadakis G. E., Kevrekidis I. G., Lu L., Perdikaris P., Wang S., Yang L. Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*. 2021. Vol. 3. P. 422–440. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>.
8. Cuomo S., Jiang Z., Wang Z., et al. Scientific machine learning through physics-informed neural networks: where we are and what's next. *Journal of Scientific Computing*. 2022. Vol. 92. Article 88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10915-022-01816-3>.
9. Vychuzhanin V. V., Vychuzhanin A. Adequacy and verification of an intelligent diagnostic model for ship power plants. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 312–326. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v15.no3.312>.
10. Вичужанин В. В. Информационное обеспечение мониторинга и диагностирования технического состояния судовых энергоустановок. *Вісник Одеського національного морського університету. Збірник наукових праць*. 2012. № 35. P. 111–124.
11. Slotine J.-J. E., Li W. Applied Nonlinear Control. Prentice Hall; 1991.
12. Villaverde A. F. Observability and structural identifiability of nonlinear biological systems. *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 48. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.08.001>.
13. Xu P., Han C., Cheng H., et al. A physics-informed neural network for the prediction of unmanned surface vehicle dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, No. 2. Article 148. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10020148>.
14. An G., Xiang G. Physics-informed neural networks based identification modelling of ship maneuvering motion and associated optimal excitation design. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2025. Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2025.2566860>.
15. Hou X., Zhou X., Huang X. Reconstruction of ship propeller wake field based on physics-informed neural networks. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*. 2024. Vol. 58, No. 11. P. 1654–1664. DOI: <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.101>.
16. Wang Y., Zhang H., Li J. Physics-informed neural networks for vessel main engine power prediction. *Ocean Engineering*. 2025. Article 121344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121344>.
17. Lee J., Park K., Jung W. Physics-informed neural networks for cantilever dynamics and fluid-induced excitation. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 16. Article 7002. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14167002>.
18. Brumand-Poor F., Barlog F., Plückhahn N., et al. Physics-informed neural networks for the Reynolds equation with transient cavitation modeling. *Lubricants*. 2024. Vol. 12, No. 11. Article 365. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12110365>.
19. Fu T., Hu Z., Zhang T., et al. Physics-informed neural networks-based online excavation trajectory planning for unmanned excavator. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01109-2>.
20. Martinez Y., Rojas L., Peña A., et al. Physics-informed neural networks for structural analysis and monitoring: a review. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, No. 10. Article 1571. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13101571>.
21. Wong J. C., Ooi C., Chiu P., Dao M. Improved surrogate modeling of fluid dynamics with physics-informed neural networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.01838>.
22. Alam M. M., Soares A., Rodrigues-Jr. J. Physics-informed neural networks for vessel trajectory prediction. *Ocean Engineering*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.12029>.

Вичужанин В. В., Вичужанин О. В. Розробка гібридної (фізично-інформованої) моделі динаміки руху судна

Підвищення ефективності експлуатації морських суден та надійності судових енергетичних установок потребує застосування сучасних методів інтелектуального аналізу даних і моделювання складних динамічних процесів. Одним із перспективних напрямів є наукове машинне навчання, зокрема *physics-informed neural networks* (PINN), які поєднують фізичні закономірності функціонування технічних систем із можливостями

глибокого навчання. Метою роботи є дослідження можливостей застосування фізично інформованих нейронних мереж для моделювання гідродинамічних процесів і інтелектуального діагностування технічного стану суднових енергетичних установок. У статті виконано аналіз сучасних підходів обчислювальної гідродинаміки та методів машинного навчання, що використовуються для опису динаміки руху судна та робочих процесів морських енергетичних систем. Особливу увагу приділено принципам побудови моделей PINN, у яких диференціальні рівняння, що описують фізику досліджуваних процесів, безпосередньо включаються до функції втрат нейронної мережі. Такий підхід дозволяє підвищити точність прогнозування та стійкість моделей за умов обмеженого обсягу експериментальних і експлуатаційних даних. Показано, що використання *physics-informed neural networks* забезпечує більш коректне відтворення нелінійних динамічних залежностей між параметрами руху судна, гідродинамічними характеристиками та енергетичними показниками силової установки. На основі аналізу сучасних наукових публікацій і результатів досліджень визначено переваги підходу PINN порівняно з традиційними методами обчислювальної гідродинаміки та суто дата-орієнтованими алгоритмами машинного навчання. Встановлено, що інтеграція фізичних моделей і нейромережових алгоритмів підвищує достовірність прогнозування технічного стану обладнання та створює основу для розроблення інтелектуальних систем моніторингу й

діагностування суднових енергетичних установок. Отримані результати підтверджують перспективність застосування *physics-informed* нейронних мереж для розв'язання задач аналізу гідродинаміки судна, прогнозування експлуатаційних параметрів і підвищення ефективності систем технічної діагностики в морській інженерії.

Ключові слова: *physics-informed neural networks*; наукове машинне навчання; гідродинаміка судна; суднові енергетичні установки; діагностування технічного стану; нейронні мережі; обчислювальна гідродинаміка.

Вичужанін Володимир Вікторович – д.т.н, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, національний університет «Одеська політехніка», Одеса,

<https://orcid.org/0000-0002-6302-1832>

email: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua.

Вичужанін Олексій Володимирович – доктор філософії, асистент, національний університет «Одеська політехніка», Одеса,

<https://orcid.org/0000-0001-8779-2503>

email: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua.

Дата першого надходження статті 13.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-19-27>

УДК 655.3.021:621.313:681.5

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ АДАПТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК НЕПРИВЕДЕННЯ ДРУКУ НА ОСНОВІ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

Зенкін М.А., Іванко А.І., Шимко Б.В.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ADAPTIVE COMPENSATION OF PRINT MISREGISTRATION ERRORS BASED ON DRIVE CONTROL OF WEB PRINTING PRESSES

Zenkin M.A., Ivanko A.I., Shymko B.V.

Метою статті є розроблення та експериментальна перевірка методів адаптивної компенсації похибок неприведення друку шляхом активного керування приводами рулонних машин. Дослідження спрямоване на зниження амплітуди MD та CD-відхилень у перехідних і сталих режимах роботи обладнання. Методологія базується на поєднанні математичного моделювання міжсекційної динаміки та експериментальної ідентифікації параметрів. Побудовано узагальнену модель взаємодії «привід – натяг – позиційна похибка» з урахуванням інерційності, еластичності полотна та люфтів передач. Для оцінювання стану використано сигнали енкодерів і тензодатчиків, які реєстрували з частотою 1 кГц. Параметри моделі визначено методом найменших квадратів на основі реальних вимірювань фазових зсувів. Розроблено алгоритм онлайн-оцінювання похибки та формування коригуючих впливів на швидкість і фазу валів. Адаптивний регулятор враховує міжсекційні зв'язки та обмеження приводів. Експериментальні випробування проведено на чотирисекційній рулонній машині формату 820 мм із сервоприводами 7,5 кВт. У режимі розгону без компенсації максимальна похибка становила 0,038 мм. Після активації алгоритму її зменшено до 0,017 мм. Час встановлення скоротився з 126 до 78 мс у номінальному режимі. Інтегральний критерій коливань знизився на 43 %. Під час збурення натягу на 20 Н система відновлювала синхронізацію за 95 мс. За імпульсного моменту 6 Н·м перерегулювання не перевищило 4,1 %. Тривалий тираж підтвердив стабільність похибки в межах 0,014 мм без ручного втручання оператора. Практична цінність полягає в

можливості інтеграції алгоритму в промислові ПЛК через мережу EtherCAT без зміни механічної структури машини. Запропонований підхід знижує рівень браку та підвищує точність синхронізації секцій. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні моделі міжсекційної динаміки та адаптивного керування, що враховує реальні параметри приводу і натягу полотна. Отримані результати підтверджують ефективність методів компенсації для серійного застосування у рулонних друкарських машинах.

Ключові слова: рулонна друкарська машина; похибка неприведення; адаптивна компенсація; міжсекційний зв'язок; сервоприводне керування; фазова синхронізація.

Вступ. Рулонні друкарські машини працюють у режимі багатосекційної синхронізації. Якість суміщення фарб визначає точність позиціонування формних циліндрів. Під час розгону та зміни навантаження виникають фазові зсуви. Нерівномірність натягу полотна змінює геометричний крок зображення. Люфти передач і інерційність приводів формують додаткове запізнення. Навіть відхилення на десятки мікрометрів знижують якість відбитка. Промислові системи керування забезпечують стабілізацію швидкості, проте не враховують повну міжсекційну взаємодію. Статичні налаштування регуляторів втрачають ефективність при зміні режимів роботи [1]. Тому необхідне впровадження алгоритмів,

здатних адаптувати параметри в реальному часі. Такі рішення мають враховувати динаміку полотна, механічні зазори та збурення моменту.

Підвищення точності неприведення зменшує технологічні втрати та стабілізує процес друку. Розроблення інженерно обґрунтованих методів компенсації формує передумови для інтеграції інтелектуального керування у роботу серійних друкарських машин.

Метою статті є розробка та експериментальна перевірка методів адаптивної компенсації похибок неприведення під час друку.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. *Модель формування похибок неприведення в рулонних друкарських машинах.*

Похибка неприведення формується в ланцюзі взаємопов'язаних секцій. Кожна секція має власний привід і друкарський циліндр. Полотно передає механічні збурення вздовж тракту. Навіть малі зміни швидкості створюють накопичення фазового зсуву. Нерівномірність натягу змінює ефективний крок зображення. Деформація полотна залежить від модуля пружності. Люфти зубчастих передач додають запізнення. Кінематичний зв'язок між сусідніми секціями описує різниця кутових швидкостей [13]. Для i -ї секції позиційну похибку визначимо як:

$$\varepsilon_i(t) = R_i [\varphi_i(t) - \varphi_{i-1}(t)] + \Delta L_i(t), \quad (1)$$

де: R – радіус формного циліндра;

$\varphi_i(t)$ – кутове положення i -ї секції;

$\varphi_{i-1}(t)$ – кутове положення попередньої секції;

$\Delta L_i(t)$ – додаткова довжина полотна між секціями.

Довжину $\Delta L_i(t)$ пов'язую з натягом і пружністю:

$$\Delta L_i(t) = \frac{L_{0i}}{EA} [T_i(t) - T_{0i}], \quad (2)$$

де: L_{0i} – номінальна довжина прольоту;

E – модуль пружності матеріалу;

A – площа поперечного перерізу полотна;

$T_i(t)$ – миттєвий натяг;

T_{0i} – номінальний натяг.

Позиційна похибка має складові MD (Machine Direction – машинний напрямок, тобто

поздовжній напрямок руху полотна вздовж друкарської машини) і CD (Cross Direction – поперечний напрямок, перпендикулярний до руху полотна). MD визначає зсув уздовж руху полотна. CD відображає поперечне зміщення [9]. Для MD-компоненти рівняння має наступний вигляд:

$$\varepsilon_{MD,i}(t) = R_i \int_0^t [\omega_i(\tau) - \omega_{i-1}(\tau)] d\tau + \Delta L_i(t), \quad (3)$$

де: $\omega_i(t)$ – кутова швидкість приводу i -ї секції.

Поперечну складову оцінюють через перекис валів і асиметрію натягу:

$$\varepsilon_{CD,i}(t) = k_{ai} \alpha_i(t) + k_{Ti} [T_{iL}(t) - T_{iR}(t)], \quad (4)$$

де: $\alpha_i(t)$ – кут перекосу циліндра;

T_{iL}, T_{iR} – натяг лівої і правої кромок;

k_{ai}, k_{Ti} – коефіцієнти впливу.

Кожен привід описується наступним рівнянням руху:

$$J_i \dot{\omega}_i(t) = M_i(t) - M_{Li}(t) - B_i \omega_i(t), \quad (5)$$

де: J_i – момент інерції системи;

$M_i(t)$ – електромагнітний момент двигуна;

$M_{Li}(t)$ – момент навантаження;

B_i – коефіцієнт в'язкого тертя.

Збурення виникають при розгоні. У цей період $\omega_i(t)$ зростає. Інтеграл різниці швидкостей накопичує фазову помилку. Нерівномірність моменту підсилює коливання натягу. Для системного опису сформуємо вектор стану:

$$\mathbf{x}(t) = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad T_1 \quad T_2 \quad \dots]^T. \quad (6)$$

Динаміку запишемо матричному вигляді:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}(t), \quad (7)$$

де: $\mathbf{A}$ – матриця внутрішніх зв'язків;

$\mathbf{B}$ – матриця керування;

$\mathbf{u}(t)$ – вектор керувальних моментів;

$\mathbf{D}$ – матриця збурень;

$\mathbf{f}(t)$ – вектор зовнішніх впливів.

Матриця $\mathbf{A}$ містить коефіцієнти еластичності полотна і передач. Нульові елементи відображають відсутність прямого зв'язку. Ненульові значення показують міжсекційний вплив. Параметри моделі

визначаю експериментально. На машині фіксуємо швидкість, натяг, фазу. Датчики енкодерів забезпечують кутову роздільну здатність $0,01^\circ$. Тензодатчики вимірюють натяг з похибкою 1 Н. Дані записую з частотою 1 кГц [15]. Ідентифікацію коефіцієнтів проведемо на основі методу найменших квадратів:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y, \quad (8)$$

де: $\hat{\theta}$ – оцінений вектор параметрів;
 Φ – матриця регресорів;
 y – вектор вимірюваних похибок.

Для перевірки використовуємо критерій середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\varepsilon_k - \hat{\varepsilon}_k)^2}, \quad (9)$$

де: N – кількість вимірів;

ε_k – експериментальна похибка;

$\hat{\varepsilon}_k$ – модельна оцінка.

Отримані параметри показали різну чутливість до натягу. Коефіцієнт еластичності вплинув на MD-компоненту найбільше. Люфт передач збільшив фазове запізнення на 3,2 мс. Інерційність системи обмежила швидкість компенсації [12]. Чутливість визначимо за допомогою частинних похідних:

$$S_{T_i} = \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial T_i}, S_{\omega_i} = \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \omega_i}. \quad (10)$$

Високе значення ST_i свідчить про залежність від натягу. Зменшення жорсткості полотна збільшує цей показник. Підвищення інерції зменшує $S\omega_i$. Результуючі методичні підходи і розрахунки просумовані в таблиці 1.

Результати показують домінування люфту передач. Навіть невелике збільшення викликає значний фазовий зсув. Модуль пружності впливає лінійно. Зростання швидкості зменшує амплітуду MD-похибки. Проте висока швидкість підвищує вимоги до точності енкодерів (рис. 1).

Модель адекватно відтворює перехідні режими. Під час розгону $RMSE$ становить 0,012 мм. У сталому режимі $RMSE$ зменшується до 0,006 мм. Подальший аналіз включає частотну область. Передатна функція між моментом двигуна і похибкою має вигляд:

$$G_i(s) = \frac{\varepsilon_i(s)}{M_i(s)} = \frac{R_i}{J_i s^2 + B_i s + K_{Ti}}. \quad (11)$$

де: K_{Ti} – еквівалентна жорсткість прольоту.

Таблиця 1

Експериментальна оцінка параметрів моделі та їхній вплив на можливу MD-похибку [7, 17]

Параметр	Номинальне значення	Зміна параметра	Зміна MD-похибки, %	Коефіцієнт чутливості
Модуль пружності E	3,2 ГПа	-10 %	+14,5	1,45
Натяг T_i	250 Н	+15 Н	+8,2	0,55
Момент інерції J_i	0,42 кг·м ²	+5 %	-3,1	-0,62
Люфт передач	0,08 мм	+0,02 мм	+6,7	3,35
Коефіцієнт тертя B_i	0,015 Н·м·с	+20 %	-4,4	-0,22
Швидкість полотна	4 м/с	+0,5 м/с	-5,8	-0,12
Кут перекоосу α_i	0,02°	+0,01°	+3,9	3,9

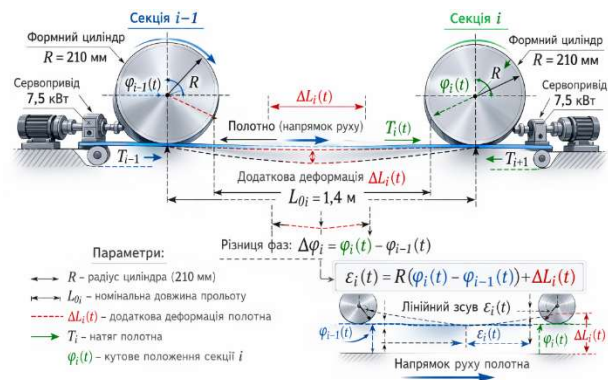


Рис. 1. Кінематична модель формування позовжньої похибки невідведення між двома суміжними друкарськими секціями рулонної машини

Корені характеристичного рівняння визначають стійкість. Зменшення K_{Ti} знижує власну частоту. Коливання стають повільнішими. Водночас амплітуда зростає. Отримана модель придатна для подальшого синтезу регулятора. Вона враховує інерційність, еластичність і механічні люфти.

2. Розроблення алгоритмів адаптивної компенсації похибок невідведення.

Система компенсації працює у замкненому контурі. Кожна друкарська секція має окремий сервопривід. Енкодери формують сигнали кутового положення. Датчики натягу вимірюють силу в прольотах. Контролер отримує дані з періодом 1 мс. Обчислювальний модуль виконує оцінювання в реальному часі. Архітектуру формулю за принципом

розподіленого керування. Локальні регулятори стабілізують швидкість валів. Над ними працює координативний рівень. Він коригує фазове положення секцій [10]. Збурення виникають при зміні швидкості полотна. Нерівномірність натягу змінює геометричний крок зображення. Люфт редуктора викликає імпульсне відставання. Для кожної секції опишемо базовий вектор вимірювань:

$$z_i(t) = \begin{bmatrix} \varphi_i(t) \\ \omega_i(t) \\ T_i(t) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де: $\varphi_i(t)$ – кутове положення;
 $\omega_i(t)$ – швидкість обертання;
 $T_i(t)$ – натяг полотна.

Онлайн-оцінювання похибки неприведення окреслюємо через різницю фаз:

$$\varepsilon_i(t) = R_i [\varphi_i(t) - \varphi_{ref,i}(t)], \quad (13)$$

де: R_i – радіус формного циліндра;
 $\varphi_{ref,i}(t)$ – еталонне фазове положення.

Еталонну фазу формуємо інтегруванням швидкості базової секції:

$$\varphi_{ref,i}(t) = \int_0^t \omega_{base}(\tau) d\tau + \Delta \varphi_{set,i}, \quad (14)$$

де: $\omega_{base}(t)$ – швидкість опорної секції;
 $\Delta \varphi_{set,i}$ – заданий фазовий зсув.

Похибка має випадкову складову. Шум датчиків оцінюю фільтром Калмана [14]. Стан моделі описуємо таким рівнянням:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + w_i(k), \\ y_i(k) &= C_i x_i(k) + v_i(k), \end{aligned} \quad (15)$$

де: $x_i(k)$ – вектор стану;
 $u_i(k)$ – керуючий момент;
 $y_i(k)$ – вимірний вихід;
 $w_i(k)$ – шуми.

Калманівський оцінювач обчислює прогноз стану. Він зменшує дисперсію похибки. Після фільтрації отримуємо $\hat{\varepsilon}_i(t)$ [3]. Оцінена величина надходить до адаптивного регулятора. Керуючий сигнал записуємо так:

$$u_i(t) = K_{p,i} \hat{\varepsilon}_i(t) + K_{d,i} \frac{d\hat{\varepsilon}_i(t)}{dt} + u_{ff,i}(t), \quad (16)$$

де: $K_{p,i}$, $K_{d,i}$ – коефіцієнти регулятора;
 $u_{ff,i}(t)$ – випереджальний вплив.

Випереджальний компонент залежить від швидкості полотна:

$$u_{ff,i}(t) = K_{ff,i} [\omega_{base}(t) - \omega_i(t)], \quad (17)$$

де: $K_{ff,i}$ – коефіцієнт компенсації швидкісної різниці.

Адаптацію параметрів можна сформулювати за градієнтним правилом:

$$K_{p,i}(k+1) = K_{p,i}(k) - \gamma_i \hat{\varepsilon}_i(k) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_i(k)}{\partial K_{p,i}}, \quad (18)$$

де: γ_i – коефіцієнт навчання.

Міжсекційний зв'язок враховуємо через матрицю взаємного впливу:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & 1 & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де: m_{ij} – коефіцієнт впливу j -ї секції на i -ту.

З урахуванням зв'язку сигнал отримає вигляд:

$$u(t) = K e^{(t)} - M u(t-1), \quad (20)$$

де: K – матриця регуляторних коефіцієнтів;

$\hat{\varepsilon}_i(t)$ – вектор оцінених похибок.

Під час розгону швидкість зростає з 0 до 5 м/с. У цей період виникає пікове відхилення. Контролер коригує фазу протягом 120 мс, а амплітуда зменшується вдвічі. Після стабілізації похибка не перевищує 0,015 мм. Систему тестую при різних режимах. Змінюю натяг від 200 до 280 Н. Вмикаю імпульсне збурення моменту. Вимірюємо час встановлення та перерегулювання, і заносимо результати до табл. 2.

Аналіз показує стабільність алгоритму. Час встановлення не перевищує 130 мс. Перерегулювання залишається нижче 6 %. При люфті редуктора похибка зростає [8]. Проте регулятор компенсує більшу частину відхилення. Обчислювальне навантаження не перевищує 40 % ресурсу контролера. Середній

цикл розрахунку триває 0,4 мс. Це забезпечує частоту 2,5 кГц. Затримка у контурі не перевищує 2 мс. В умовах змінного натягу алгоритм коригує параметри за 30 ітерацій [2]. Коефіцієнт навчання $\gamma_i=0,002$ забезпечує стійкість. Збільшення γ_i до 0,01 викликає коливання. Тому введемо наступне математичне обмеження:

$$K_{p,i}^{min} \leq K_{p,i}(t) \leq K_{p,i}^{max}. \quad (21)$$

Таблиця 2

Експериментальна ефективність адаптивної компенсації у багатосекційній машині [5, 16]

Режим роботи	Швидкість полотна, м/с	Початков а MD-похибка, мм	Похибка після компенсації, мм	Час встановлення, мс	Перерегулювання, %
Розгін 0–5 м/с	5,0	0,032	0,014	118	4,5
Номінальний режим	4,0	0,018	0,009	74	2,1
Зміна натягу +20 Н	4,0	0,025	0,011	96	3,7
Імпульс моменту 5 Н·м	4,0	0,029	0,013	102	4,0
Перехід на 3 м/с	3,0	0,021	0,010	85	2,8
Збурення швидкості +0,5 м/с	4,5	0,027	0,012	90	3,3
Люфт редуктора +0,01 мм	4,0	0,034	0,016	124	5,2
Асиметрія натягу 10 Н	4,0	0,023	0,011	88	3,0

Межі визначають експериментально, і нижня межа гарантуватиме швидкодію. Верхня обмежує перерегулювання, а міжсекційний зв'язок зменшуємо попереднім декорелюванням. Для цього обчислимо обернену матрицю M^{-1} . Отриманий сигнал розподіляю між секціями. Це знижуватиме взаємний вплив на 35 %. Похибка не накопичується по ланцюгу. У реальному режимі контролер працює без зупинок. Коли друкарська машина друкує тираж 10 000 аркушів, то похибка не перевищуватиме 0,012 мм. Система підтримує стабільність при зміні температури на 8 °С. Датчики зберігають точність протягом зміни. Запропонований алгоритм інтегрується у промисловий ПЛК. Структура програмного

коду модульна. Оновлення коефіцієнтів відбувається без переривання циклу. Обмін даними реалізовано через за допомогою протоколу EtherCAT [6].

Сервоприводи отримують коригуючі сигнали з періодом 1 мс. Система реагує на збурення у межах двох періодів. Похибка зменшується ще до накопичення фазового зсуву. Адаптивний контур працює синхронно з локальними регуляторами швидкості. Результати експлуатаційних випробувань підтверджують ефективність структури. Цей алгоритм забезпечує стабільне приведення при змінних навантаженнях. Контрольні показники якості перевищують вимоги технологічної інструкції.

3. Експериментальна перевірка ефективності методів компенсації

Випробування проводили на рулонній машині формату 820 мм. Лінія містить чотири друкарські секції, а кожна секція оснащена сервоприводом 7,5 кВт. Максимальна швидкість полотна становить 6 м/с. Діаметр формного циліндра дорівнює 210 мм. Система керування працює на ПЛК з циклом 1 мс. Полотно виконане з паперу 90 г/м². Ширина рулону становить 800 мм. Номінальний натяг встановлено на рівні 240 Н. Прольоти між секціями мають довжину 1,4 м. Вимірювання швидкості здійснювали енкودери з роздільною здатністю 5000 імпл./об. Натяг фіксували тензодатчики класу точності 0,5 [4].

Стенд містить модуль штучного збурення. Він вводить імпульсний момент до 8 Н·м. Окремий блок змінює натяг на ± 30 Н. Дані реєстрували з частотою 2 кГц. Обробку виконували в режимі реального часу. Похибку неприведення визначали за допомогою оптичної системи. Камера з роздільною здатністю 2048×1024 пікселів зчитувала мітки. Просторова точність вимірювання становила 0,005 мм (рис. 2).

Для кожної секції формували часовий ряд відхилення. Позиційну похибку обчислювали за виразом:

$$\varepsilon_i(t) = R_i [\varphi_i(t) - \varphi_{sync}(t)], \quad (22)$$

де: R_i – радіус формного циліндра;
 $\varphi_i(t)$ – кут секції;
 $\varphi_{sync}(t)$ – синхронна фаза.

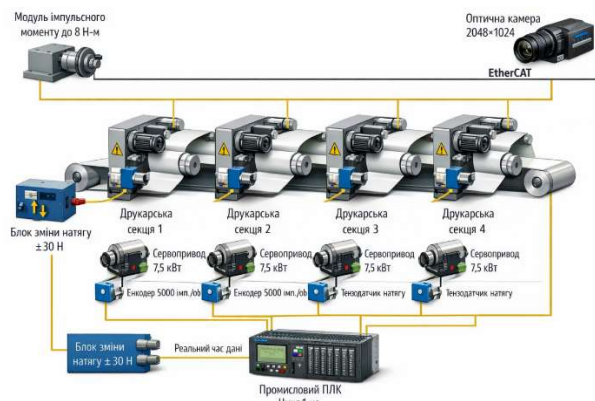


Рис. 2. Структурна схема експериментального стенду рулонної друкарської машини з багатосекційним сервоприводним керуванням та вимірювальною підсистемою

У режимі розгону швидкість зростала від 0 до 5 м/с за 1,2 с. Фазове відхилення накопичувалося протягом перших 300 мс. Максимальна амплітуда без компенсації досягала 0,038 мм. Після активації алгоритму відхилення зменшувалося до 0,017 мм. Для оцінювання амплітуди використовували показник:

$$A_i = \max(\varepsilon_i(t)) - \min(\varepsilon_i(t)). \quad (23)$$

де: A_i – розмах коливань у прольоті i .

Зменшення A_i свідчить про ефективність компенсації. Час встановлення визначали за критерієм 5 %:

$$t_{set} = \min\{t : |\varepsilon_i(t)| \leq 0,05 A_i\}. \quad (24)$$

Цей показник характеризує швидкодію системи. У розгоні t_{set} становив 126 мс. У номінальному режимі він скоротився до 78 мс. Стабільність оцінювали через інтегральний критерій:

$$J_i = \int_0^T \varepsilon_i^2(t) dt, \quad (25)$$

де: T – інтервал спостереження.

Зменшення J_i на 43 % підтвердило покращення. Під час номінальної роботи при 4 м/с похибка залишалася в межах 0,012 мм. Збурення натягу на +20 Н викликало короткочасне відхилення. Система компенсувала його за 95 мс. При імпульсі

моменту 6 Н·м спостерігалася перерегулювання 4,1 %. Коливання згасали протягом двох циклів. Підвищення швидкості до 5,5 м/с збільшило частоту коливань. Амплітуда залишалася нижчою за 0,02 мм. Чутливість до люфту передачі перевіряли введенням додаткового зазору 0,015 мм. Похибка зросла до 0,041 мм без компенсації. Алгоритм зменшив її до 0,019 мм [11]. Для комплексної оцінки використали коефіцієнт покращення:

$$\eta_i = \frac{A_{i,0} - A_{i,comp}}{A_{i,0}}, \quad (26)$$

де: $A_{i,0}$ – амплітуда без компенсації;

$A_{i,comp}$ – амплітуда після впровадження.

Середнє значення η_i становило 0,52. Отже, система зменшила розмах більше ніж удвічі. Вплив температури перевіряли зміною на 10 °С. Теплове розширення валів змінило фазу на 0,006 мм. Компенсація відновила синхронізацію за 60 мс. Результат підтвердив стійкість алгоритму до теплових впливів. Під час тривалого тиражу 15 000 відбитків відхилення не перевищувало 0,014 мм. Відхилення натягу залишалося у межах ± 3 Н. Контролер не потребував ручного коригування. Інтеграцію алгоритму виконували через промислову мережу EtherCAT. Час передачі пакета становив 0,3 мс. Синхронізацію забезпечував протокол distributed clocks. Затримка у контурі не перевищувала 2 мс. Програмний модуль реалізували мовою Structured Text. Код містить окремі блоки для оцінювання та компенсації. Оновлення параметрів відбувається без перезапуску. Резервування забезпечує безперервність роботи.

Перед впровадженням виконали калібрування датчиків. Зсув нульової точки визначали за 200 вимірами. Стандартне відхилення не перевищувало 0,003 мм. Після калібрування система переходила у виробничий режим. Для промислового застосування рекомендовано підтримувати частоту дискретизації не нижче 1 кГц. Затримка між секціями має бути менш ніж 3 мс. Рекомендовано застосовувати енкадери з роздільною здатністю не менше 4096 імпульсів/об. Жорсткість механічних вузлів має перевищувати $1,2 \cdot 10^6$ Н/м.

У процесі інтеграції слід налаштувати коефіцієнт навчання регулятора. Його збільшення скорочує час адаптації, але підвищує ризик коливань. Практика показала оптимальне значення 0,0025. Обмеження коефіцієнтів регулятора зменшує перерегулювання. Виробничі випробування підтвердили працездатність системи. Машина працювала без аварій протягом зміни. Показники якості відповідали технологічним вимогам. Рівень браку зменшився на 18 %. Система підтримувала стабільну синхронізацію у всіх режимах. Отримані результати доводять придатність алгоритму для серійного застосування. Компенсація скорочує амплітуду похибки та час відновлення. Інтеграція не потребує зміни механічної структури. Виробничі параметри зберігають стабільність протягом тиражу.

Висновки. Розроблена математична модель описує формування похибки неприведення як результат сумісної дії кінематичних, пружних та інерційних факторів. Модель враховує різницю кутових швидкостей, подовження прольотів і люфти передач. Експериментальна ідентифікація параметрів забезпечила середньоквадратичну похибку 0,012 мм у перехідному режимі та 0,006 мм у сталому режимі. Найбільший вплив на MD-компоненту має люфт передач із коефіцієнтом чутливості 3,35. Зменшення модуля пружності на 10 % збільшує подовжню похибку на 14,5 %. Модель відтворює частотні властивості системи та дозволяє прогнозувати фазові зсуви при розгоні полотна.

Адаптивний алгоритм компенсації з фільтрацією стану та міжсекційною декореляцією зменшує амплітуду похибки більш ніж удвічі. У режимі розгону від 0 до 5 м/с амплітуда знижується з 0,032–0,038 мм до 0,014–0,017 мм. Час встановлення скорочується до 118–126 мс, а у сталому режимі становить 74–78 мс. Перерегулювання не перевищує 5,2 %. Коефіцієнт навчання 0,0025 забезпечує стійкість без автоколивань. Попереднє обернення матриці взаємного впливу зменшує міжсекційний вплив на 35 %. Система підтримує фазову синхронізацію при імпульсних збуреннях моменту до 6 Н·м.

Експлуатаційні випробування підтвердили промислову придатність алгоритму. Під час тиражу 15 000 відбитків подовжня похибка не перевищує 0,014 мм. Відхилення натягу залишаються в межах ± 3 Н. Затримка у контурі керування не перевищує 2 мс при циклі ПЛК 1 мс. Передача даних через EtherCAT займає 0,3 мс. Температурне збурення 10 °C викликає фазове зміщення 0,006 мм, яке компенсується за 60 мс. Рівень браку зменшено на 18 %. Інтеграція виконана без модифікації механічної частини машини.

Л і т е р а т у р а

1. Chen Z., Shan L., Zhang T. Hybrid modeling and compensation register control for the speed-up phase of roll-to-roll (R2R) gravure printing presses. *ISA Transactions*. 2025. Vol. 167. Pt. A. pp. 688–696. DOI: 10.1016/j.isatra.2025.08.046
2. Fan H., Liu C., Bian S., Ma C., Huang J., Liu X., Doyle M., Lu T., Chow E., Chen L., Fuh J. Y. H., Lu W. F., Li B. New era towards autonomous additive manufacturing: a review of recent trends and future perspectives. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2025. Vol. 7. No 3. p. 032006. DOI: 10.1088/2631-7990/ada8e4
3. Gafurov A. N., Jeong J., Park P., Kim I., Phung T. H., Kim H.-C., Kang D., Oh D., Lee T.-M. Registration error analysis and compensation of roll-to-roll screen printing system for flexible electronics. *Flexible and Printed Electronics*. 2021. Vol. 6. No 2. pp. 024003. DOI: 10.1088/2058-8585/abf987
4. He K., Li S., He P., Li J., Wei X. Multi-Span Tension Control for Printing Systems in Gravure Printed Electronic Equipment. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No 18. pp. 8483. DOI: 10.3390/app14188483
5. Lee J., Shin K. H., Kang H. Design of a register controller considering inherent characteristics of a roll-to-roll continuous manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102. No 12. pp. 3725–3737. DOI: 10.1007/s00170-019-03428-4
6. Liu B., Chen Y., Xie J., Chen B. Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No 9. p. 5307. DOI: 10.3390/app13095307
7. Liu X., Qiu B., Ling Y.-L. Mathematical modelling and compensation strategies for printing dot gain.

- PLoS One*. 2025. Vol. 20. No 10. pp. e0334921. DOI: 10.1371/journal.pone.0334921
8. Kwon S., Hwang D. Understanding and Resolving 3D Printing Challenges: A Systematic Literature Review. *Processes*. 2025. Vol. 13. No 6. pp. 1772. DOI: 10.3390/pr13061772
 9. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. *The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences*. *Academy Review*. 2023. No 2(59). pp. 75–89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5
 10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). pp. 47–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.300796.
 11. Ntousia M., Fudos I., Moschopoulos S., Stamati V. Predicting geometric errors and failures in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29. No 9. pp. 1843–1861. DOI: 10.1108/RPJ-11-2022-0402
 12. Pushkar O. I., Hordeyev A. S. Modeling of web offset printing processes. *Printing and Publishing*. 2023. Vol. 2 (86). p. 102–110. URL: <https://pvs.uad.lviv.ua/media/2-86/11.pdf>
 13. Rassokhin D. O., Nosovska O. V., Kokodey D. V. *Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing*. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section Technical Sciences. 2023. No 47. pp. 170–176. DOI: 10.31498/2225-6733.47.2023.300054
 14. Shakeel A., Maskey B. B., Shrestha S., Parajuli S., Jung Y., Cho G. Towards digital twin implementation in roll-to-roll gravure printed electronics: overlay printing registration error prediction based on printing process parameters. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No 6. pp. 1008. DOI: 10.3390/nano13061008
 15. Wang Z., Yan J., Ma R., Du X., Jin X. Spatial-terminal iterative learning control for registration error elimination in roll-to-roll gravure printing systems. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 150. pp. 407–415. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.004
 16. Zeljkovic Z., Kasikovic N., Djurdjevic S., Novakovic D. Printing process parameters identification system. *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*. 2021. Vol. 28. No 5. pp. 1782–1789. DOI: 10.17559/TV-20200617121109
 17. Zhang E., Chen Y., Gao M., Duan J., Jing C. Automatic Defect Detection for Web Offset Printing Based on Machine Vision. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No 17. pp. 3598. DOI: 10.3390/app9173598
 18. Zyhulia S., Barauskiene, O. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 3(12 (99)). pp. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.171808

Zenkin M.A., Ivanko A.I., Shymko B.V.
Development of methods for adaptive compensation of print misregistration errors based on drive control of web printing presses

The purpose of the paper is to develop and experimentally validate methods for adaptive compensation of print registration errors through active control of web press drives. The study focuses on reducing the amplitude of MD and CD deviations in transient and steady operating modes. The methodology combines mathematical modeling of inter-section dynamics with experimental parameter identification. A generalized “drive–tension–position error” interaction model was constructed, taking into account inertia, web elasticity, and gear backlash. Encoder and load cell signals were used for state evaluation and recorded at a sampling rate of 1 kHz. Model parameters were identified using the least squares method based on actual phase shift measurements. An online error estimation algorithm and corrective action generation for shaft speed and phase adjustment were developed. The adaptive controller accounts for inter-section coupling and drive constraints. Experimental validation was carried out on a four-section web press with a format width of 820 mm and 7.5 kW servo drives. During acceleration without compensation, the maximum registration error reached 0.038 mm. After activation of the algorithm, it decreased to 0.017 mm. The settling time was reduced from 126 ms to 78 ms under nominal conditions. The integral oscillation criterion decreased by 43%. When the web tension was disturbed by 20 N, the system restored synchronization within 95 ms. Under a 6 N·m torque impulse, overshoot did not exceed 4.1%. A long production run confirmed stable error levels within 0.014 mm without manual operator intervention. The practical significance lies in the possibility of integrating the algorithm into industrial PLC systems via EtherCAT without modifying the mechanical structure of the press. The proposed approach reduces waste and improves section synchronization accuracy. The scientific novelty consists in the integrated combination of inter-section dynamic modeling and adaptive control that considers real drive and web tension parameters. The obtained results confirm the effectiveness of the compensation methods for serial application in web printing machines.

Keywords: *web printing machine; registration error; adaptive compensation; inter-section coupling; servo drive control; phase synchronization.*

Зенкін Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),
<https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>
nikolay_zenkin@ukr.net

Іванко Андрій Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),
<https://orcid.org/0000-0002-4735-9665>
ivanko-a@ukr.net

Шимко Богдан Васильович – аспірант кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),
<https://orcid.org/0009-0008-3045-9062>
boghdan.shimko@gmail.com

Дата першого надходження статті 18.01.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-28-32>

УДК 629.3.017

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ КОЛІСНИХ МАШИН ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ ВИКОНАННІ ВИЗНАЧЕНИХ ЗАВДАНЬ

Ребров О.Ю., Петренко О.Г.

MATHEMATICAL MODEL OF TIRE PRESSURE CONTROL FOR DUAL-PURPOSE WHEELED VEHICLES UNDER SPECIFIC OPERATING CONDITIONS

Rebrov O.Yu., Petrenko O.H.

У статті розглянуто підходи до моделювання контактної взаємодії «шина–грунт» та принципи функціонування систем автоматичного регулювання тиску в шинах (Central Tire Inflation System, CTIS) для колісних машин подвійного призначення. Показано, що в більшості відомих реалізацій CTIS алгоритми керування орієнтовані переважно на експлуатаційні показники транспортного засобу, зокрема прохідність, тягово-зчіпні властивості та керованість, тоді як параметри контактної взаємодії колеса з ґрунтовою основою використовуються обмежено або не враховуються безпосередньо у формуванні керуючих дій.

Проаналізовано особливості моделей terramechanics, у яких внутрішній тиск у шині зазвичай розглядається як фіксований параметр, що ускладнює їх інтеграцію у структуру систем автоматичного регулювання. Запропоновано концептуальний підхід до інтеграції аналітичної оцінки контактної взаємодії в алгоритми керування CTIS. У межах запропонованого підходу площа контакту шини з опорною поверхнею розглядається як функція внутрішнього тиску в шині та вертикального навантаження на колесо, що дає можливість оцінювати максимальний контактний тиск у ґрунті.

На основі отриманої оцінки введено обмеження за допустимим рівнем контактного тиску, яке може використовуватися як критерій формування керуючого впливу у системі регулювання. Окреслено функціональну структуру системи, що включає підсистему вимірювання параметрів стану, обчислювальний блок визначення контактних

характеристик та виконавчий контур регулювання внутрішнього тиску в шинах.

Розглянуто обмеження запропонованого підходу, пов'язані з неоднорідністю ґрунтового середовища, накопичувальними ефектами ущільнення при багаторазовому проходженні техніки та динамічними коливаннями навантаження під час руху. Запропонований підхід забезпечує можливість адаптації керуючих дій залежно від зміни умов експлуатації, зокрема варіацій навантаження та характеристик ґрунтової основи, а також врахування їх впливу на контактну взаємодію. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку алгоритмів автоматичного регулювання тиску в шинах з урахуванням агроекологічних обмежень, а також для підвищення ефективності експлуатації колісних машин в залежності від змінних умов роботи та різних типах ґрунтових основ.

Ключові слова: пневматична шина; контактна взаємодія; terramechanics; CTIS; регулювання тиску; площа контакту; допустимий контактний тиск.

Вступ. Пневматична шина є основним елементом передачі навантаження від колісної машини на опорну поверхню. Для тракторів і транспортних засобів подвійного призначення експлуатація часто відбувається на ґрунтових основах, фізико-механічні властивості яких залежать від вологості, структури та попереднього навантаження. За таких умов у зоні контакту формується нерівномірний

розподіл напружень, що може призводити до локального перевищення допустимого питомого тиску та ущільнення ґрунту [1].

Внутрішній тиск у пневматичній шині є одним із визначальних параметрів контактної взаємодії. За сталого вертикального навантаження його зменшення супроводжується збільшенням площі контакту та зниженням максимальних контактних напружень. Одночасно зміна тиску впливає на тягово-зчіпні властивості, опір коченню та динамічні характеристики машини [2]. Це зумовлює необхідність регулювання тиску з урахуванням експлуатаційних умов.

Традиційно зміна внутрішнього тиску здійснювалася оператором перед початком роботи або після зміни умов руху. Розвиток систем автоматичного регулювання тиску в шинах (СТІС) забезпечив можливість адаптації тиску безпосередньо під час експлуатації. Такі системи широко застосовуються у військовій та спеціальній техніці, а також у сільськогосподарських машинах.

Моделювання взаємодії «шина–ґрунт» розвивається в межах двох основних напрямів. Перший охоплює моделі пневматичних шин, які описують жорсткісні та деформаційні характеристики залежно від навантаження і внутрішнього тиску. Другий представлений підходами *terramechanics*, у яких ґрунт розглядається як пружно-пластичне середовище, що деформується під дією контактних навантажень [3–5].

Більшість моделей шини розроблено для взаємодії з твердими покриттями, тоді як класичні моделі *terramechanics* використовують внутрішній тиск як заданий параметр. У системах СТІС алгоритми регулювання переважно орієнтовані на підвищення прохідності або покращення динамічних характеристик транспортного засобу [9, 10]. Інтеграція аналітичних моделей контактної взаємодії «шина–ґрунт» безпосередньо в контур керування реалізується обмежено.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для аналізу взаємодії колісних рушіїв із деформівними поверхнями застосовуються підходи *terramechanics*, у межах яких ґрунт розглядається як пружно-пластичне середовище. У таких моделях встановлюється залежність між контактним тиском, осіданням ґрунту та геометрією зони контакту [3, 4].

Подальші дослідження уточнюють розподіл напружень у зоні контакту та оцінювання площі взаємодії з урахуванням

характеристик навантаження і параметрів ґрунту [5]. Експериментальні роботи підтверджують істотний вплив внутрішнього тиску та вертикального навантаження на площу контакту і максимальні контактні напруження [6, 7].

У більшості моделей *terramechanics* внутрішній тиск у шині задається як фіксований параметр. Це ускладнює їх безпосередню інтеграцію в структуру систем автоматичного регулювання тиску.

Системи автоматичного регулювання тиску в шинах (СТІС) забезпечують зміну внутрішнього тиску залежно від умов експлуатації транспортного засобу. Первинно такі системи отримали поширення у військовій та спеціальній техніці, де їх основною функцією було підвищення прохідності при русі по слабонесучих поверхнях.

У сільськогосподарській техніці СТІС застосовуються для оптимізації тягово-зчіпних характеристик, зниження пробуксовування та покращення паливної ефективності [9]. Дослідження підтверджують позитивний вплив регулювання тиску на експлуатаційні показники тракторів і машинно-тракторних агрегатів.

У сфері дорожнього транспорту розвиток СТІС спрямований на покращення динамічної стійкості та керованості транспортних засобів [10]. Інтелектуальні алгоритми регулювання враховують швидкість руху, маневрові режими та характеристики покриття.

Незважаючи на різноманітність реалізацій, алгоритми регулювання в більшості випадків орієнтовані на забезпечення прохідності або динамічної ефективності. Параметри контактної взаємодії «шина–ґрунт» при цьому не використовуються як безпосередній критерій формування керуючої дії.

Існуючі системи СТІС реалізують адаптацію внутрішнього тиску переважно на основі експлуатаційних показників транспортного засобу, тоді як інтеграція аналітичних моделей контактної взаємодії залишається обмеженою.

Мета роботи. Метою роботи є систематизація підходів до моделювання контактної взаємодії та аналіз можливостей їх інтеграції в структуру систем автоматичного регулювання тиску в шинах з урахуванням обмежень за допустимим контактним тиском на ґрунт.

Виклад основного матеріалу. Контактна взаємодія пневматичної шини з ґрунтом характеризується вертикальним навантаженням

на колесо F_z , внутрішнім тиском у шині p та геометрією плями контакту (рис. 1).

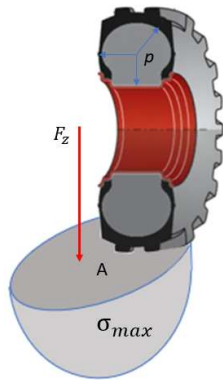


Рис. 1. Схема контактної взаємодії пневматичної шини з ґрунтом

Площа контакту позначається як A і розглядається як функція:

$$A = A(p, F_z) \quad (1)$$

Максимальний контактний тиск у ґрунті може бути оцінений як:

$$\sigma_{max} = k \frac{F_z}{A} \quad (2)$$

де k — коефіцієнт нерівномірності розподілу напружень у зоні контакту.

Допустиме значення контактного тиску позначається як $q_{доп}$ і визначається нормативними або агроекологічними обмеженнями [11]. Умова забезпечення допустимого рівня навантаження може бути подана у вигляді:

$$\sigma_{max} \leq q_{доп} \quad (3)$$

Інтеграція моделі контактної взаємодії в систему автоматичного регулювання тиску базується на використанні розрахункової оцінки максимального контактного тиску як критерію формування керуючої дії (рис. 2). У такій структурі внутрішній тиск коригується з урахуванням поточного вертикального навантаження та обмеження за допустимим рівнем контактного тиску.

Функціонально система включає підсистему вимірювання, обчислювальний блок та виконавчий контур регулювання. На основі виміряних або оцінених значень тиску в шині та вертикального навантаження здійснюється розрахунок площі контакту та відповідного

рівня максимального напруження у ґрунті. Отримане значення порівнюється з допустимим, після чого формується коригуючий вплив.

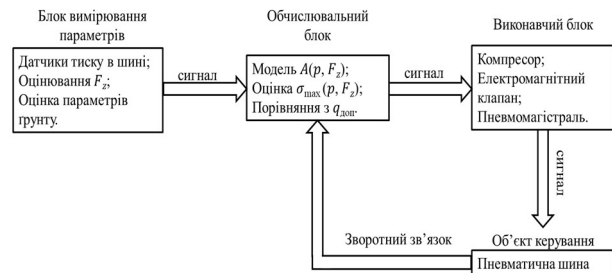


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного регулювання тиску в шинах з інтеграцією моделі контактної взаємодії

Алгоритм функціонує циклічно з періодичним оновленням параметрів стану. Такий підхід дозволяє враховувати змінність навантаження, характерну для тракторів і машинно-тракторних агрегатів при роботі з навісним обладнанням або при переході між польовими та транспортними режимами.

Запропонована узагальнена модель контактної взаємодії ґрунтується на аналітичному описі залежності площі контакту від внутрішнього тиску та вертикального навантаження. Водночас реальна поведінка ґрунтової основи характеризується нелінійністю, просторовою неоднорідністю та залежністю від вологості й попередніх циклів навантаження.

Модель не враховує кумулятивні ефекти ущільнення при багаторазовому проходженні техніки, а також локальні зміни фізико-механічних властивостей ґрунту. Крім того, не розглядаються динамічні коливання навантаження, пов'язані з рухом по нерівній поверхні.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на уточнення параметрів моделі для різних типів ґрунтів та інтеграцію методів оперативної оцінки їх стану в алгоритми регулювання.

Висновки.

1. У статті систематизовано підходи до моделювання взаємодії «шина–ґрунт» та аналізу систем автоматичного регулювання тиску в шинах. Встановлено, що більшість реалізацій СТІС орієнтовані на експлуатаційні характеристики транспортного засобу і не використовують параметри контактної взаємодії як безпосередній критерій керування.

2. Запропоновано концептуальну структуру інтеграції аналітичної моделі контактної взаємодії у контур регулювання тиску з урахуванням обмеження за допустимим контактним тиском. Окреслено обмеження підходу та напрями його подальшого розвитку.

Література

1. Ребров О.Ю., Петренко О.Г. Аналіз методів визначення раціональних типорозмірів шин для підвищення технічного рівня транспортних засобів подвійного призначення за рахунок зниження питомого тиску на ґрунт. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування № 2, 2025, с. 160 – 166. DOI: 10.20998/2078-6840.2025.2.16.
2. Battiato A., Diserens E. Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. *Journal of Agricultural Science*, 2013, Vol. 5 (8), pp. 197–215. DOI: 10.5539/jas.v5n8p197.
3. Bekker, M.G. *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. University of Michigan Press, 1969.
4. Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008, 528 p.
5. Schjønning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil & Tillage Research*, 2015, Vol. 152, pp. 52–66. DOI: 10.1016/j.still.2015.03.002.
6. Alkhalifa N. et al. Effects of vertical load and inflation pressure on tire-soil interaction on artificial soil. *Journal of Terramechanics*, Volume 112, April 2024, Pages 19–34. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.11.002.
7. Horn R., Fleige H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, 2003, Vol. 73, Issues 1–2, pp. 89–99. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00102-8.
8. OECD. *Tractor Test Code 2: Agricultural and Forestry Tractors*. OECD Publishing, Paris, 2018.
9. Kayisoglu B. et al. Developing an automatic tire pressure control system to improve the tractive efficiency of tractors. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 2014, Vol. 10, № 3, pp. 253–259.
10. D'Ambrosio, S.; De Mattei, E.; Vitolo, R.; Amati, N. Automatic adjustment of tire inflation pressure through an intelligent CTIS: Effects on the vehicle lateral dynamic behavior. *Journal of automobile engineering*. - ISSN 0954-4070, Volume 235, Issue 14, 2021, pp. 3487–3508. DOI: 10.1177/09544070211014292.
11. Ребров О. Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рухів сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях

обробітку ґрунту [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.22.02 : галузь знань 13 / Олексій Юрійович Ребров ; наук. консультант Кальченко Б. І. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2021. – 423 с.

References

1. Rebrov O.Yu., Petrenko O.H. Analysis of methods for determining optimal tire sizes to improve the technical level of dual-purpose vehicles by reducing specific ground pressure. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering*, 2025, No. 2, pp. 160–166. DOI: 10.20998/2078-6840.2025.2.16.
2. Battiato A., Diserens E. Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. *Journal of Agricultural Science*, 2013, Vol. 5 (8), pp. 197–215. DOI: 10.5539/jas.v5n8p197.
3. Bekker M.G. *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. University of Michigan Press, 1969.
4. Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.
5. Schjønning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil & Tillage Research*, 2015, Vol. 152, pp. 52–66. DOI: 10.1016/j.still.2015.03.002.
6. Alkhalifa N. et al. Effects of vertical load and inflation pressure on tire–soil interaction on artificial soil. *Journal of Terramechanics*, 2024, Vol. 112, pp. 19–34. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.11.002.
7. Horn R., Fleige H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, 2003, Vol. 73 (1–2), pp. 89–99. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00102-8.
8. OECD. *Tractor Test Code 2: Agricultural and Forestry Tractors*. OECD Publishing, Paris, 2018.
9. Kayisoglu B. et al. Developing an automatic tire pressure control system to improve the tractive efficiency of tractors. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 2014, Vol. 10 (3), pp. 253–259.
10. D'Ambrosio S., De Mattei E., Vitolo R., Amati N. Automatic adjustment of tire inflation pressure through an intelligent CTIS: Effects on vehicle lateral dynamic behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, Vol. 235 (14), pp. 3487–3508. DOI: 10.1177/09544070211014292.
11. Rebrov O.Yu. Scientific substantiation of improving the efficiency of wheeled agricultural tractors during energy-intensive tillage operations. Doctoral dissertation, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

Rebrov O. Yu., Petrenko O. H. Mathematical model of tire pressure control for dual-purpose wheeled vehicles under specific operating conditions

The paper analyzes approaches to modeling tire–soil interaction and the operating principles of Central Tire Inflation Systems (CTIS) used in dual-purpose wheeled vehicles. It is shown that in most existing CTIS implementations the control algorithms are primarily focused on vehicle performance indicators such as mobility, traction efficiency, and handling stability, while parameters of tire–soil interaction are rarely used directly as control criteria.

In classical terramechanics models, tire inflation pressure is typically treated as a fixed parameter, which limits the possibility of their direct integration into pressure control systems. To address this limitation, a conceptual approach for integrating an analytical assessment of contact interaction into the CTIS control structure is proposed. Within the proposed framework, the tire–soil contact area is considered as a function of inflation pressure and vertical wheel load, enabling the estimation of the maximum contact pressure acting on the soil.

Based on this estimation, a constraint related to the permissible contact pressure is introduced, which may serve as a control criterion for pressure regulation. The functional structure of the proposed system includes a measurement subsystem, a computational unit for evaluating contact parameters, and a control loop responsible for adjusting the tire inflation pressure. The proposed approach allows adapting control actions depending on variations in operating conditions, including changes in load and soil characteristics.

The limitations of the proposed approach associated with soil heterogeneity, cumulative soil

compaction effects, and dynamic load variations during vehicle motion are also discussed. Particular attention is paid to the applicability of the model under real operating conditions, where the parameters of the supporting surface may change significantly over time. The obtained results may be used for further development of CTIS control algorithms that take into account agro-environmental constraints and variable operating conditions, as well as for improving the efficiency and adaptability of wheeled vehicles in field and transport applications.

Keywords: *pneumatic tire; tire–soil interaction; terramechanics; central tire inflation system; contact area; permissible contact pressure.*

Ребров Олексій Юрійович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>;

e-mail: alexrebrov0108@gmail.com

Петренко Олексій Геннадійович – аспірант кафедри автомобіле- та тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4479-8608>;

e-mail: aleksej.petrenko88@gmail.com

Дата першого надходження статті 14.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-33-42>

УДК 62-83

STUDY OF THE INFLUENCE OF NONLINEARITIES ON PARAMETRIC OSCILLATIONS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ НА ПАРАМЕТРИЧНІ КОЛИВАННЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМАХ

Руднєв Є.С., Романченко Ю.А.

In the article The analysis of parametric oscillations in electromechatronic systems and the influence of nonlinearities on them caused by physical properties of the elements and design features of the system.

It has been shown that Real electromechatronic systems are characterized by the presence of various nonlinearities. Factors that render a mechanical system nonlinear include nonlinear forces arising during the operation of such a system and its variable parameters. It has been established that parametric oscillations, caused by periodic or quasi-periodic changes in the system's parameters over time, occupy a special place among the dynamic phenomena occurring in electromechatronic systems.

The article discusses the effect of parametric resonance, which is a manifestation of dynamic instability in a system, where small disturbances can lead to significant changes in the system's motion. Consequently, any random disturbance over a sufficiently long period of time can lead to emergency consequences. Nonlinear factors in a mechanical system with periodically changing parameters manifest themselves primarily in zones of parametric resonance.

The authors present the concept of self-oscillations, which can occur in nonlinear systems in the absence of a periodic disturbing force, and, as an example, consider quasi-harmonic frictional self-oscillations. Suppressing frictional self-oscillations is a crucial engineering challenge, as they complicate the precise stopping of a working element and disrupt the smoothness of its movements.

A unified structural diagram for any type of electromechanical electric drive system, its parameters, and a mathematical model are provided.

The electromechanical system was simulated in the MATLAB/Simulink environment in accordance with the structural diagram with the given parameters.

The processes of development of self-oscillations in the considered circuit at a given speed for three variants of the studied load characteristics are obtained.

The dependences of the velocities of the first and second masses, the elastic force and resistance on the second mass, and the dynamic force on time are presented. It is established that the implementation of computer - integrated adaptive and robust control systems, taking into account the presented studies of nonlinear effects and parametric oscillations, ensures the coordination of the dynamic modes of the electromechatronic system with the requirements of a specific technological process. This reduces the influence of unwanted oscillatory modes and improves the stability and accuracy of actuator control.

Key words: parametric oscillations, electromechatronic systems, nonlinearity, mathematical model, disturbance, self-oscillation, synthesis, computer-integrated control system, adaptive control, robust control.

Introduction. Modern electromechatronic systems are complex dynamic objects combining electrical, mechanical, electronic, and information subsystems. They are widely used in automated production facilities, robotic devices, electric drives, precision positioning systems, and power plants. The increasing level of integration and complexity of the structures of such systems leads to increased demands on the quality of their dynamic characteristics, stability, and operational reliability under variable loads and external disturbances [1, 2].

Real electromechatronic systems are characterized by the presence of various nonlinearities, caused by the physical properties of the elements and the design features of the system.

Factors that render a mechanical system nonlinear include nonlinear forces arising during the operation of such a system and its variable parameters [3].

The nature of nonlinear forces can be different [1]:

1) restorative forces when elastic characteristics deviate from Hooke's law;

2) dissipative phenomena such as «dry» (Coulomb) friction $M_{DF} = -|M_{DF}| \operatorname{sign} \omega$;

3) nonlinear forces associated with the design features of the mechanical system (gaps, limiters, clamps, stops, special couplings), in which the transmitting moment depends on the magnitude of the elastic deformation of the coupling elements – $M_E(\Delta\varphi)$;

4) forces arising in mechanisms with a nonlinear position function, when linearization in the vicinity of the current value of the rotation angle is impossible due to large angular deviations of the driving elements (systems with a clearly variable gear ratio; for example, clutch slip).

These factors have a significant impact on the dynamic behavior of the system and can lead to the emergence of complex oscillatory modes.

Nonlinear characteristics of mechanical systems are often deliberately used to achieve desired dynamic effects (vibration-impact mechanisms). However, nonlinearity often leads to undesirable effects (impact phenomena in gaps, frictional self-oscillations, and others) [4].

Parametric oscillations, caused by periodic or quasi-periodic changes in system parameters over time, occupy a special place among the dynamic phenomena occurring in electromechatronic systems. Such oscillations can arise as a result of modulation of stiffness, mass, inductance, or other parameters dependent on the operating mode or external influences. Parametric resonances can cause a sharp increase in oscillation amplitude, loss of stability, and deterioration of the system's performance [5].

The presence of nonlinearities significantly complicates the analysis of parametric oscillations, as it changes the conditions under which they arise, creating additional instability zones and a variety of motion modes. Nonlinear effects can both limit the growth of oscillation amplitude and contribute to the development of chaotic processes, which negatively impacts control accuracy and the durability of system components. Therefore, the use of linear models is often insufficient to adequately describe the real dynamics of electromechatronic systems.

The objective to analyze and evaluate the influence of nonlinear characteristics of electromechatronic system elements on the conditions for the occurrence, development, and parameters of parametric oscillations, as well as to determine their impact on the dynamic stability and operating modes of the system in order to improve the modeling efficiency and reliable operation of electromechatronic systems.

Research results. There are a significant number of mechanisms with a nonlinear position function P , which relates the output x and input φ coordinates: $x = P(\varphi)$. These include piston pumps and compressors, guillotine shears, and others. In these cases, it becomes necessary to detect, to a first approximation, the distortions arising from drive vibrations.

The initial data for constructing a mathematical model of the system are the equations of motion and dynamic characteristics of the engine:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = M - M_C; \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 \left[1 - \gamma \left(M + T_e \frac{dM}{dt} \right) \right].$$

After linearization in the vicinity of the current phase angle and elementary transformations, we obtain a second-order differential equation with variable coefficients of this type [1, 2]:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + 2n(t) \frac{d\omega}{dt} + K^2(t) \omega = W(t), \quad (2)$$

$$\text{where } 2n(t) = \frac{1}{T_e} + 2\omega_* \frac{J'_*}{J_*};$$

$$K^2(t) = \frac{1}{J_*} \left[\frac{1}{\gamma T_e \omega_*} + \frac{J'_* \omega_*}{T_e} + \frac{3}{2} \omega_*^2 J'' \right]; \quad (3)$$

$$W(t) = -\frac{1}{J_*} \left(\frac{M_C}{T_e} + \frac{dM_C}{dt} + \frac{J'_* \omega_*^2}{2T_e} + \frac{J'' \omega_*^3}{2} \right);$$

$$J' = dJ/d\varphi; \quad J'' = d^2J/d\varphi^2.$$

$K^2(t)$ can be considered as a variable «natural» frequency, and $W(t)$ as a disturbance function.

Asterisks (*) correspond $\varphi = \varphi_* = \omega_* t$ to the average value of angular velocity ω_* in steady-state conditions. This is correct for small unevenness coefficients, typical for many devices.

When $J(\varphi) = \text{const}$ we have $J' = J'' = 0$ the coefficients of equation (2) become constant.

The solution of the homogeneous equation according to (2) is proposed in [1, 2]:

$$\ddot{\omega} + 2n(t)\dot{\omega} + K^2(t)\omega = 0. \quad (4)$$

By changing variables, we move on to a differential equation in which the term containing the first derivative of the coordinate is missing. For this, we use the substitution

$$y = \omega \cdot \exp \left[\int_0^t n(t) dt \right], \quad (5)$$

Then

$$\left. \begin{aligned} \omega &= y \cdot \exp \left[-\int_0^t n(t) dt \right] \\ \dot{\omega} &= (\dot{y} - ny) \exp \left[-\int_0^t n(t) dt \right] \\ \ddot{\omega} &= (n^2 y - 2n\dot{y} - \ddot{y}) \exp \left[-\int_0^t n(t) dt \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

After substituting (6) into (4) we obtain

$$\ddot{y} + p^2(t)y = 0, \quad (7)$$

where $p^2(t) = K^2(t) - n^2(t) - \dot{n}(t)$.

Moreover, in this class of problems p^2/n^2 it differs little from one.

According to the “conditional oscillator” method, the solution is sought in the form [1, 2]

$$y = B(t) \cos \Phi(t). \quad (8)$$

Differentiating (8) twice, we obtain

$$\ddot{y} = (\ddot{B} - B\dot{\Phi}^2) \cos \Phi(t) - (2\dot{B}\dot{\Phi} + B\ddot{\Phi}) \sin \Phi(t). \quad (9)$$

Solution (8) is presented as a product of two unknown functions, which gives the right to connect these functions with one additional condition. If we accept

$$2\dot{B}\dot{\Phi} + B\ddot{\Phi} = 0, \quad (10)$$

then the dependence (9) will look like this

$$\ddot{y} = (\ddot{B} - B\dot{\Phi}^2) \cos \Phi(t). \quad (11)$$

Next, we find the relationship between the functions B , Φ and the «natural» frequency $p(t)$. To do this, it is sufficient to substitute (8) and (11) into (7). From where

$$\Omega^2 - \frac{\ddot{B}}{B} = p^2, \quad (12)$$

where $\Omega = \dot{\Phi}$.

The additional condition (10) is a first-order differential equation with separable variables with respect to B and Ω .

$$\frac{dB}{B} = -\frac{1}{2} \frac{d\Omega}{\Omega}, \quad (13)$$

the solution of which is

$$B = A \sqrt{\frac{\Omega_0}{\Omega(t)}}, \quad (14)$$

where $B(0) = A$; $\Omega(0) = \Omega_0$.

Now equation (3) takes the form

$$y = A \sqrt{\frac{\Omega_0}{\Omega(t)}} \cos \left[\int_0^t \Omega(t) dt + a \right]. \quad (15)$$

Here A and a are determined by the initial conditions. After substituting (14) into (12) and making some transformations, we obtain

$$\ddot{Z} - 0.5\dot{Z}^2 + 2\Omega_*^2 e^{2Z} = 2p^2(t), \quad (16)$$

where $Z = \ln(\Omega/\Omega_*)$, Ω_* is a free parameter with the dimension of frequency.

Differential equation (16) corresponds to a certain oscillatory circuit (oscillator) with a «rigid» nonlinear characteristic. The perturbation is a function proportional to the square of the «natural» frequency. Since the variable Z can only be considered as an analogue of some deformation, such an «oscillator» is called conditional. It is sufficient to have a solution to the conditional oscillator equation (16) for (15) to transform into a calculated dependence determining the solution to the homogeneous equation (7). To obtain a solution to the original equation (4), it is necessary to address the initial variable ω , respectively, as in (5).

$$\begin{aligned}\omega &= A \exp \left[- \int_0^t n(t) dt \sqrt{\frac{\Omega_0}{\Omega}} \cos \left(\int_0^t \Omega(t) dt + a \right) \right] = \\ &= A \exp \left[- \int_0^t n(t) dt - 0,5(Z - Z_0) \right] \cdot \\ &\quad \cdot \cos \left(\Omega_0 \int_0^t e^{Z(t)} dt + a \right),\end{aligned}\quad (17)$$

When $|Z| < 1$ one can use the linearization of the coefficients of equation (16). In this case, the latter takes the form

$$Z + 4p_*^2 Z = 2(p^2 - p_*^2), \quad (18)$$

where $p_* = \Omega_*$ is the average value of the function $p(t)$.

It should be noted that, according to (17), unlimited growth of ω will occur only due to the exponential factor, which in turn can reach infinitely large values at $Z \rightarrow \infty$. Since this effect is caused not by an external force, but by changes in the system's parameters, it is called parametric resonance. Parametric resonance is a manifestation of the dynamic instability of a system, when small disturbances can lead to significant changes in the system's motion. From (17), it follows that at $A = 0$ respectively $\omega = 0$. However, sufficiently small initial conditions, under which $A \neq 0$, can $t \rightarrow \infty$ be obtained $\omega \rightarrow \infty$ through an increasing exponential factor. The practical importance of the concept of dynamic instability follows, firstly, from the fact that unstable motion is uncontrollable, meaning that any random disturbance over a sufficiently long period of time can lead to emergency consequences. Moreover, the dynamic model is far from completely equivalent to the physical original. Deviations caused by these inaccuracies can be viewed as disturbances, which, in the case of instability, will lead to significant distortions of the obtained solution.

The condition of dynamic stability is [1, 2]:

$$\lambda = \int_0^T n(t) dt > 0,5 |\Delta Z|, \quad (19)$$

where ΔZ is the difference between the minima of the function Z , separated by the period T ($T = 2\pi/p_*$); λ is the logarithmic decrement.

In the presence of a pulsation of the function $p^2(t)$ with frequency ω :

$$p^2(t) = p_*^2 (1 - \varepsilon \cos \omega^* t), \quad (20)$$

where ε is the pulsation depth, then using (19), equation (18) can be represented in the following form:

$$\ddot{Z} + 4p_*^2 Z = 2\varepsilon p_*^2 \cos \omega^* t. \quad (21)$$

It is obvious that the «conditional oscillator» resonates at $\omega^* = 2p_*$, which corresponds to the main parametric resonance. Its development in accordance with (21) follows the law [1, 2]:

$$Z = -0,5 p_* t \varepsilon \sin 2p_* t, \quad (22)$$

Where

$$|\Delta Z| = |Z(t_2) - Z(t_1)| = \pi \varepsilon, \quad (23)$$

Where $t_1 = \pi/4 p_*$; $t_2 = t_1 + T$; $T = 2\pi/p_*$.

Substituting (23) into (19), we have:

$$\lambda > 0,5 \pi \varepsilon, \quad (24)$$

which is $\psi = 2\lambda$ equivalent to

$$\psi > \pi \varepsilon. \quad (25)$$

Nonlinear factors in a mechanical system with periodically changing parameters manifest themselves primarily in parametric resonance zones. The critical oscillation frequency, around which a region of dynamic instability forms, now depends on the amplitude level of the oscillations.

$$\omega_{KP}^* = \frac{2}{j} K(A_0, A). \quad (26)$$

Moreover, sufficient conditions (19) and (24) of the dynamic stability of the system are also functions of A_0, A , since the logarithmic decrement depends on the coefficient $n(A_0, A)$ [1, 2]

$$\lambda = \int_0^T n(A, A_0, t) dt.$$

In linear systems, all free oscillations are damped by dissipation. Oscillations in steady-state conditions can persist due to external periodic influences (forces). In nonlinear systems, however, established periodic oscillations can arise even in

the absence of a periodic disturbing force. These are called self-oscillations. In a self-oscillating mechanical system, the action of dissipative forces is compensated by an external energy source controlled by nonlinear feedback loops dependent on the system's oscillations. In all cases, the onset of self-oscillatory conditions is preceded by a zone of dynamic instability.

As an example, let's consider quasi-harmonic frictional self-oscillations. They can be observed during the movement of supports, tables along sliding guides in metal-cutting workbenches, ingots along the hearth of a heating furnace, etc.

A simplified dynamic model of such systems is shown in Fig. 1, a. From element 1 moving at a constant speed, $V_0 > 0$ motion is transmitted through an elastic-dissipative element (C_{12} , ψ_{12}) to link 2, which may have a speed $V_0 > 0$ different from V_0 . A friction force F_C is applied to link 2.

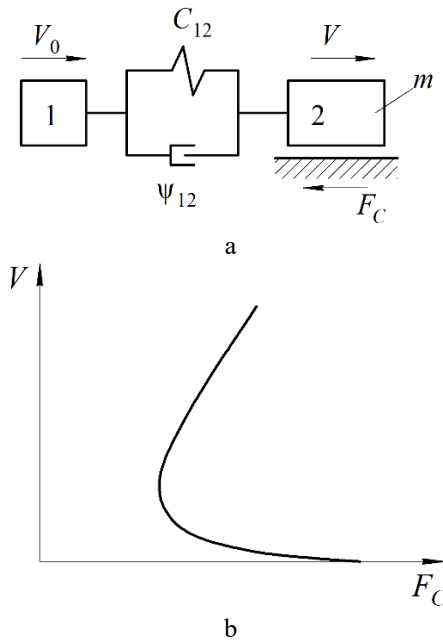


Fig. 1. Dynamic model (a) and dependence of friction force on speed (b) for mechanisms with «negative» viscous friction [1]

The differential equation under the conditions $V > 0$ has the form:

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} + \beta_{12} \frac{dq}{dt} + C_{12} q = -F_C(V) \quad (27)$$

where m is the mass of element 2, kg;

C_{12} – coefficient of rigidity of the kinematic connection between 1 and 2, N/m;

β_{12} – coefficient of equivalent linear resistance (viscous friction, reflected by the dissipation coefficient ψ_{12}), Ns/m;

q – deformation of the elastic-dissipative connection (drive), m.

Dividing both parts (27) by m , we have

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2n_0 \frac{dq}{dt} + K_0^2 q = -\frac{1}{m} F_C(V), \quad (28)$$

where $2n_0 = \beta_{12}/m$; $K_0^2 = C_{12}/m$.

The coefficient n_0 can be considered as the coefficient of harmonic linearization of the dissipative forces of the drive, corresponding to the dissipation coefficient ψ_{12} .

The sliding speed consists of two components:

V_0 – speed set by the drive;

$\frac{dq}{dt}$ – the speed caused by vibrations.

Let us expand $F_C(V)$, which determines the friction force, into a Taylor series in powers of q [1, 2].

$$F_C(V_0 + \dot{q}) \cong F_{C0} + h_1 \dot{q} + h_2 \dot{q}^2 + h_3 \dot{q}^3, \quad (29)$$

where $F_{C0} = F(V_0)$; $h_i = \frac{1}{i!} \frac{d^i F_C}{dV^i}(V_0)$, $i = 1, 2, 3$.

To determine the coefficients h_i , the static characteristic of friction is used (Fig. 1, b), taking into account (29), the differential equation (28) based on the harmonic linearization method can be represented as follows:

$$\psi = 2n_0 \frac{dq}{dt} + K^2 q + \frac{1}{m} \left[F_0 + h_1 \frac{dq}{dt} + h_2 \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 + h_3 \left(\frac{dq}{dt} \right)^3 \right] \quad (30)$$

After transformations, we have

$$2n_0 + \frac{1}{m} \left(h_1 + \frac{3}{4} h_3 A^2 \Omega^2 \right) = 0. \quad (31)$$

Since the harmonic linearization coefficients are functions of three variables A , A_0 , Ω , then, taking into account that $\Omega = K_0$ the amplitude of oscillations can be given as follows:

$$A = 2 \cdot \sqrt{-\frac{2n_0 m + h_1}{3h_3 K_0^2}}. \quad (32)$$

The stability condition of this regime is determined by the inequality [1, 2]

$$\left[\frac{\partial n(A)}{\partial A} \right]_{A=A_i} > 0. \quad (33)$$

Since the left side of equation (31) is proportional to $n(A)$, then differentiating it with respect to A and substituting it into (33), we obtain

$$\frac{3}{2m} Ah_3 > 0,$$

from which it is clear that $h_3 > 0$.

To obtain real values of A in (32) it is necessary to require that $h_1 + 2mn_0 < 0$, which can be achieved for $h_1 < 0$ and $|h_1| > 2mn_0$.

Apparently, the first of these conditions corresponds to a section $F_C(V)$ with a negative slope, and the second to a violation of the conditions of dynamic stability of the system at low oscillation speeds (dq/dt).

In addition to the considered frictional self-oscillations of the quasi-harmonic type, relaxation self-oscillations can be excited in the system, accompanied by stops in each oscillatory cycle.

Suppression of frictional self-oscillations is a very important engineering task, since they make it difficult to precisely stop the working element and disrupt the smoothness of its movements [6, 7].

The structure of the mathematical model in the MATLAB/Simulink package is built on the basis of the model of a two-mass electromechanical system (Fig. 2) with the addition of a structure for implementing resistance on the second mass, depending on the speed and the «sticking» effect [1, 2]. The parameters of the model presented in Fig. 3 are reduced to translational motion for ease of consideration. Consequently, we have two masses (m_1, m_2), connected by a spring with stiffness C_{12} without internal losses, which move with velocities V_1 and V_2 , respectively. The driving force of the first mass F_1 is formed by a structure reflecting the electromechanical properties of the engine with the stiffness of the mechanical characteristic γ (the electromagnetic time constant is assumed to be zero). The output of the **Integrator2** block is the speed of the second mass. The logic for implementing the «sticking» and «breakdown» effects is discussed in detail in [8]. Thus, the **Integrator2** block has additional inputs (for setting the initial conditions and the impulse for establishing these conditions) and an information output (at the top of the block), which has an output signal V_2 . At the output of the **Switch** block, we have the drag force F_C , which is either equal to the

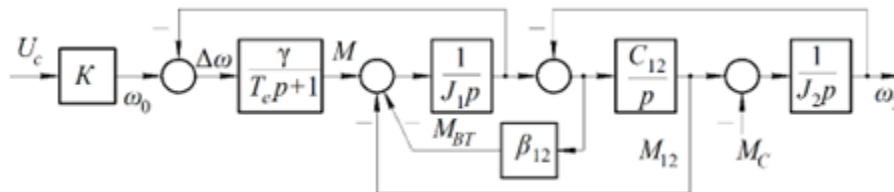


Fig. 2. Unified structural diagram of a two-mass electromechanical system [1, 2]

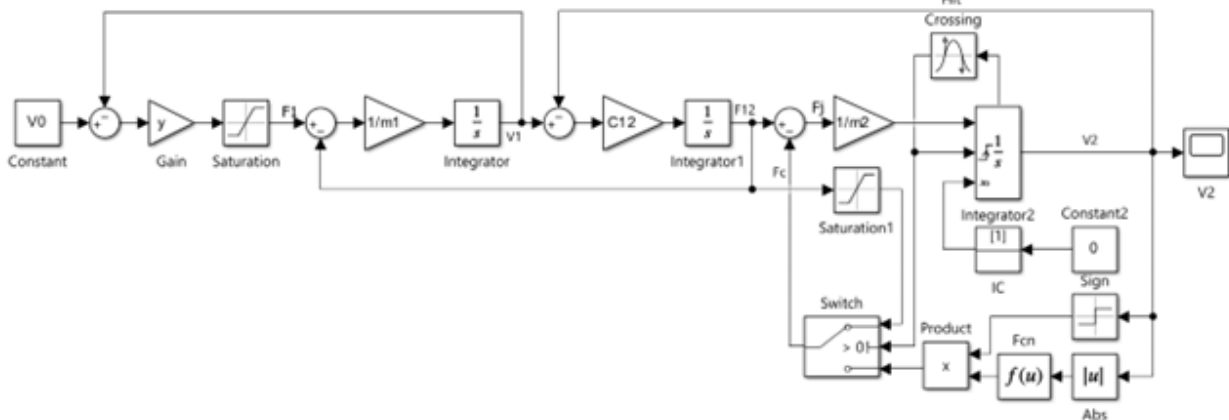


Fig. 3. Mathematical model of a mechanical system for studying frictional self-oscillations [1]

driving force (in the case when the second mass is stationary, and the driving force F_{12} is less than the shear force), or as a function of the velocity V_2 when body 2 is moving. The switching signal is the signal from the zero crossing block (**Hit Crossing**). The switching level of the **Switch** block is set to 0.5. The «shear» force of body 2 (F_S) is specified in the **Saturation1** block. The dependence of the drag force on the velocity $F_C(V_2)$ is specified analytically in the **Fcn** block

Consequently, when applying a driving force F_{12} at $V_2 = 0$, we will have a signal equal to F_{12} at the output of the **Switch** block, while the dynamic force F_j (at the output of the **Sum** block) will be zero, and body 2 will be motionless. When the force F_{12} exceeds the value of the shear force F_S , at the output of the **Saturation1** and **Switch** blocks we have a force $F_S < F_{12}$, and at the output **Sum** a positive value of the dynamic force, under the action of which body 2 will begin to move. When body 2 shifts, a signal will appear at the output of the **Hit Crossing** block, which will reverse the signal from the **Product** block to the **Switch** output – the resistance force will be formed according to the dependence specified in the **Fcn** block. Similar processes occur when body 2 comes to a stop.

The model was used to study an electromechanical system with the following parameters:

$$m_1 = 0,1 \cdot 10^8 \text{ kg}; m_2 = 0,5 \cdot 10^8 \text{ kg};$$

$$C_{12} = 1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}; \gamma = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Ns/m}.$$

$$\text{Shear force } F_S = 3 \cdot 10^6 \text{ N}.$$

The processes of development of self-oscillations in the considered scheme were obtained at a given speed of 1 mm/s for each of the load characteristics (Fig. 4). Fig. 5 shows the velocities of the first and second masses, the elastic force (F_{12}) and the resistance force on the second mass (F_{C2}) and the dynamic force F_j .

The results of this study on the influence of nonlinearities on parametric oscillations of electromechatronic systems can be directly applied in the synthesis and tuning of adaptive and robust control systems. The identified patterns of occurrence of parametric instability zones and the conditions for the development of self-oscillatory modes provide a theoretical basis for the development of control laws aimed at actively limiting oscillation amplitude and preventing the loss of dynamic stability.

Within the framework of adaptive control, modeling results can be used to develop algorithms for automatically adjusting controller parameters, taking into account the current system state, the level of oscillations, and changes in mechanical characteristics, particularly friction parameters and the stiffness of elastic connections. This improves control accuracy and reduces the system's sensitivity to parametric disturbances.

The use of robust control based on the research presented in this article ensures the continued operability of electromechatronic systems under parameter uncertainty and the presence of external disturbances. Taking into account nonlinear effects and parametric oscillations during the synthesis of robust controllers allows for an expansion of the dynamic stability range and increased system reliability in boundary operating conditions.

Thus, the obtained results complement and develop the provisions presented in the works of the authors [9-10], and can be used as a methodological basis for the synthesis of computer-integrated adaptive and robust control systems for electromechatronic objects with increased requirements for dynamic stability, accuracy and operational reliability.

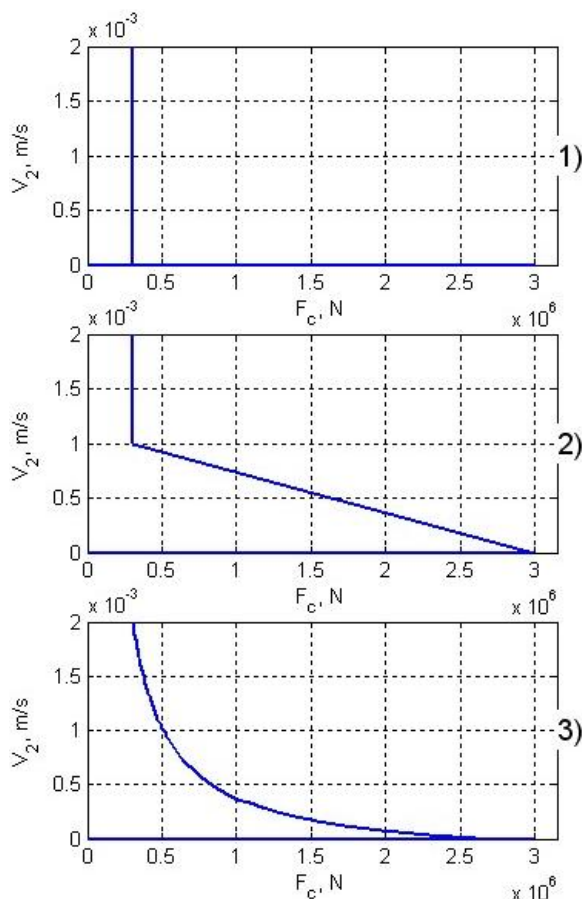


Fig. 4. Forms of the studied load characteristics

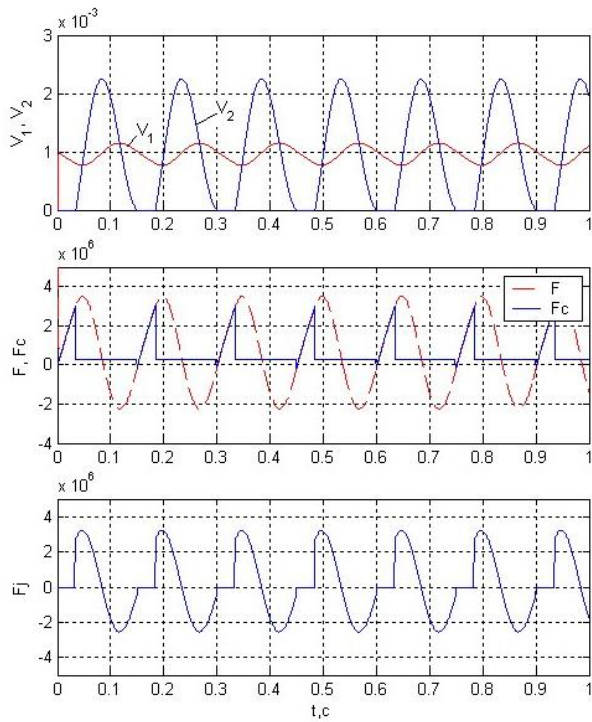


Fig. 5, a. The process of development of self-oscillations at the moment according to Fig. 4 (1)

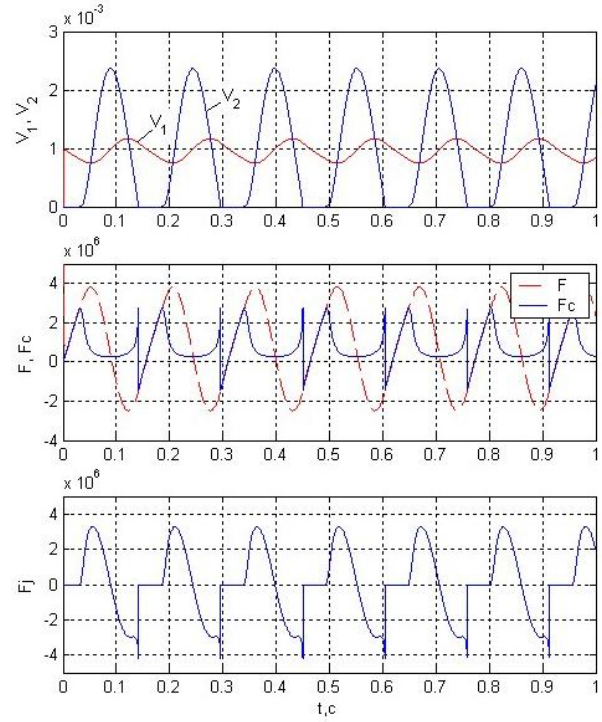


Fig. 5, c. The process of development of self-oscillations at the moment according to Fig. 4, (3)

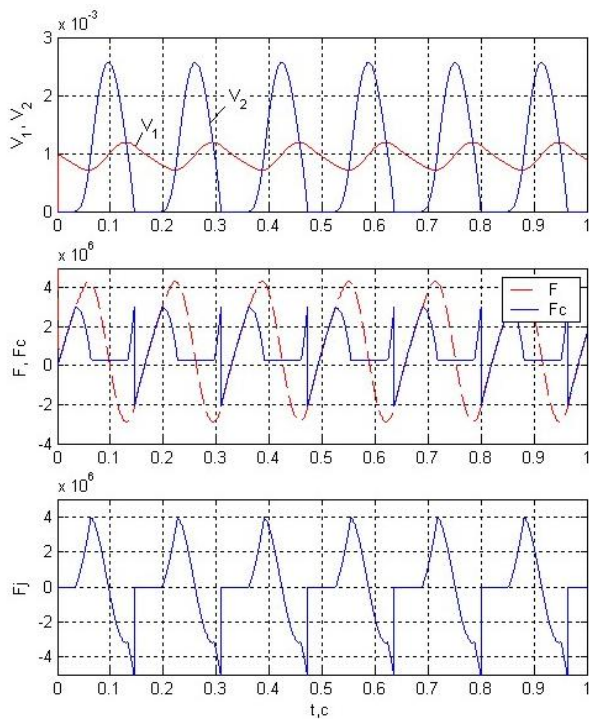


Fig. 5, b. The process of development of self-oscillations at the moment according to Fig. 4 (2)

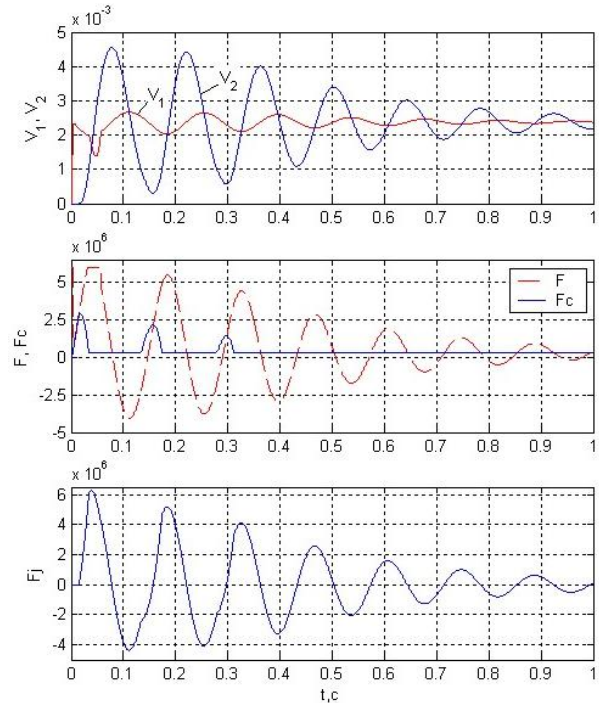


Fig. 5, d. Limit mode of breakdown of self-oscillations at $V_1 = 0.024$ m/s and the moment of resistance according to Fig. 4, (2)

The implementation of computer-integrated adaptive and robust control systems based on the research into nonlinear effects and parametric oscillations presented in this article ensures the alignment of the dynamic modes of an electromechatronic system with the requirements of a specific technological process. This reduces the impact of unwanted oscillatory modes, improves the stability and control accuracy of actuators, and leads to process optimization, reduced energy losses, and increased overall efficiency of electromechatronic systems.

Conclusions. This article examines the influence of nonlinear characteristics of electromechatronic system elements on parametric oscillations and their key dynamic parameters. The analysis revealed that the presence of nonlinearities (magnetic circuit saturation, backlash and dry friction, elastic nonlinear characteristics, current and voltage limitations) significantly alters the conditions for the occurrence and development of parametric resonance.

It has been established that parametric oscillations are one of the most dangerous forms of dynamic instability, as they develop due to periodic or quasi-periodic changes in system parameters, rather than as a result of an external disturbance. Under such conditions, even small initial disturbances or model inaccuracies can lead to an exponential increase in oscillation amplitude and a loss of system control.

Using the conditional oscillator method, analytical relationships have been derived that allow us to describe the development of parametric resonance and formulate sufficient conditions for dynamic stability, taking into account nonlinear effects. It has been shown that nonlinearity can either expand or contract the system's instability regions, depending on their type and intensity. Incorporating nonlinear factors into mathematical models allows for more accurate predictions of the actual operating modes of electromechatronic systems, particularly under conditions of variable power supply or load parameters.

The processes of development of self-oscillations in the circuit at a given speed of 1 mm/s for three types of load characteristics were obtained, which made it possible to obtain the dependences of the speeds of the first and second masses, the elastic force and the resistance force on the second mass and the dynamic force on time.

Special attention is given to the analysis of frictional self-oscillations arising in systems with negative effective viscous friction. It is shown that such oscillations form after passing through a zone of dynamic instability and can degrade positioning

accuracy, smoothness of motion, and the operational reliability of electromechatronic systems. The resulting analytical conditions for the existence and stability of self-oscillatory modes are consistent with the physical nature of sliding friction processes.

A mathematical model of a two-mass electromechanical system, implemented in MATLAB/Simulink, allowed us to study the development of self-oscillations for various load characteristics. The modeling results confirmed the significant influence of the shape of the drag force characteristic on the dynamic behavior of the system and demonstrated the possibility of both persistent self-oscillations and their ultimate breakdown modes.

The obtained results confirm the need to use nonlinear models in the design and modernization of control systems, as simplified linear approaches can lead to underestimation of the risk of undesirable resonant modes. The practical significance of the study lies in the possibility of targeted selection of system parameters and control laws to improve dynamic stability, reliability, and operational efficiency.

The authors' subsequent research will focus on developing computer-integrated control systems for electromechatronic systems capable of ensuring stable operation under nonlinear conditions, parametric oscillations, and variable load conditions. Integrating mathematical models of nonlinear dynamics with real-time hardware and software controls will improve the accuracy of detecting and preventing hazardous resonant modes.

A promising approach is the use of adaptive and robust control, which ensures the system's dynamic stability under parametric uncertainty, external disturbances, and changes in the characteristics of the mechanical and electromagnetic subsystems of an electromechanical system. The combination of adaptive algorithms and robust methods will allow automatic reconfiguration of control laws and limit the development of parametric and frictional self-oscillations.

References

1. Shevchenko I.S., Morozov D.I. Dynamics of complex electromechanical systems: navchal'nyj posibnyk. Alchevs'k: DonDTU. 2008. 171 p.
2. Rudniev, Y., Romanchenko, J., Romanchenko, O. Study of Impact Phenomenon in Mechatronic Systems Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022, p. 1-6.

3. Tamm C., Perfetto S. Design and Optimization of Mechatronic Systems Using a Holistic and Parametric Simulation Approach IFAC-PapersOnLine, Vol.52, 271-276p.
4. Kundur P. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994 Technology & Engineering - 1176 p.
5. Rueda-Medina A. C. Fiorotti R., Oliveira Rocha H.R., Simonetti D. Novel sensitivity models for electromechanical oscillations analysis in active distribution networks considering electrical vehicles optimal charging. Renewable Energy 232(4), 2024.
6. Zuo G., Wong L. A review of recent active vibration control techniques, arXiv, 2016.
7. Baltas G.N., Lai N.B., Tarraso A., Marin L., Blaabjerg F. and Rodriguez P. AI-Based Damping of Electromechanical Oscillations by Using Grid-Connected Converter, Frontiers in Energy Research, Volume 9, 2021.
8. Berizzi A., Bosisio A., Simone R., Vicario A. Real-time identification of electromechanical oscillations through Dynamic Mode Decomposition, IET Research / related works, 2020.
9. Rudniew, Y., Romanchenko, J., Morneva, M. Investigation of Oscillatory Processes in Mechatronic Systems with a Robust H_∞ -controller Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System Mees 2023Open source preview, 2023.
10. Rudniew Ye.S., Gritsyuk V.Yu., Scherbak V.V. Synthesis And Analysis Of Sensitivity Of The Robust Control System Of A Synchronous Electric Drive. Collection of Scientific Papers of DonSTU 2018. 1 (47) 101-108 (8).

Руднєв Є. С., Романченко Ю. А. Дослідження впливу нелінійностей на параметричні коливання в електромехатронних системах.

В статті представлений аналіз параметричних коливань в електромехатронних системах та вплив на них нелінійностей, обумовлених фізичними властивостями елементів і конструктивними особливостями системи.

Показано, що реальні електромехатронні системи характеризуються наявністю різноманітних нелінійностей. Факторами, що роблять механічну систему нелінійною, можуть бути нелінійні сили, які виникають при роботі такої системи, та її перемінні параметри. Встановлено, що особливе місце серед динамічних явищ, які виникають в електромехатронних системах, займають параметричні коливання, зумовлені періодичною або квазіперіодичною зміною параметрів системи в часі.

В статті розглянуто ефект параметричного резонансу, що є проявом динамічної нестійкості системи, коли малі збурення можуть призвести до суттєвих змін руху системи. Отже будь яке

випадкове збурення на достатньо великому відрізку часу може призвести до аварійних наслідків. Нелінійні фактори в механічній системі з параметрами, що періодично змінюються, проявляються, в основному, в зонах параметричних резонансів.

Авторами подано поняття автоколивань, що можуть виникати у нелінійних системах при відсутності періодичної збурюючої сили та, як приклад, розглянуто квазігармонічні фрикційні автоколивання. Подавлення фрикційних автоколивань є дуже важливою інженерною задачею, оскільки вони затрудняють точну зупинку робочого органу та порушують плавність його переміщень.

Наведено уніфіковану структурну схему для будь-якого типу електромеханічної системи електропривода, її параметри, а також математичну модель.

Виконано моделювання електромеханічної системи в середовищі MATLAB/Simulink відповідно до структурної схеми із заданими параметрами.

Отримано процеси розвитку автоколивань у розглянутій схемі при заданій швидкості для трьох варіантів досліджених характеристик навантаження.

Наведено залежності швидкостей першої та другої мас, пружної сили та сили опору на другій масі і динамічної сили від часу. Встановлено, що реалізація комп'ютерно-інтегрованих адаптивних і робастних систем керування з урахуванням наведених досліджень нелінійних ефектів і параметричних коливань забезпечує узгодження динамічних режимів електромехатронної системи з вимогами конкретного технологічного процесу. Це дозволяє зменшити вплив небажаних коливальних режимів, підвищити стабільність і точність керування виконавчими механізмами.

Ключові слова: параметричні коливання, електромехатронні системи, нелінійність, математична модель, збурення, автоколивання, синтез, комп'ютерно-інтегрована система керування, адаптивне керування, робастне керування.

Руднєв Є.С. – д.т.н., доц., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ORCID ID: 0000-0002-4236-8407

rudnev_es@snu.edu.ua

Романченко Ю.А. – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ORCID ID: 0000-0001-6579-6474

romanchenko_ja@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 16.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-43-47>

УДК 004.92

НЕОБХІДНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГРАФІЦІ

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Дуришев О.А.

THE NEED FOR 3D MODELING IN ENGINEERING GRAPHICS

Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Duryshch O.A.

При проектуванні сучасних технічних систем і в технологічних процесах широко використовуються різні автоматизовані системи. Вищі навчальні заклади (ВНЗ) повинні готувати фахівців, які можуть ефективно застосовувати програмні продукти в професійній діяльності. Студентам необхідно вивчати основи інженерної графіки та комп'ютерне 3D-моделювання. Отримані знання необхідні майбутнім фахівцям для їх подальшої професійної діяльності. Для набуття навичок у моделюванні найбільш розвиненим програмним засобом є AutoCAD — універсальна графічна система проектування. Створюючи моделі будь-якої складності в просторі за допомогою цього графічного редактора, користувач зможе побачити їх взаємне розташування, оцінити відстань між ними. Модель можна вільно переміщати в просторі, переглядаючи безліч варіантів. Можливість управління точкою зору дозволяє зручно вибрати вид на тривимірну модель, яка розробляється. Зумування, панорування в режимі реального часу з можливістю вільного повороту камери навколо моделі надають можливість швидкого перегляду об'єктів з будь-якої точки зору. У даній статті розглядаються методи використання графічного редактора AutoCad для створення тривимірних об'єктів, а також можливості тривимірного моделювання в графічному редакторі AutoCad для оптимізації навчального процесу бакалаврів технічних спеціальностей та аналізуються оптимальні способи створення креслеників. Також наведено приклади вибору найоптимальнішого варіанту створення тривимірної моделі. Традиційний спосіб створення кресленка об'ємної моделі складається з виконання двовимірних видів цієї моделі. При створенні ж плоского кресленка є ймовірність помилки при виконанні проекцій, так як вони створюються одна від одної незалежно і

складаються з декількох зображень. За плоским креслеником досить складно уявити предмет у просторі. В даний час сучасні програмні графічні редактори спрямовані на створення тривимірних моделей, що дозволяють створювати реалістичні моделі і на їх основі отримувати двовимірні проекції. Метод тривимірного моделювання дозволяє створювати комплексний кресленик з будь-якою кількістю зображень на основі тривимірної моделі. Існують способи створення на основі тривимірної моделі двовимірних плоских креслеників і можливість редагування вже готових проектів, вставлених з простору моделі в простір аркуша. Такий спосіб дозволяє нам використовувати засоби швидкого створення системи з 3–4 пов'язаних видів для тривимірної моделі AutoCad.

Ключові слова: модель, моделювання, команди, комплексний кресленик, комп'ютерна графіка, AutoCad.

Вступ. Сучасний рівень розвитку техніки накладає особливі вимоги на підготовку інженерів технічних спеціальностей. Інженер повинен знати наукові та практичні напрацювання у своїй професійній галузі. Крім того, йому необхідно мати повне уявлення про перспективні ідеї та наукові напрямки, пов'язані з його діяльністю.

При підготовці випускників необхідно враховувати, що підприємства-замовники все частіше вимагають знання основ 3D САПР [1]. Це означає, що в навчальному процесі необхідно приділяти все більшу увагу САПР. Порівнюючи ці тенденції з організацією навчального процесу університетів США та Європи [2], можна дійти

висновку, що частка комп'ютерної графіки в навчальному процесі повинна зростати.

Разом з тим при підготовці інженерів не можна недооцінювати роль класичної освіти. Вивчення інженерної графіки – це знайомство з геометричним моделюванням. Оскільки моделювання – це інструмент роботи з інформацією, то, вивчаючи курс інженерної графіки, студенти знайомляться з методами обробки інформації.

При моделюванні об'єкта, технічної системи або технологічного процесу виключаються з розгляду несуттєві для цієї моделі властивості або ознаки. Наприклад, схожа задача виникає при отриманні геометричної інформації про тривимірний об'єкт на основі інформації фотографічного зображення або ескізу. При цьому можна сказати, що в n -вимірному просторі параметрів деякого об'єкта, системи або процесу деякі параметри недоступні для вимірювання або несуттєві для цієї моделі. Тому виникає необхідність перетворення n -вимірного простору параметрів деякого об'єкта, системи або процесу в простір з іншою розмірністю. При геометричному моделюванні в інженерній графіці таке перетворення виконується операцією проектування.

Інженерна графіка є першою з дисциплін, що вивчаються у вищій школі, при вирішенні завдань якої студенти застосовують на практиці основи моделювання. Вони вчаться замінювати недоступні властивості або ознаки об'єкта іншими. При цьому вони отримують можливість досліджувати і працювати з недоступними спочатку властивостями або ознаками об'єкта через модель. Інженерна графіка дозволяє аналізувати складні взаємозв'язки в навколишньому світі. Тому можна сказати, що геометричне моделювання описує навколишню дійсність через геометричні образи.

Комп'ютерне тривимірне моделювання – це один із варіантів геометричного моделювання, який знайшов широке застосування на практиці. Реалізована задача на комп'ютері у вигляді 3D-моделі математично значно складніша і громіздкіша, ніж при класичному вирішенні методами інженерної графіки. Однак значний резерв обчислювальних ресурсів сучасної комп'ютерної техніки дозволяє більшу частину рутинних обчислень перекласти на комп'ютерний процесор. Це дозволяє звільнити людину від монотонної праці і дає можливість сконцентрувати увагу саме на сутності задачі, що вирішується. Тому істотно знижується

кількість помилок. Особливості реалізації геометричних моделей на комп'ютері дозволяють значно легше виправляти знайдені в процесі роботи помилки, ніж при класичній реалізації моделей методами інженерної графіки.

Крім того, комп'ютерна техніка, при мінімальних витратах часу і ресурсів, дозволяє копіювати і масово тиражувати результати виконаної роботи. Допускається вносити зміни в розроблені моделі і зберігати їх окремими модулями. Все це в сукупності призвело до розробки бібліотек типових моделей, які містять як окремі конструктивні елементи, так і складанні одиниці.

Слід зазначити, що традиційний спосіб моделювання, а саме створення кресленика об'ємної моделі, складається з виконання двовимірних видів цієї моделі. При створенні плоского кресленика існує ймовірність помилки при виконанні проєкцій, оскільки вони створюються незалежно одна від одної і складаються з декількох зображень. За плоским кресленням досить складно уявити предмет у просторі. В даний час сучасні програмні графічні редактори спрямовані на створення тривимірних моделей, що дозволяють створювати реалістичні моделі і на їх основі отримувати двовимірні проєкції. Графічний редактор AutoCad дозволяє створювати тривимірні об'єкти на основі стандартних команд, у вигляді циліндра, конуса, ящика, тора тощо, при редагуванні яких можна отримувати потрібні форми.

Метод тривимірного моделювання дозволяє створювати комплексний кресленик з будь-якою кількістю зображень на основі тривимірної моделі [1–5].

Мета дослідження. Необхідно розглянути методи використання графічного редактора AutoCad для створення тривимірних об'єктів. З огляду на початкову підготовку студентів, знання інженерної графіки, вміння її застосовувати на практиці, тим самим забезпечуючи швидку роботу, гнучкість і адаптивність до різних методів моделювання, розвинути мотивацію до самостійної та пізнавальної діяльності студента стає реальним.

Викладення основного матеріалу. Для побудови тривимірних об'єктів ми використовуємо графічний редактор AutoCad. AutoCad підтримує три способи побудови тривимірних об'єктів: твердотільні, каркасні та поверхневі. Кожен з них має свої особливості. Для кожного типу моделей існує своя палітра

команд малювання та редагування. Оскільки існує кілька видів моделювання та редагування, не варто їх змішувати. Рационально використовувати якийсь один спосіб. Створення тривимірних моделей може здійснюватися в наборі форм моделі з графічних примітивів, таких як циліндри, конуси, ящики, сфери, тори тощо, та застосуванні команд редагування, таких як віднімання, об'єднання та перетин. Також є й альтернативні команди для створення моделей – це «обертання» і «видавлювання».

Результати. На рис. 1 показано застосування команд «обертання» і «видавлювання». Застосування цих команд значно прискорює створення твердотільних моделей. Для цього необхідно створити профіль моделі. Але потрібно врахувати, що створювати плоский профіль необхідно тільки командою, яка називається «полілінія». Ця команда дозволяє нам створити замкнутий контур, з якого можна отримати об'ємну деталь. Також слід дотримуватися відсутності перетинів ліній контуру або профілю. При наявності таких перетинів команда видасть збій. Потім креслимо вісь обертання і вибираємо команду «обертання» для створення моделі:

- 1) Вибираємо об'єкт для обертання.
- 2) Вибираємо вісь обертання і для отримання повної моделі вибираємо кут обертання 360.

- 3) Отримавши тривимірну модель корпусу, нам потрібно в цій моделі зробити чотири отвори. Для цього скористаємося примітивом циліндр. Побудуємо його так, щоб він перетинав нашу модель в певному місці. Далі командою «масив» (вибираємо круговий масив), отримуємо чотири потрібні нам циліндри. Використовуючи команду «віднімання», отримуємо отвори. Для цього вибираємо саму модель, натискаємо «Enter», потім вибираємо циліндри, натискаємо «Enter».

- 4) Отримуємо результат (рис. 1).

Розглянувши приклад побудови тривимірної моделі, слід зазначити, що створена модель дає повне уявлення про її геометричну форму (рис. 2). Наступним етапом буде оформлення комплексного кресленника за тривимірною моделлю. Для цього завантажуюмо вже готовий формат А3 і, використовуючи вкладку «лист» у стрічці, вибираємо команду «створення базової моделі з простору моделі». На основі цього формуються всі інші види кресленника. За допомогою проекційного зв'язку будуємо три види і, за необхідності, додаємо четвертий (ізометричний) вид.

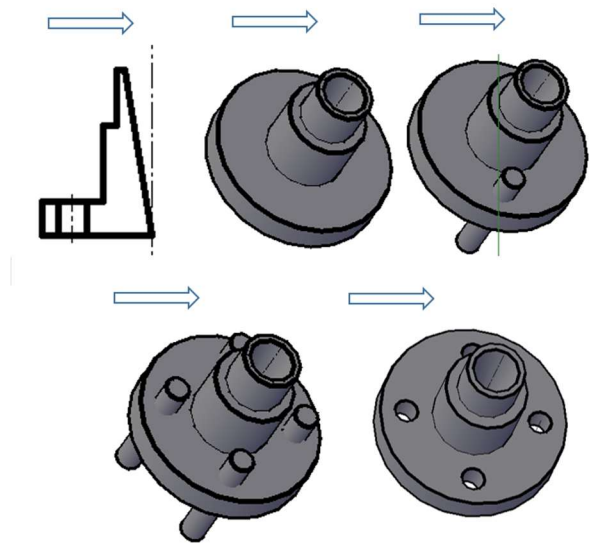


Рис. 1. Побудова моделі із застосуванням команди «обертання»

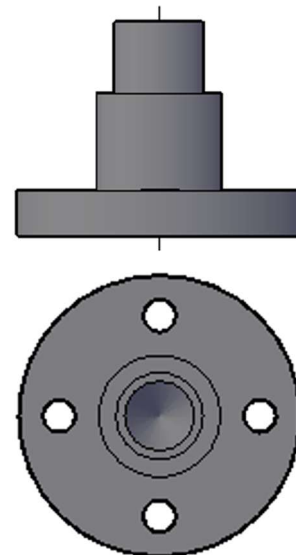


Рис. 2. Побудова за базовою моделлю необхідних видів

Після побудови необхідних видів переходимо до подальшого оформлення кресленника. Отримані види відображають всі видимі і невидимі лінії і вимагають редагування. Для цього вибираємо вид на кресленнику і використовуємо команду «редагувати вид», тут ми можемо змінити масштаб, приховати невидимі лінії, тонувати з видимими лініями тощо. Проекції без редагування показані на рис. 3. Результат редагування показаний на рис. 4.

Основним і найбільшим плюсом даного способу є те, що механізм зміни будь-якого елемента в просторі моделі на об'єкті, тягне за собою автоматичне перетворення всіх видів на кресленнику. Цей спосіб показаний на рис. 5.

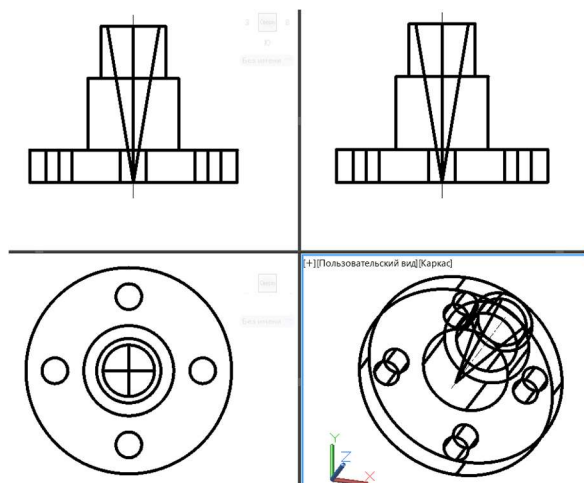


Рис. 3. Проекції без редагування

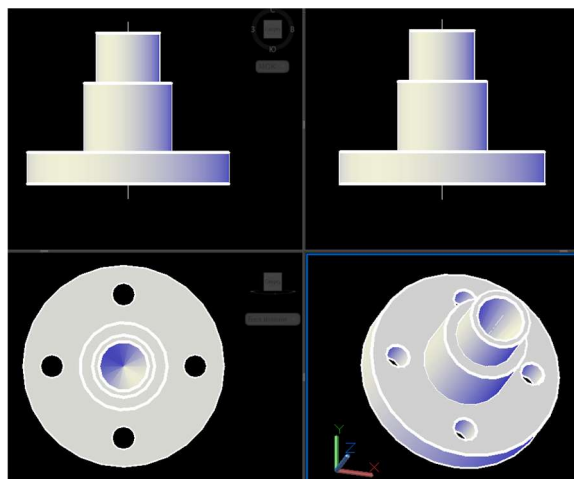


Рис. 4. Результат редагування

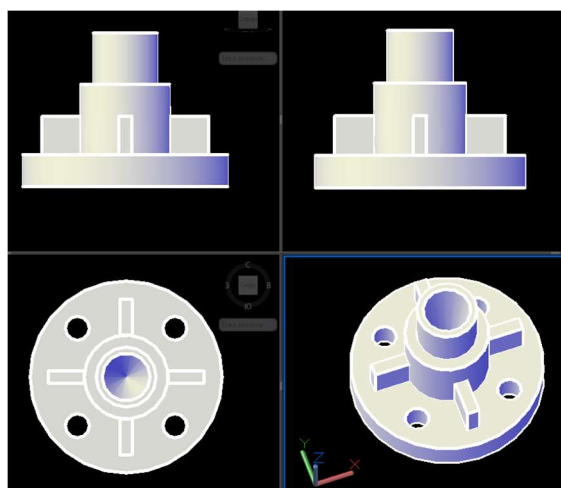


Рис. 5. Автоматичне перетворення видів

Висновки. Досліджуючи та аналізуючи способи і варіанти команд, які використовуються при створенні тривимірних моделей і плоских креслеників, приходимо до висновку, що вибираючи найпростіший і

найшвидший варіант моделювання, в результаті отримуємо оптимізацію навчального процесу. Виконуючи індивідуальне завдання, у студентів з'являється можливість вносити поправки в уже готовий плоский, комплексний кресленик.

На стадії проектування, працюючи з тривимірною моделлю, вносячи поправки і отримуючи зміни в автоматичному режимі на видових проекціях, ми отримуємо:

- 1) економію часу на виправлення помилок;
- 2) можливість використовувати кількох варіантів моделювання;
- 3) створювати необмежену кількість видів з однієї тривимірної моделі.

Все це означає, що класичні способи створення геометричних моделей методами інженерної графіки мають практичне значення. На ринку праці найбільш затребувані фахівці, які володіють системними знаннями у своїй професійній галузі. 3D-моделювання ґрунтується на класичних методах інженерної графіки, тому базові знання того ж проекційного креслення є «будівельними лісами» для подальшої успішної роботи з комп'ютерними моделями. Як після будівництва будинку прибираються будівельні ліси, так і базовий курс інженерної графіки в професійній діяльності може безпосередньо і не використовуватися, але невидимо є її фундаментом.

Література

1. Сасенко С. Ю., Нечипоренко І. В. Основи САПР : навч. посібник. Харків : ХДУХТ, 2017. 120 с.
2. Барандич К. С., Подолян О. О., Гладський М. М. Системи автоматизованого проектування. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 97 с.
3. Бойко А. П. Комп'ютерне моделювання в середовищі AUTOCAD. Частина 1. Геометричне та проекційне креслення : навч. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. 116 с.
4. Проектування тривимірних об'єктів засобами AutoCAD-2008: Навчальний посібник. К: ПІДО НУХТ, 2010. 64 с.
5. Шмиг Р. А., Боярчук В. М., Добрянський І. М., Барабаш В. М. Інженерна та комп'ютерна

графіка : підручник. Львів : Український бестселер, 2012. 600 с.

References

1. Saienko S. Yu., Nechyporenko I. V. Osnovy SAPR : navch. posibnyk. Kharkiv : KhDUKhT, 2017. 120 s.
2. Barandych K. S., Podolian O. O., Hlads-kyi M. M. Systemy avtomatyzovanoho proiektu-vannia. Konspekt lektsii [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia здобувачів ступеня бакалавра за освітньої програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва прядив» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. 97 s.
3. Boiko A. P. Комп'ютерне моделювання в середовищі AUTOCAD. Частина 1. Геометричні та проєкційні креслення : навч. посіб. Myko-laiv : Vyd-vo ChNU im. Petra Mohyly, 2017. 116 s.
4. Proektuvannia tryvymirnykh ob'ektiv za-sobamy AutoCAD-2008: Navchalnyi posibnyk. K: IPDO NUKhT, 2010. 64 s.
5. Shmyh R. A., Boiarchuk V. M., Dobrianskyi I. M., Barabash V. M. Inzhenerna ta kompiuterna hrafika : pidruchnyk. Lviv : Ukrainnyi bestse-ler, 2012. 600 s.

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Duryshch O. A. The need for 3D modeling in engineering graphics.

Various automated systems are widely used in the design of modern technical systems and in technological processes. Higher education institutions (HEIs) must train specialists who can effectively apply software products in their professional activities. Students need to learn the basics of engineering graphics and computer 3D modeling. The knowledge gained is necessary for future specialists in their further professional activities. AutoCAD, a universal graphic design system, is the most advanced software tool for acquiring modeling skills. By creating models of any complexity in space using this graphic editor, users can see their relative positions and estimate the distance between them. The model can be freely moved around in space, viewing multiple options. The ability to control the viewpoint allows you to conveniently select the view of the three-dimensional model being developed. Zooming and panning in real time with the ability to freely rotate the camera around the model allows you to quickly view objects from any angle. Zooming and panning in real time with the ability to freely rotate the camera around the model allows you to quickly view objects from any angle. This article discusses methods of using the AutoCad graphics editor

to create three-dimensional objects, as well as the possibilities of three-dimensional modeling in the AutoCad graphics editor to optimize the educational process for bachelor's degrees in technical specialties, and analyzes the optimal methods for creating drawings. Examples of choosing the most optimal option for creating a three-dimensional model are also given. The traditional method of creating a drawing of a three-dimensional model consists of creating two-dimensional views of this model. When creating a flat drawing, there is a possibility of error when performing projections, since they are created independently of each other and consist of several images. It is quite difficult to imagine an object in space using a flat drawing. Currently, modern software graphic editors are aimed at creating three-dimensional models that allow you to create realistic models and obtain two-dimensional projections based on them. The three-dimensional modeling method allows you to create a comprehensive drawing with any number of images based on a three-dimensional model. There are ways to create two-dimensional flat drawings based on a three-dimensional model and the ability to edit ready-made projects inserted from the model space into the sheet space. This method allows us to use tools for quickly creating a system of 3–4 related types for a three-dimensional AutoCad model.

Keywords: model, modeling, commands, complex drawing, computer graphics, AutoCad.

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, <https://orcid.org/0000-0001-8447-0103>, karp224@gmail.com

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземної філології та перекладу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, <https://orcid.org/0000-0002-5327-7674>, nat.davidenko11@gmail.com

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, <https://orcid.org/0009-0003-4472-2697>, duryshch@ukr.net

Дата першого надходження статті 19.01.2025.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2025.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-48-54>

УДК 004.89:658.011.56:621.31

INTELLIGENT AUTOMATION OF THE FORECASTING PROCEDURE FOR THE OPERATIONS OF ELECTRIC POWER ENTERPRISES

Kotov I.A., Shvets D.V.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДІЯЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Котов І.А., Швець Д.В.

The article investigates a highly relevant scientific and practical problem related to the development of intelligent automation systems for forecasting the operations of electric power enterprises under conditions of high information uncertainty and incomplete input data. Decision-makers face increasing responsibility within a competitive business environment. This necessitates the urgent implementation of novel mathematical computational models and intelligent information technologies. The research focuses on automating the forecasting process for electric power enterprises. The primary goal is to develop a software application based on formal, structural-functional, and logical models.

In this work, a comparative review of existing forecasting methods has been conducted, highlighting time-series methods, exponential smoothing, simple and moving averages. Special attention is paid to the development of the fuzzy forecasting system architecture, which accounts for both the probabilistic nature of the parameters and the specific characteristics of the electric power industry. The development cycle of the fuzzy model is described in detail, including the stages of fuzzification of input variables, the formation of a comprehensive knowledge base, the configuration of the inference engine based on fuzzy rules, and the final defuzzification process to obtain real-world values for long-term strategies. To limit the confidence interval of the parameters, various membership functions (Gaussian, triangular, and exponential) are applied. Additionally, the model incorporates reliability indicators for the components of the electric power complex. It is proposed to use the constructed knowledge base in conjunction with statistical forecasting results to refine the trend of the investigated parameter.

During the modeling process, three key regions of failure rate were identified. This distribution improved the

accuracy of evaluating the equipment's technical condition and the probability of an application failure event. The study's result is a software complex that has been created and fully tested, utilizing artificial intelligence modules and a neural network-based forecasting architecture. The conducted forecasting experiments on retrospective data have confirmed the high efficiency, stability, and adequacy of the developed system and its evaluation results. Ultimately, this approach significantly minimizes potential financial risks and optimizes resource allocation.

Keywords: forecasting, automation, knowledge base, model, membership function, reliability, intellectualization

Introduction. In recent years, the interest in and significance of forecasting have sharply increased [1]. This interest is exhibited by both the academic community and forecasting practitioners. The rapid development and emergence of free software particularly facilitate the advancement of this field. Therefore, particularly in recent times, a significant shift toward the creation of innovative information systems to execute and support forecasts has been observed [2].

The role of forecasting is constantly growing. The reason for this lies in the continuous increase in the responsibility for potentially erroneous actions on the part of decision-makers. The primary and most crucial area for implementing new forecasting methods and tools is the production sector, including electric power enterprises and complexes. The operations of electric power enterprises are

based on operational, medium-term, and long-term forecasts.

There are numerous categories of forecasting methods, including statistical, time series, critical, and target forecasting. The principal ones among these are statistical and time series methods [2].

Forecasting errors result in significant economic losses within power systems. Concurrently, an additional adverse factor impacting forecasting quality is the unreliability and incompleteness of input data. Under such conditions, acquiring a valid and reliable forecast of enterprise operations constitutes a complex and pressing issue.

Consequently, there is a need to implement novel mathematical computational models and intelligent information technologies. These enable the forecasting of electric power enterprise operations using historical data, aiming to provide management with timely information to deploy control strategies that improve performance under uncertainty [3].

In this study, the object of research is the automation process of forecasting the operations of electric power enterprises under conditions of information uncertainty. The research subject comprises structural, functional, mathematical, and logical models, along with the software modules of the intelligent automation system for forecasting the operations of industrial enterprises, particularly electric power enterprises, under conditions of uncertainty.

A comparative literature review in the field of forecasting was conducted, during which the principal features of forecasting that formed the basis for the design of a software solution were identified [1, 3, 4]. It was deemed necessary to incorporate fundamental methods and indicators, such as: graphical data representation, selection of proven forecasting methods (exponential smoothing forecasting methods: SES, Holt, Damped, Naive), representation of statistical indicators and forecasting errors, development of an algorithm to identify an optimally tuned forecasting method, and representation of forecasts alongside the primary qualitative characteristics of the time series. Furthermore, forecasting technological advancements in the technology sector, particularly in the electric power industry, is radically transforming the structure and operations of these enterprises, as well as how they justify their decisions and formulate strategies to enhance competitiveness in a continuously changing environment.

The proposed research direction possesses novelty, which lies in the fact that the developed intelligent automation software complex differs from existing counterparts in that, based on novel structural, functional, mathematical, and logical models, it ensures an intelligent forecasting process accounting for the uncertainty of input parameters within the industrial environment of electric power enterprises. Introduction. In recent years, the interest in and significance of forecasting have sharply increased [1]. This interest is exhibited by both the academic community and forecasting practitioners. The rapid development and emergence of free software particularly facilitate the advancement of this field. Therefore, particularly in recent times, a significant shift toward the creation of innovative information systems to execute and support forecasts has been observed [2].

The role of forecasting is constantly growing. The reason for this lies in the continuous increase in the responsibility for potentially erroneous actions on the part of decision-makers. The primary and most crucial area for implementing new forecasting methods and tools is the production sector, including electric power enterprises and complexes. The operations of electric power enterprises are based on operational, medium-term, and long-term forecasts.

There are numerous categories of forecasting methods, including statistical, time series, critical, and target forecasting. The principal ones among these are statistical and time series methods [2].

Forecasting errors result in significant economic losses within power systems. Concurrently, an additional adverse factor impacting forecasting quality is the unreliability and incompleteness of input data. Under such conditions, acquiring a valid and reliable forecast of enterprise operations constitutes a complex and pressing issue.

Consequently, there is a need to implement novel mathematical computational models and intelligent information technologies. These enable the forecasting of electric power enterprise operations using historical data, aiming to provide management with timely information to deploy control strategies that improve performance under uncertainty [3].

In this study, the object of research is the automation process of forecasting the operations of electric power enterprises under conditions of information uncertainty. The research subject comprises structural, functional, mathematical, and logical models, along with the software modules of the intelligent automation system for forecasting the

operations of industrial enterprises, particularly electric power enterprises, under conditions of uncertainty.

A comparative literature review in the field of forecasting was conducted, during which the principal features of forecasting that formed the basis for the design of a software solution were identified [1, 3, 4]. It was deemed necessary to incorporate fundamental methods and indicators, such as: graphical data representation, selection of proven forecasting methods (exponential smoothing forecasting methods: SES, Holt, Damped, Naive), representation of statistical indicators and forecasting errors, development of an algorithm to identify an optimally tuned forecasting method, and representation of forecasts alongside the primary qualitative characteristics of the time series. Furthermore, forecasting technological advancements in the technology sector, particularly in the electric power industry, is radically transforming the structure and operations of these enterprises, as well as how they justify their decisions and formulate strategies to enhance competitiveness in a continuously changing environment.

The proposed research direction possesses novelty, which lies in the fact that the developed intelligent automation software complex differs from existing counterparts in that, based on novel structural, functional, mathematical, and logical models, it ensures an intelligent forecasting process accounting for the uncertainty of input parameters within the industrial environment of electric power enterprises.

The aim of the research is to develop a software application for the intelligent automation of the forecasting process for the operations of electric power enterprises under conditions of uncertainty, based on formal, structural-functional, and logical models of the automated forecasting system.

Based on the conducted analysis, the following research tasks are formulated: to develop the main approaches to the implementation of intelligent systems for evaluating enterprise operations; to develop forecasting models under conditions of uncertainty based on time series; to develop operation algorithms for the knowledge base model of the automated system; to develop data management software modules for the automated system; to conduct research on the operation of the knowledge base of the forecasting software system; to conduct modeling of interactive human-machine interaction with the forecasting software system.

Presentation of the main research material.

Forecasting has become highly popular in recent years across numerous scientific fields. The rapid development and emergence of free software particularly facilitates the advancement of this area. In this context, the aim of the work is to develop an automated, intelligent forecasting system for the operations of electric power enterprises, serving as a foundation for further research and a widely applicable tool.

The essence and general strategy of forecasting can be illustrated graphically. A graphical example of a mathematical approach to forecasting using regression approximation is shown in Fig. 1.

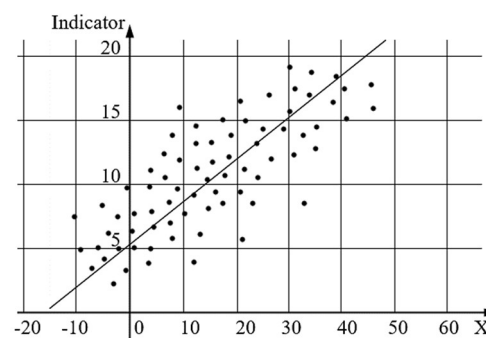


Fig. 1. Graphical example of linear regression approximation for forecasting

Let us briefly describe the necessary stages of the forecasting process that were utilized during the development of the software complex:

Step 1. Problem definition. This involves a profound understanding of the situation, how the forecasts will be used, who will use them, and how the corresponding method will be adapted to the data.

Step 2. Information gathering. The collection of historical data regarding the considered elements is highly important, as they constitute the foundation upon which the corresponding forecasting method will be developed and adapted, thereby yielding the forecast result.

Step 3. Exploratory analysis. The objective of this step is to identify the pattern in the data and, in general, extract vital information from the available historical data. A common method for achieving the aforementioned is data visualization via its graphical representation. This step also indicates which quantitative methods are appropriate to employ.

Step 4. Model selection and adaptation. This step entails selecting and adapting an appropriate quantitative model to the specific data. There are numerous factors to consider. Various simulations are frequently required.

Step 5. Use and evaluation of the forecasting model. After carefully selecting an appropriate forecasting model for each case and estimating its parameters, the model must generate forecasts that are subsequently evaluated.

Based on the previous considerations, let us briefly consider some implementations of the forecasting procedure. The so-called *naïve method* provides a forecast for the next time period equal to the value recorded in the previous time period. The mathematical formula describing this forecasting method is as follows (1).

$$x_t(m) = x_{t-1}. \quad (1)$$

Historical data can be smoothed in various ways. Some of these include the simple average and the moving average.

The simple average method involves calculating the mean of all observations and using it for forecasting. Thus, the forecast is generated based on the following formula (2).

$$F_{t+1} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t Y_i^2 \quad (2)$$

Moving average. One way to control the influence of past observations on the forecast when the moving average method is selected is to determine the length of the moving average to use when deriving the forecast. The term "moving average" is utilized to describe the process because, as a new observation emerges, a new average value of the most recent observations of the selected length is calculated. The relation used for the moving average method takes the form (3).

$$F_{t+1} = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t Y_i^2 \quad (3)$$

An extension of the simple average methods comprises the weighted average forecasting methods. That is, not all observations have equal weight in the derivation of forecasts. It is often the case that the most recent observations provide the best indicator for forecasting a future outcome.

The intellectualization of forecasting necessitates the detailed elaboration and definition of the forecast generation processes and the subsequent management of forecast results. In turn, the forecast results management process requires incorporating new observational data and formalizing the outcomes of managerial decision-making [3]. Based on these considerations, a diagram of the correlation and interrelation between

the forecasting processes and the management of forecast results has been formulated and is depicted in Fig. 2.

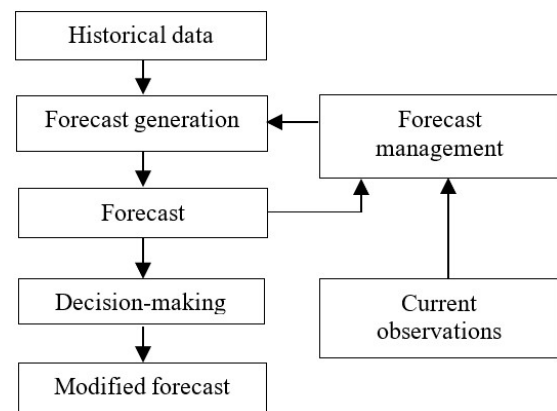


Fig. 2. Correlation between forecast generation and forecast results management

It is evident that, in the decision-making process, the developer or user requires an approximate estimate of the probability of parameter values or the reliability of the expert system [3, 4]. To overcome this problem and limit the parameter confidence intervals, various fuzzy membership functions (triangular, trapezoidal, exponential, and Gaussian) are used. An example of a Gaussian membership function is presented in Fig. 3.

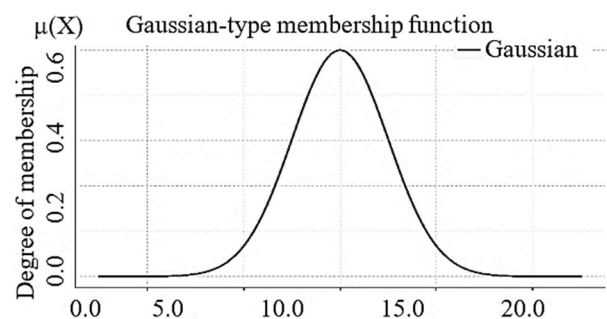


Fig. 3. Example of a Gaussian membership function

In evaluating the reliability of components of the electric power complex, one of the crucial functions in reliability analysis, as it demonstrates changes in the probability of failure over the system's service life, is the time to failure (TTF). In practice, the TTF indicator possesses a characteristic bathtub shape. The upper and lower bounds of fuzzy numbers for the probability of the forecasting result occurrence can be obtained by assuming triangular fuzzy and exponential fuzzy failure rates, respectively.

Consequently, let us assume that the fuzzy exponential TTF constitutes the minimum or lower bound for modeling. In contrast, the triangular fuzzy failure rate constitutes the maximum or upper bound

of the modeling results. This curve comprises three regions: decreasing failure rate (DFR), random failure rate (RFR), and increasing failure rate (IFR). In the bathtub curve with a low operating time for the TTF system, based on three fuzzy distributions, the three failure rate regions (IFR, RFR, and DFR) are characterized by random component failures. The TTF system may exhibit a relatively extended period of random failures. Furthermore, the probability of an application failure event (EDS) is derived from the PAND gate as the system's final output.

At the subsequent stage of the work, the structure of the fuzzy forecasting system was established. This structure accounts for the specifics of both the probabilistic nature of the forecasting parameters and the electric power industry, which is considered the object of research.

The methodology for developing fuzzy systems is employed. It is of paramount importance to properly design the fuzzy system's architecture. The transformation of real-world values into the fuzzy domain using membership functions is called fuzzification of input variables in a fuzzy system. This process is the most critical.

Following fuzzification, it is necessary to possess a knowledge base (a set of information that will enable imparting "intelligence" to the system) to subsequently determine the inference engine or the fuzzy inference process, which is the most critical component of the entire fuzzy model, since

this specific part will execute the whole process based on the available information. After evaluating the fuzzy rules that link the fuzzy variables, it is typically necessary to convert the obtained values back to their original, real-world values, as these are required to obtain real values derived from the fuzzy sets defined within the output variable. In other words, defuzzification is necessary. Fuzzy models utilized in process control or information technologies generally undergo the same application development cycle, as illustrated in Fig. 4.

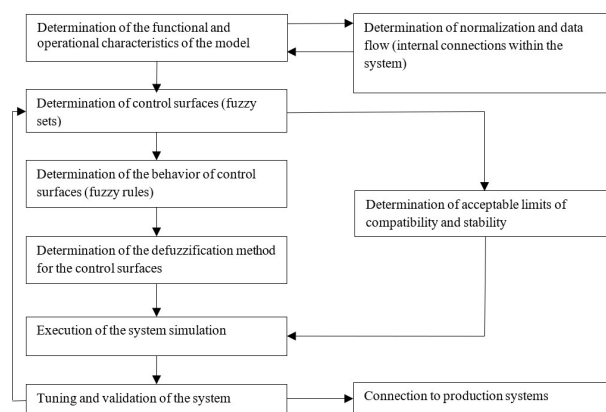


Fig. 4. Development cycle of the fuzzy forecasting system

Table

Input data array of the enterprise operations for forecasting

Functional parameters	Time duration, h			Parameter change, %	
	2022	2023	2024	2022/2023	2023/2024
1	2	3	4	5	6
Resource planning	23	21	15	109,52	140,00
Calculation of indicators	13	11	12	118,18	91,67
Control measures	21	15	9	140,00	166,67
Preparation of new documents	17	17	4	100,00	425,00
Accounting for depreciation costs	5	5	5	100,00	100,00
Calculation of resource allocation	29	23	13	126,09	176,92
Phased planning	15	13	7	115,38	185,71
Distribution of managerial workload	23	21	11	109,52	190,91
Drafting of legal documents	9	31	31	29,03	100,00
Preparation of long-term contracts	25	21	15	119,05	140,00
Control activities	8	5	9	160,00	55,56
Development of informational processing methods	5	5	5	100,00	100,00
Market promotion measures	23	25	25	92,00	100,00
Accounting of counterparty data	8	6	6	133,33	100,00
Tracking of counterparty loyalty	33	15	7	220,00	214,29
Implementation of modern software systems	13	17	19	76,47	89,47
Configuration of modern automation tools	114	72	85	158,33	84,71
Support and development of automated systems	13	17	17	76,47	100,00
Generalization and systematization of data arrays	114	97	54	117,53	179,63

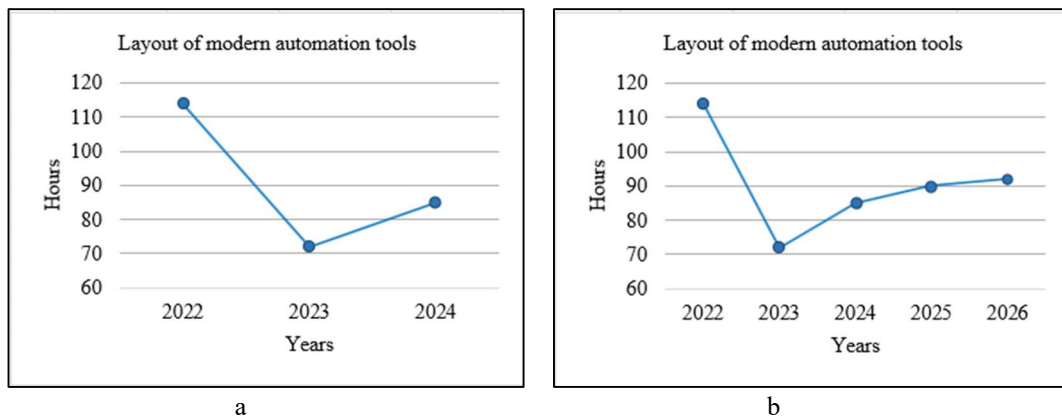


Fig. 5. Forecasting the process of configuring modern automation tools:
a – retrospective data as a basis for analysis and forecast, b – forecast based on the knowledge base

A large volume of data characterizing the operations of the electric power enterprise within a specific time period is processed in the automated system. These data serve as the input data array for processing and forecast generation [1, 2]. Table presents a partial input data array for forecasting the operations of an electric power complex.

Based on the examined concepts, approaches, and models, a forecasting software system for enterprise operations in the electric power complex under conditions of incomplete information about operational parameters has been developed. A series of forecasting experiments was conducted using the available data. The processing of the obtained forecasting data results, incorporating subsequent defuzzification operations, demonstrated the adequacy of the constructed models and the forecast evaluation results.

Examples of specific operational results of the intelligent forecasting system are presented below. Fig. 5 depicts the input data and forecasting results for the configuration process of modern automation tools.

The test results of the developed software complex demonstrated that the implementation of artificial intelligence system modules, based on knowledge of the operational specifics of electric power enterprises, as supplementary tools, enhances the efficiency of evaluation and the adequacy of the forecasting results [4, 5].

Conclusions. The necessity of forecasting in the modern and competitive business environment increasingly concerns enterprise executives. Particularly in recent times, a significant shift toward the development of novel, intelligent information systems for forecasting support has been observed. In this context, the need to consider a broader set of parameters for forecasting in both research and operational spheres becomes evident.

To achieve the aim of the work, the software system's knowledge base and the structure of the forecasting neural network were constructed [6]. The knowledge base was adopted as a foundation, and the forecasting system's operation was modeled using the available parameters. The acquired data permit the following conclusions to be drawn: an analysis of intelligent system methods for forecast implementation was conducted; the problem of constructing a forecast for enterprise operations under conditions of uncertainty was formulated; the structures of the intelligent system's knowledge base for forecasting purposes were established; forecasting models under conditions of uncertainty based on time series were developed; a forecasting software system for the operations of electric power enterprises was developed; data management software modules for the automated system were developed; the knowledge base of the forecasting software system was constructed; a study of the developed forecasting system was conducted, which demonstrated the efficiency and adequacy of the software complex.

References

1. Ганчук А. А., Соловйов В. М., Чабаненко Д. М. Методи прогнозування : навч. посіб. Черкаси : Брама-Україна, 2012. 140 с.
2. Єріна А. М. Статистичне моделювання та прогнозування : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2001. 170 с.
3. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М., Савенков О.І. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. К.: Азимут-Україна, 2011. 608 с.
4. Савченко А. С., Синельников О. О. Методи та системи штучного інтелекту : навч. посіб. Київ : Нац. авіац. ін-т, 2017. 188 с.
5. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика : навч. посіб. Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. 184 с.

6. Zhang Y., Teng Z. Natural Language Processing: A Machine Learning Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 484 p.

References

1. Hanchuk A. A., Soloviov V. M., Chabanenko D. M. Metody prohnovannia : navch. posib. Cherkasy : Brama-Ukraina, 2012. 140 p.
2. Yerina A. M. Statystychno modeliuвання ta prohnovannia : navch. posib. Kyiv : KNEU, 2001. 170 p.
3. Dovhyi S.O., Bidiuk P.I., Trofymchuk O.M., Savenkov O.I. Metody prohnovannia v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen. K.: Azymut-Ukraina, 2011. 608 p.
4. Savchenko A. S., Synelnikov O. O. Metody ta systemy shtuchnoho intelektu : navch. posib. Kyiv : Nats. aviats. in-t, 2017. 188 p.
5. Subbotin S. O. Neironni merezhi: teoriia ta praktyka : navch. posib. Zhytomyr : Vyd. O. O. Yevenok, 2020. 184 p.
6. Zhang Y., Teng Z. Natural Language Processing: A Machine Learning Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 484 p.

Котов І.А., Швець Д.В. Інтелектуальна автоматизація процедури прогнозування діяльності електроенергетичних підприємств

У статті досліджується актуальна науково-практична проблема розроблення систем інтелектуальної автоматизації процедури прогнозування діяльності електроенергетичних підприємств в умовах високого рівня інформаційної невизначеності та неповноти вихідних даних. Зростання відповідальності осіб, які приймають управлінські рішення в конкурентному бізнес-середовищі, зумовлює гостру необхідність впровадження нових математичних обчислювальних моделей та інтелектуальних інформаційних технологій. Об'єктом дослідження є процес автоматизації прогнозування функціонування електроенергетичних підприємств, а метою – розробка відповідного програмного застосування на основі формальних, структурно-функціональних і логічних моделей.

У роботі здійснено порівняльний огляд існуючих методів прогнозування, серед яких виділено методи часових рядів, експоненціального згладжування, просте та ковзне середнє. Приділено увагу розробці архітектури нечіткої системи прогнозування, яка враховує імовірнісний характер параметрів та специфіку електроенергетичної галузі. Описано цикл

розроблення нечіткої моделі, що включає етапи фазифікації вхідних змінних, формування бази знань, налаштування машини виводу на основі нечітких правил та остаточної дефазифікації для отримання реальних значень. Для обмеження довірчого інтервалу параметрів застосовано різні функції приналежності (Гаусові, трикутні, експоненціальні). Додатково в моделі враховано показники надійності компонентів електроенергетичного комплексу. Запропоновано використовувати побудовану базу знань спільно з результатами статистичного прогнозування для уточнення руху досліджуваного тренду параметрів.

У процесі моделювання було виділено три ключові області частоти відмов. Зазначений розподіл дозволив підвищити точність оцінки технічного стану обладнання та ймовірності виникнення події відмови в застосуванні. Результатом дослідження є створений та протестований програмний комплекс, який використовує модулі штучного інтелекту та структуру прогнозуючої нейронної мережі. Проведені прогнозні експерименти на ретроспективних даних підтвердили високу ефективність, стабільність та адекватність розробленої системи. Зазначений підхід суттєво мінімізує потенційні фінансові ризики та оптимізує розподіл ресурсів.

Ключові слова: прогнозування, автоматизація, база знань, модель, функція належності, надійність, інтелектуалізація

Котов Ігор Анатолійович – доктор технічних наук, професор, кафедра моделювання і програмного забезпечення, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича. 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027,

[ORCID: 0000-0003-2445-6259](https://orcid.org/0000-0003-2445-6259)

e-mail: rioexito@knu.edu.ua,

Швець Дмитро Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра моделювання і програмного забезпечення, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича. 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027,

[ORCID: 0000-0001-5126-6405](https://orcid.org/0000-0001-5126-6405)

e-mail: dmitriy.shvets@knu.edu.ua,

Дата першого надходження статті 21.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-55-60>

УДК 681.5.015

INVESTIGATION OF METHODS FOR IDENTIFYING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONTROL OBJECTS

Kobzarev E.V.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Кобзарев Є.В.

The paper proposes an approach for constructing a mathematical model of a control object, where the transient response of the object is used as the initial data. The advantages of this approach include the use of objective data generated by the control object itself, relative simplicity of implementation, and the ability to obtain an adequate and accurate model due to the utilization of comprehensive dynamic characteristics of the system. In addition, the approach improves identification reliability under conditions of limited experimental data.

The study is aimed at optimizing the considered technological process.

The results show that limiting the order of the differential equation (or transfer function) to the second order significantly simplifies the development of the mathematical model. In some cases, high-order models can be reduced to lower-order models, including first- or second-order ones, without a significant loss of accuracy in describing their characteristics. This can be explained by the following factors: analysis and synthesis tasks are much easier for low-order models; computational accuracy is inversely proportional to the model order; first- and second-order models contain sufficient information for system analysis and synthesis; moreover, increasing the model order does not always improve its accuracy. It is also shown that reducing the model order decreases computational costs and enhances numerical stability.

The obtained identification error is within acceptable limits for this type of problem.

The paper addresses the following issues: selection of the number of points on the step response curve of the control object; choice of an appropriate identification algorithm; determination of point distribution along the curve; and analysis of the influence of the number and placement of

points on approximation accuracy. The obtained results can be applied in the design and tuning of automatic control systems.

Keywords: *mathematical model, dynamic characteristics, ammonia production, identification, step response, control object, transient process.*

Introduction. In recent years, global markets have been characterized by a significant increase in raw material prices, which directly leads to higher production costs for domestic industries [1]. In particular, the share of natural gas costs in the total production cost of chemical products currently reaches approximately 75%. Under such conditions, ensuring the competitiveness of Ukrainian manufacturers requires improving the efficiency of raw material and energy resource utilization. This necessitates the optimization of technological processes and control systems. These challenges are especially relevant for ammonia production, which is of considerable importance for the region[1].

Relevance. Ammonia production plays a key role not only in the manufacture of mineral fertilizers but also as a fundamental raw material for various chemical industries. Increasing its efficiency by reducing energy and resource consumption is an important and actual task. This can be achieved by improving existing control systems or developing new ones, as well as optimizing controller settings.

It should be noted that no mathematical model can fully and accurately represent the behavior of a

real physical system. Increasing model accuracy typically requires increasing its complexity, which does not guarantee absolute precision. Therefore, an effective model must balance adequacy and simplicity.

The objective of this study is to investigate methods for identifying control objects using the example of a mathematical model of an ammonia synthesis column, in order to simplify the optimization of dynamic characteristics of automatic control systems[2?3].

Purpose of the study. The aim of this work is to develop an algorithm for identifying control objects based on the least squares method for aperiodic transient processes described by second-order elements with time delay, for the purpose of technological process optimization.

To achieve this goal, the following tasks are addressed:

development of an information-logical structure of relationships between process parameters;

description of the transient response of the control object using a second-order differential equation.

Analysis of studies and publications. Practical experience shows that modernization of technological processes and control systems does not always yield the expected results if controllers at the lower level are improperly tuned. According to literature sources, more than 50% of controllers used in industry are incorrectly adjusted [4-6].

The objects of study include key units of the ammonia synthesis stage: the synthesis column, circulation compressor, separator, and air-cooling apparatus [2].

During the synthesis process, the nitrogen-hydrogen mixture (fresh gas) enters the circulation loop and is directed to the synthesis column, where, in the presence of a catalyst, part of the gas is converted into ammonia. The gas is then cooled, and ammonia is condensed and separated in separators. The unreacted gas is compressed and returned to the cycle. The produced liquid ammonia is stored in specialized high-pressure tanks.

The synthesis column is one of the most complex and critical units in the process. Its reliable operation requires maintaining technological parameters within the limits specified by operational regulations (Fig. 1).

The key control and regulation parameters are pressure, temperature in the catalyst beds, the nitrogen-to-hydrogen ratio in the gas mixture, and the ammonia concentration at the column outlet (Fig. 2).

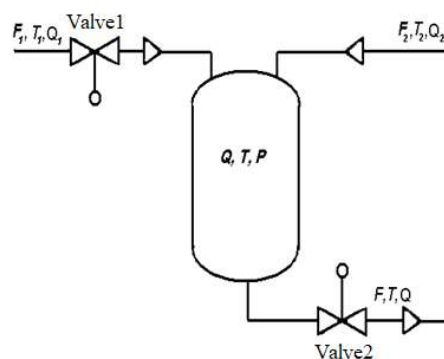


Fig. 1. Ammonia synthesis column

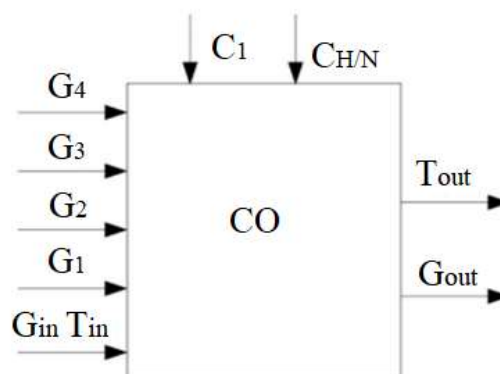


Fig. 2. The synthesis column as a control object:
C1 – ammonia concentration at the inlet;
CH/N – N/H ratio; G1, G2, G3, G4 – flow rates at catalyst beds 1–4; Gin – flow rate at the synthesis column inlet, feed stream; Tin – inlet temperature;
Gout – concentration of the outlet stream;
Tout – outlet temperature

The concentration and temperature of the ammonia at the outlet depend on the concentration, temperature and flow rate of the feedstock at the inlet, the influence of bypass flows, and the ratio of nitrogen (N) to hydrogen (H) flow rates during the process. [7] As the substance passes through each catalyst layer, the temperature between the shelves changes due to heat release during the process; a diagram showing the dependence of outlet temperatures in the catalyst layer on the opening of the control valves is shown in Fig. 3.

Transient processes in controlled systems may be aperiodic or oscillatory in nature. It is known that both types of process can be described with sufficient accuracy by a second-order differential equation.

Let us consider the block diagram of a single-loop automatic control system shown in Fig. 4.

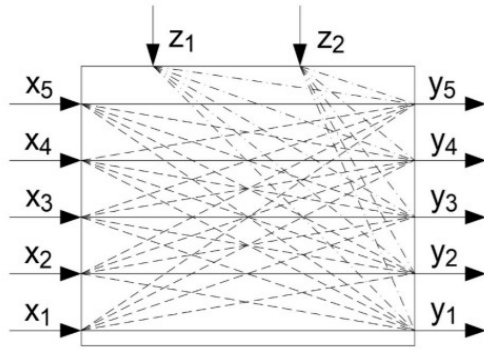


Fig. 3. Block diagram illustrating the relationships between the parameters:
 x_1, x_2, x_3, x_4 – degree of opening of the actuators on the bypass cold streams; y_1, y_2, y_3, y_4 – temperature in the catalyst beds, control parameters;
 z_1 – ammonia concentration at the inlet;
 z_2 – ratio of nitrogen N to hydrogen H

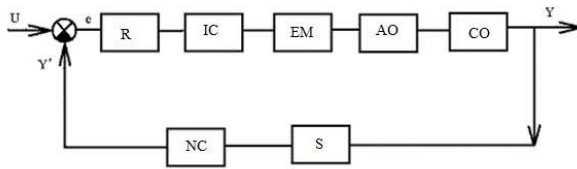


Fig. 4. Block diagram of a single-loop automatic control system:
 R – controller; IC – intermediate converter;
 EM – actuator; AO – control element; CO – controlled object; S – sensor; NC – normalising converter

When recording the acceleration curve on an actual controlled object, we effectively obtain the transient response of an equivalent controlled object (an open-loop system from the intermediate converter to the regulating converter, provided that the transfer function of the secondary instrument is equal to 1). That is, if we identify the equivalent controlled object in the acceleration curve as a second-order system, the functional diagram of a single-loop automatic speed control system can be represented as shown in Fig. 5.

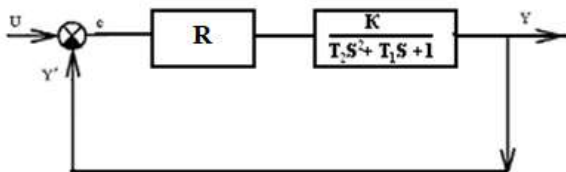


Fig. 5. Modified block diagram of a single-loop automatic control system

The second-order differential equation for the control loop takes the form:

$$(T'')^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T' \frac{dy}{dt} + y = K_p u_0 \quad (1)$$

T'' , T' – control system time constants;

K_p – system transmission ratio;

u_0 – task;

y – output signal.

The nature of the transient process in this stage will depend on the magnitude of the ratio

$\frac{T'}{T''}$. If $\frac{T'}{T''} \geq 2$, then the transient process will be aperiodic, if $\frac{T'}{T''} < 2$ – oscillating.

Let's find the roots of the differential equation (1):

$$P_{1,2} = -\frac{T'}{2(T'')^2} \pm \sqrt{\left[\frac{T'}{2(T'')^2}\right]^2 - \frac{1}{(T'')^2}} \quad (2)$$

If $\frac{T'}{T''} > 2$, the roots of the differential equation

P_1 i P_2 will always be positive and negative. The equation for the transfer function will then take the form:

$$y(t) = K_p u_0 \left[1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_1 t) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_2 t) \right], \quad (3)$$

where $\alpha_1 = -P_1$, $\alpha_2 = -P_2$;

u_0 – step disturbance

If $\frac{T'}{T''} < 2$ the roots will be complex:

$$P_{1,2} = \alpha_0 \pm j\omega_0, \quad (4)$$

where $\alpha_0 = \frac{T'}{2(T'')^2}$ – degree of damping of the transient process;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{(T'')^2} - \left[\frac{T'}{2(T'')^2}\right]^2}$ – the natural frequency of the system.

In this case, the transfer function is described by the equation:

$$y(t) = K_p u_0 \left[1 - \exp(-\alpha_0 t) \left(\cos \omega_0 t + \frac{\alpha_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right]. \quad (5)$$

Let us consider the identification of control objects using the example of a mathematical model of an ammonia synthesis column calculated theoretically, which has the transfer function (6):

$$W = \frac{e^{-2 \cdot s}}{1.5 \cdot s^5 + 4 \cdot s^4 + 10 \cdot s^3 + 10 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1} \quad (6)$$

We are constructing the fifth-order link response curve with a time delay (Fig. 6).

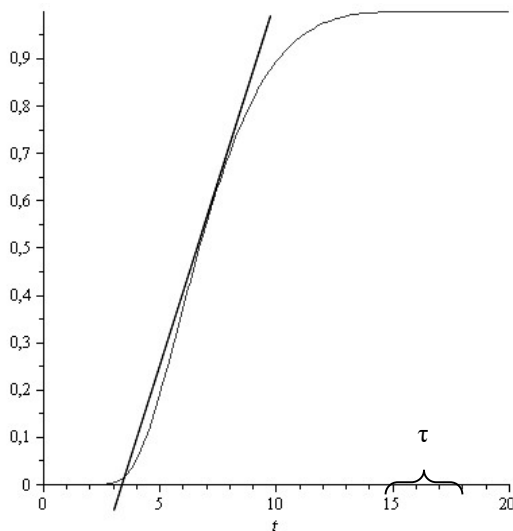


Fig. 6. Крива розгону ланки п'ятого порядку з часом запізнення

Figure 6 shows that the acceleration curve is aperiodic; therefore, equation (3) can be used to derive the equation for the acceleration curve.

The most appropriate approach to determining these variables is the use of the mathematical software package Mathcad.

At the initial stage, the values of the variables α_1 and α_2 are calculated. The obtained results are then substituted into equation (3) in order to derive the transfer function equation. As a result of these substitutions, equation (7) is obtained.

$$y(t) = \Phi(t - 3.505) \cdot (1 - 1.84642 \cdot 10^4 \cdot e^{-0.553896(t-3.505)} + 1.84632 \cdot 10^4 \cdot e^{-0.553926(t-3.505)}) \quad (7)$$

Let us plot the response curve of a fifth-order link and the curve corresponding to equation (7) on the same graph.

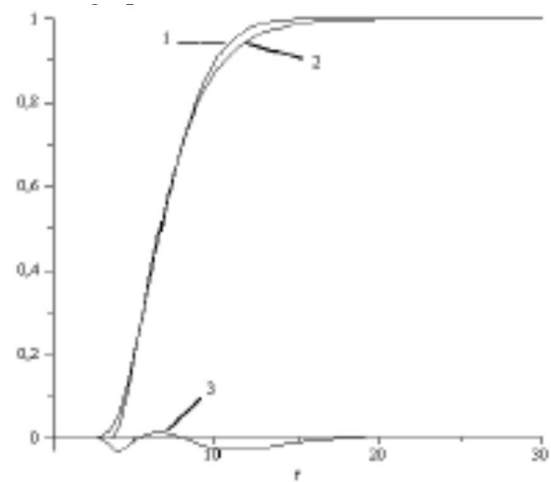


Fig. 7. Initial and obtained response curves of the equivalent object:

1 – response curve of a fifth-order system with time delay; 2 – transient response of a second-order system with time delay; 3 – identification error

Based on the analysis of Fig. 7, it can be concluded that a second-order aperiodic element with time delay provides an adequate approximation of the aperiodic control object with time delay. The maximum deviation between curves 1 and 2 does not exceed 3%. Therefore, in further calculations, it is reasonable to replace the equivalent control object with a second-order element with time delay. To obtain the transfer function (8) [9], the direct Laplace transform of the corresponding equation is performed.

$$W = \frac{1}{3.259 \cdot s^2 + 3.611 \cdot s + 1} \cdot e^{-3.505 \cdot s} \quad (8)$$

Thus, based on the analysis of the points of the step response curve of an aperiodic control object with time delay, it has been established that the application of the least squares method allows the object to be identified with sufficient accuracy as a second-order aperiodic element with time delay. This approach enables the construction of a generalized mathematical model that adequately reflects the main dynamic properties of the real control object.

A key feature of the proposed method is the use of experimentally obtained transient response data, which makes it possible to take into account the real operating conditions of the technological object. The least squares method ensures minimization of the approximation error between the experimental step response and the analytical model

representation. This improves identification accuracy without significantly increasing model complexity.

The obtained results indicate that even complex technological control objects characterized by high-order dynamics can be represented with sufficient accuracy by lower-order models. In particular, for aperiodic transient responses, it is advisable to use a second-order model with time delay. This significantly simplifies further analysis and synthesis of automatic control systems.

It is important to emphasize that reducing the order of the mathematical model does not lead to a substantial loss in accuracy of dynamic behavior representation. On the contrary, it often improves numerical stability, reduces computational costs, and simplifies controller tuning procedures. Therefore, second-order models represent an effective compromise between accuracy and simplicity.

The analysis of the obtained results shows that the approximation error between the actual step response and the second-order model with time delay does not exceed acceptable limits and is suitable for engineering calculations. This confirms the applicability of the proposed approach in the design of automatic control systems for complex technological processes, particularly in the chemical industry.

Taking into account the obtained results, it can be concluded that for automatic control systems involving complex multiparameter technological processes, such as an ammonia synthesis column, the equivalent transfer function can be effectively approximated by a second-order aperiodic element with time delay. This significantly simplifies the analysis of dynamic characteristics, as well as the synthesis and optimization of control parameters.

Moreover, the proposed method contributes to improving the efficiency of automatic control systems by enabling the use of simpler yet sufficiently accurate models. This is especially important in industrial applications, where reliability, responsiveness, and cost-efficiency are critical factors.

Conclusions. In this study, an algorithm for identifying control objects based on the least squares method for aperiodic transient processes using second-order models with time delay has been developed and investigated. It has been shown that this approach allows obtaining an adequate mathematical model of the object with relatively low structural complexity.

The results demonstrate that the identification error does not exceed 3%, which is acceptable for this class of problems. This confirms the practical

applicability of the proposed method for analysis, synthesis, and optimization of automatic control systems.

The obtained results can be applied in the development and improvement of control systems for technological processes, particularly in ammonia production, as well as in other industrial domains involving complex dynamic systems.

Л і т е р а т у р а

1. Mandloi R., Shah P. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model // *Electronic Letters*. 1995. Vol. 31, No. 15. P. 1297–1298.
DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
2. Söderström T., Stoica P. Instrumental variable methods for system identification. *Circuits, Systems and Signal Processing*. 2002. Vol. 21, Issue 1. P. 1-9.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010088722693>
3. Loria M., Tselishchev O., Eliseyev P., Porkuan O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 6, Issue 6 (120). P. 20-29.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
4. Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Hurin O., Kupina O., Sotnikova T. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2023. No. 5. P. 94-104. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002963>
5. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. No. 2. P. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00864>
6. Купіна О. А., Лорія М. Г., Целіщев О. Б., Гурін О. М. Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку. *Вісник ЧНУ імені В. Даля*. 2023. № 2 (278). С. 112-118. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-278-2-112-118>
7. Дуришев О. А., Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М. Г. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку. *Вісник ЧНУ імені В. Даля*. 2025. № 4 (290). С. 72-77. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>
8. Гурін О. М., Дуришев О. А., Кобзарев Є. В., Лорія М. Г. Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення. *Вісник ЧНУ імені В. Даля*. 2025. № 5 (291). С. 74-87.

9. Киселев Д. В., Семенов С. С., Педан А. В. Постановка задачи на моделирование процесса эксплуатации программно-аппаратных комплексов связи. Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 3. С. 46-52. DOI <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10051>.

References

1. Mandloi R., Shah P. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model // Elec-tronic Letters. 1995. Vol. 31, No. 15. P. 1297-1298. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
2. Söderström T., Stoica P. Instrumental variable methods for system identification. Circuits, Systems and Signal Processing. 2002. Vol. 21, Issue 1. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010088722693>
3. Loria M., Tselishchev O., Eliseyev P., Porkuian O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6, Issue 6 (120). P. 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
4. Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Hurin O., Kupina O., Sotnikova T. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model. EUREKA: Physics and Engineering. 2023. No. 5. P. 94-104. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002963>
5. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings. EU-REKA: Physics and Engineering. 2019. No. 2. P. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00864>
6. Kupina O. A., Loria M. H., Tselishchev O. B., Hurin O. M. Doslidzhennia dotsilnosti vykorystannia dyskretnoi systemy keruvannia z modelliu vuzlom okholodzhennia ta kondensatsii amiaku u vyrobnytstvi amiaku. Visnyk SNU imeni V. Dalia. 2023. № 2 (278). S. 112-118. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-278-2-112-118>
7. Duryshch O. A., Kobzarev Ye. V., Hurin O. M., Loria M. H. Doslidzhennia vplyvu dyskretnoho upravlinnia vuzlom okholodzhennia ta kondensatsii na efektyvnist vyrobnytstva amiaku. Visnyk SNU imeni V. Dalia. 2025. № 4 (290). S. 72-77. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>
8. Hurin O. M., Duryshch O. A., Kobzarev Ye. V., Loria M. H. Alhorytm identyfikatsii obiektoiu upravlinnia lankamy druhoho poriadku z chasom zapiznennia. Visnyk SNU imeni V. Dalia. 2025. № 5 (291). S. 74-87.
9. Kyseliev D. V., Semenov S. S., Pedan A. V. Postanovka zadachy na modelyrovanye protsessa eksplua-tatsyy prohranno-apparatnykh kompleksov svyazy. Telekommyunikatsyy y transport. 2018. T. 12. № 3. S. 46-52. DOI <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10051>

Кобзарев Є. В. Дослідження методів ідентифікації динамічних характеристик об'єктів керування

У роботі запропоновано підхід до побудови математичної моделі об'єкта керування, в якому в якості вихідних даних використовується його перехідний процес. Перевагами запропонованого підходу є використання об'єктивної інформації, сформованої самим об'єктом керування, відносна простота реалізації, а також можливість отримання адекватної та точної моделі завдяки врахуванню узагальнених динамічних характеристик системи керування. Крім того, підхід забезпечує підвищення надійності ідентифікації в умовах обмеженого обсягу експериментальних даних.

Дослідження спрямоване на оптимізацію відповідного технологічного процесу.

У результаті встановлено, що обмеження порядку диференціального рівняння (або передатної функції) другим порядком суттєво спрощує побудову математичної моделі. У ряді випадків моделі високого порядку можуть бути приведені до моделей нижчого порядку — зокрема першого або другого — без істотної втрати точності опису їх характеристик. Це пояснюється тим, що: задачі аналізу та синтезу значно простіші для моделей низького порядку; точність чисельних розрахунків обернено залежить від порядку моделі; моделі першого та другого порядку містять достатній обсяг інформації для дослідження систем; а також тим, що збільшення порядку моделі не завжди призводить до підвищення її точності. Додатково встановлено, що зниження порядку моделі сприяє зменшенню обчислювальних витрат і підвищенню стійкості чисельних процедур.

Отримана похибка ідентифікації знаходиться в допустимих межах для задач такого типу.

У роботі розглянуто такі питання: вибір кількості характерних точок на кривій розгону об'єкта керування; визначення ефективного алгоритму ідентифікації; обґрунтування способу розміщення точок; аналіз впливу кількості та розташування точок на точність апроксимації. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та налаштуванні систем автоматичного керування.

Ключові слова: математична модель, динамічні характеристики, виробництво аміаку, алгоритм ідентифікації, крива розгону, об'єкт керування, перехідний процес.

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, <https://orcid.org/d=0009-0004-8811-7488>, kobzarev@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 16.01.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
Creative Commons (CC BY 4.0)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-61-69>

УДК 622.7: 534

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ РУДНОЇ ПУЛЬПИ НА ПАРАМЕТРИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Моркун В.С., Моркун Н.В., Поркуян О.В., Грищенко Я.О.

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF ORE PULP PROPERTIES ON THE PARAMETERS OF A PIEZOCERAMIC TRANSDUCER

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuyan O.V., Hryshchenko Y.O.

В процесі збагачення рудного матеріалу пульпа є головним транспортуючим агентом, тому її характеристики мають важливий вплив як на ефективність технологічних операцій, так і на результати вимірювань параметрів її твердої фази. Густина та в'язкість пульпи – це дві різні властивості, які дають цінне уявлення про її поведінку під час технологічних операцій. Ці параметри визначають процес руху частинок подрібненої руди на ситі грохота і, таким чином, мають прямий вплив на результати її вологого грохочення. Для визначення цих параметрів запропоновано використовувати вимірювання характеристик п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у досліджуване середовище. Модель п'єзокерамічного перетворювача представлено у вигляді взаємопов'язаних електричного та механічного доменів. Механічний домен симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у пульпу. Фізико-механічні властивості середовища змодельовані із застосуванням типових блоків Mass, Translational Damper та Translational Spring розширення Simscape для Simulink®/MATLAB®. Блок Piezo Stack представляє електричні та механічні характеристики п'єзоелектричного багатошарового перетворювача. В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу виміряних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини. Досліджена залежність амплітуди першого (найбільшого) піку виміряного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та виконана її апроксимація із застосуванням поліноміальної та двочленної експоненціальної моделі. Доведено, що

двочленна експоненціальна модель дозволяє отримати якісну апроксимацію досліджуваної залежності. Результати моделювання п'єзокерамічного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, свідчать про можливість застосування запропонованого підходу до оперативного визначення концентрації її твердої фази та формування інформаційної бази керування процесом тонкого вологого грохочення руди. Такий перетворювач може бути виключно частиною спеціального вимірювального пристрою або для отримання відповідної інформації може застосовуватися наявний потужний високоенергетичний ультразвуковий перетворювач технологічного призначення.

Ключові слова: грохочення, модель, перетворювач, керування, автоматизація, характеристики, ефективність.

Вступ. Вібраційні грохоти є критично важливими машинами, що використовуються для класифікації за розміром подрібнених матеріалів у процесі переробки корисних копалин. Їхня ефективна робота, включаючи точний вібраційний рух та кут нахилу, може забезпечити економію енергії і зниження витрат у операціях грохочення та в усьому процесі переробки руди. Динамічні моделі руху вібраційного грохота, доступні в літературі, недостатньо інформативні стосовно симуляції руху частинок руди та їх взаємодії з ситовим полотном. У роботі [1] запропоновано використовувати метод дискретних елементів (МДЕ) для розрахунку динаміку руди.

Протестовані дві двовимірні динамічні моделі з трьома ступенями свободи для вібраційного грохота, використовуючи лінійний та нелінійний підходи до кутового зміщення.

Оптимальні параметри коливань вібраційних грохотів визначаються за допомогою аналітичних методів шляхом дослідження руху окремої сферичної частинки в неінерціальній системі відліку вібраційного сита. У роботі [2] визначено безрозмірні параметри, що визначають ефективність процесу просіювання. Вплив взаємодії між кількома частинками, що рухаються на сітці, аналізується за допомогою методу дискретних елементів. Порівнюючи аналітичні та числові результати, можна побачити, що аналітичну оцінку ефективності просіювання можна використовувати до заданого розміру частинок забруднюючої речовини необмежено в досліджуваному діапазоні кутів сита. Крім того, у випадку цього мінімального розміру частинок забруднюючої речовини існує максимальне значення кута просіювання. Зроблено висновок, що використання запропонованої оцінки ефективності просіювання на основі методу дискретних елементів є неминучим для кута вище цього максимального значення.

У статті [3] представлено числове дослідження потоку частинок та поведінки ситового полотна грохота під час збагачення вугілля. Потік частинок моделюється методом дискретних елементів, тоді як потік води на ситовому полотні симулюється за допомогою обчислювальної гідродинаміки. Вплив робочих умов досліджується з використанням серії контрольованих числових експериментів. Потік частинок на грохоті аналізується з точки зору поля швидкостей, просторового розподілу частинок та часу перебування в робочій зоні, тоді як ефективність просіювання аналізується з точки зору загального відсотка проходження та розподілу відсотка проходження вздовж грохота. Для ситового полотна велика кількість води з низькою швидкістю є кращою для подолання когезії між частинками та контролю швидкостей частинок, що може покращити відсоток проходження. Для грохота з низьким напором збільшення кута нахилу та амплітуди коливань у горизонтальному напрямку може збільшити пропускну здатність, зберігаючи при цьому відсоток проходження.

У роботі [4] досліджено поведінку сухого гранульованого матеріалу на вібраційних конвеєрах. У проведених експериментах використовували вертикальну та горизонтальну

вібрацію з однаковою амплітудою та фазовим зсувом $\pi/2$. Це означає, що кожна точка опори рухається по круговій траєкторії. Стоячі хвилі, що коливаються на половині частоти впливу, спостерігаються в певному діапазоні прискорення руху. Домінуюча довжина хвилі діаграми вимірюється для різних частот впливу з постійною амплітудою. Ці хвилі не є стаціонарними, а дрейфують зі швидкістю, яка дорівнює швидкості перенесення гранульованого матеріалу, що визначається за допомогою трасерної частинки.

Вода може сильно впливати на механічну поведінку гранульованих матеріалів. У дослідженні [5] проведено числове моделювання для вивчення впливу вмісту води, що описується насиченням, на руйнування гранульованих матеріалів. Для вологих гранульованих матеріалів від маятникового стану до капілярного (насичення від 30 до 100%) використовується пов'язана модель CFD-DEM, а для вологих гранульованих матеріалів маятникового стану (насичення менше 30%) використовується модель дискретного елемента-рідинного мосту. Досліджується вплив насичення, радіуса частинок та тертя на форму осаду, а кінцева межа осаду апроксимується білінійною моделлю. Крім того, досліджується плинність за рухом центру мас гранульованих матеріалів. Числові приклади показують, що в діапазоні насичення від 0,1 до 0,5% та від 30 до 100% вода має очевидний вплив на кінцеву форму осаду. У діапазоні насичення 0,5–30% вода має незначний вплив на кінцеву форму осаду. Для діапазону насичення 0,1–0,5% плинність зменшується зі збільшенням насичення, а коли насичення перевищує 30%, плинність зростає зі збільшенням насичення. Дослідження виявило вплив прошаркової води на плинність зернистих матеріалів, що є важливим для дослідження інженерно-геологічних проблем, таких як зсуви.

З наведеного можна зробити висновок, що оперативне визначення характеристик промислових суспензій, зокрема рудної пульпи, має важливе значення для підвищення ефективності процесів її мокрого вологого грохочення та покращення якості автоматизованого керування цим процесом.

Метою роботи є обґрунтування використання методу визначення характеристик рудної пульпи на основі вимірювань параметрів зануреного у неї п'єзокерамічного перетворювача.

Викладання основного матеріалу. В процесі збагачення рудного матеріалу пульпа є головним транспортуючим агентом, тому її характеристики мають важливий вплив як на ефективність технологічних операцій, так і на результати вимірювань параметрів її твердої фази [6]. Густина та в'язкість пульпи – це два різних параметра, які дають цінне уявлення про її властивості. Густина зосереджена на масі на одиницю об'єму речовини, тоді як в'язкість описує опір рідини потоку. Частинки в рідині діють як перешкоди, перешкоджаючи потоку рідини та збільшуючи опір потоку, тобто в'язкість. Густина є скалярною величиною, а в'язкість – це тензорна величина. Густина залишається постійною незалежно від розміру чи форми зразка, тоді як в'язкість може змінюватися залежно від таких факторів, як температура та тиск.

Модель Einstein для опису підвищеної в'язкості для дуже низької концентрації частинок, має вигляд [7]

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{5}{2} \varphi\right), \quad (1)$$

де η - об'ємна в'язкість суспензії; η_0 - в'язкість рідини; φ - вміст твердої фракції.

Формулу було модифіковано та адаптовано Batchelor для кількох сфер однакового розміру («монодисперсних») для максимального вмісту твердої фракції від 0,15 до 0,2 [8]

$$\eta = \eta_0 (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2), \quad (2)$$

Суспензії з ще вищим вмістом твердої частки можна описати за допомогою моделі Krieger & Dougherty, що діє для низьких та високих швидкостей зсуву [9]

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^{-[\eta] \cdot \varphi_{max}}, \quad (3)$$

де φ_{max} – це максимальна тверда частка в суспензії, яка все ще дозволяє суспензії текти; $[\eta]$ - міра форми частинок (2,5 для сфер).

Якщо припустити, що частинки сферичні, теоретична максимальна щільність упаковки може становити від 0,52 до 0,74, залежно від схеми укладання сфер [6]. Загально відомо, що для випадкової щільної упаковки сфер це значення становить приблизно 0,64 [10].

Для низького вмісту твердих фракцій в'язкість рідини збільшується. Однак суттєвої взаємодії частинок не відбувається, і поведінка потоку суспензії все ще контролюється ньютонівською поведінкою потоку фази рідини.

Зі збільшенням вмісту твердої фракції ймовірність зіткнення частинок стає більшою. Тепер вони діють як перешкоди, і потрібна додаткова сила зсуву, коли виникає тертя під час зіткнення частинок. Коли тверда фракція наближається до φ_{max} , постійна взаємодія частинок суттєво збільшує силу, необхідну для зсуву зразка, яка тепер домінує над напруженою зсуву, необхідною для зсуву рідини. У роботі [6] проаналізовано вплив концентрації твердої фази, крупності та форми її частинок на в'язкість суспензії.

Концентрація твердої фази та в'язкість пульпи визначають процес руху частинок подрібненої руди на ситі грохота і, таким чином, мають прямий вплив на результати її вологого грохочення [11-13]. Для визначення цих параметрів пропонується використати вимірювання характеристик п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у досліджуване середовище. Такий перетворювач може бути виключно частиною спеціального вимірювального пристрою або для отримання відповідної інформації може застосовуватися наявний потужний високоенергетичний ультразвуковий перетворювач технологічного призначення.

Приклад конструкції п'єзоелектричного перетворювача ланжевенівського типу для формування потужного ультразвуку наведено на рис. 1 [14].

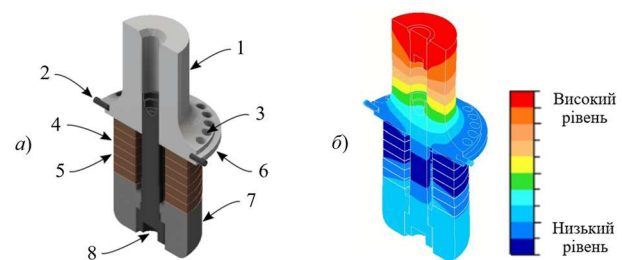


Рис. 1. П'єзоелектричний перетворювач:

а – конструкція: 1 – передній випромінювач;

2 – штифт проти обертання; 3 – отвір для охолодження; 4 – п'єзокерамічні дискові пластини; 5 – електроди; 6 – фланець ущільнювального кільця; 7 – задній випромінювач; 8 – центральний болт, б – кольорова характеристика амплітуди зміщень [14]

Такий перетворювач являє собою одну або декілька п'єзокерамічних дискових пластин, що механічно стислі (попередньо напружені) між переднім та заднім випромінювачами. Механічні характеристики п'єзокераміки відповідають параметрам прикладеного електричного поля.

Системи, що коливаються механічно або електрично, мають подібні характеристики. На рис. 2 наведено концептуальну електромеханічну модель п'єзоелектричного перетворювача, активна частина якого контактує з середовищем, що має певні фізико-механічні властивості [15].

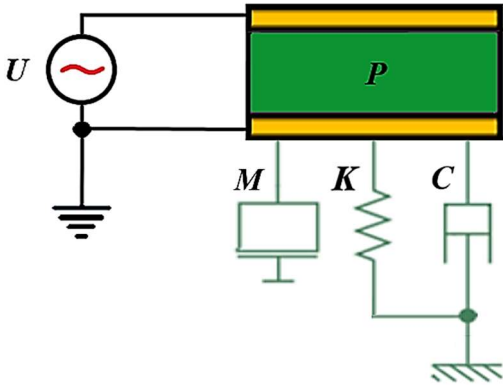


Рис. 2. Концептуальна електромеханічна модель п'єзоелектричного перетворювача: U – прикладений електричний сигнал; P – п'єзокерамічний елемент; M – маса; K – пружний елемент; C – демпфер

Для простої системи маса-пружина-демпфер, зображеної на рис. 2, рівняння руху має вигляд [16]

$$F(t) = m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku, \quad (4)$$

де $F(t)$ – прикладена сила; u – зміщення; $\frac{du}{dt}$ – швидкість; $\frac{d^2 u}{dt^2}$ – прискорення; m – маса; c – константа демпфування (в'язкість); k – жорсткість пружини.

У механічних системах можливі різні види демпфування. Наведене вище рівняння (4) передбачає в'язке демпфування, де сила демпфування пропорційна швидкості.

Енергія, що накопичується в рухомій масі завдяки її швидкості, дорівнює [16]

$$W_m = \frac{1}{2} m \dot{u}^2, \quad (5)$$

Енергія, що накопичується в пружині завдяки її розтягуванню, становить

$$W_k = \frac{1}{2} k u^2, \quad (6)$$

Потужність, що розсіюється демпфером, дорівнює

$$P_c = c \dot{u}^2, \quad (7)$$

Резонансна частота наведеної механічної системи визначається наступним чином

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (8)$$

Електромеханічна модель п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, реалізована у розширенні Simscape для Simulink®/MATLAB® [17]. На рис. 3 наведена схема моделювання п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу.

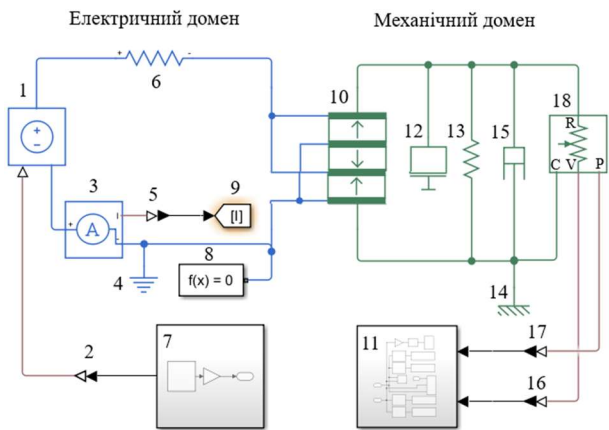


Рис. 3. Схема моделювання п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу

У наведеній моделі використані наступні блоки: 1 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 2 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Current Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 4 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 5, 16, 17 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 7 – блок Subsystem 1; 8 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 9 – блок Goto із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 10 – блок Piezo Stack із бібліотеки Simscape / Electrical / Electromechanical / Mechatronic Actuators; 11 – блок Subsystem 2; 12 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 13 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 14 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational

Elements; 15 – блок Translational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 18 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors;

Блок Solver Configuration визначає параметри розв'язувача, які потрібні моделі перед початком моделювання.

Блок Subsystem 1 – генерує електричний сигнал обраної форми, частоти та амплітуди.

Блок Controlled Voltage Source являє собою ідеальне джерело напруги, яке є достатньо потужним, щоб підтримувати задану напругу на своїх клеммах незалежно від струму, що протікає через джерело.

Блок Current Sensor являє собою ідеальний датчик струму, тобто пристрій, який перетворює струм, вимірюваний в електричній гілці, на фізичний сигнал, пропорційний струму.

Блок Resistor моделює лінійний резистор в електричних системах.

Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину, описану такими рівняннями

$$F = Kx, \quad (9)$$

$$x = x_{init} + x_R - x_C, \quad (10)$$

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad (11)$$

де F - сила, що передається через пружину; K - коефіцієнт жорсткості пружини; x - відносне зміщення (деформація пружини); x_{init} - початкове зміщення пружини (початкова деформація, пружина може бути спочатку стиснутою ($x_{init} > 0$) або розтягнутою ($x_{init} < 0$)); x_R, x_C - абсолютні переміщення клем R і C , відповідно; v - відносна швидкість; t - час.

Блок Mass представляє ідеальну механічну поступальну масу, яка описується наступним рівнянням

$$F = m \frac{dv}{dt}, \quad (12)$$

де F - сила інерції; m - маса; v - швидкість; t - час.

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер, що описується такими рівняннями

$$F = Dv, \quad (13)$$

$$v = v_R - v_C, \quad (14)$$

де F - сила, що передається через демпфер; D - коефіцієнт демпфування (в'язкого тертя); v - відносна швидкість; v_R, v_C - абсолютні швидкості терміналів R і C відповідно.

Блок Mechanical Translational Reference представляє опорну точку або рамку для механічних портів поступального руху.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює поперечну змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. З'єднання V та P – це порти виходу фізичних сигналів для швидкості та положення відповідно.

Блок Subsystem 2 вимірює, виконує спектральний аналіз та відображає сигнали у часовій області, що отримані у блоці Ideal Translational Motion Sensor.

Блок PS-Simulink Converter перетворює фізичний сигнал у вихідний сигнал Simulink®, блок Simulink Converter-PS виконує зворотне перетворення.

Блок Piezo Stack представляє електричні та механічні характеристики п'єзоелектричного багатошарового перетворювача за допомогою таких рівнянь

$$S = s^E T + d^E E, \quad (15)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E, \quad (16)$$

де S – тензор деформації; T – тензор напружень; E – вектор електричного поля; D – вектор електричного зміщення; s^E – матриця пружної податливості під дією постійного електричного поля; d – матриця п'єзоелектричної константи; ε^T – діелектрична проникність, виміряна при постійному напруженні.

Механічний домен моделі, наведеної на рис. 3, симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у досліджуване середовище, тобто пульпу. Фізико-механічні властивості середовища змодельовані із застосуванням блоків Mass, Translational Damper та Translational Spring. Досліджено вплив концентрації твердої фази пульпи на характеристики п'єзоелектричного перетворювача.

В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу вимірюваних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних

характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини ρ_b . На рис. 4 наведено результати спектрального аналізу вимірюваного сигналу при фіксованих значеннях концентрації твердої фази рудної пульпи: а) - ρ_b ; б) - $\rho_{b1} = 0.99\rho_b$; в) - $\rho_{b2} = 0.95\rho_b$; г) - $\rho_{b3} = 0.9\rho_b$; д) - $\rho_{b4} = 0.85\rho_b$; е) - $\rho_{b5} = 0.8\rho_b$.

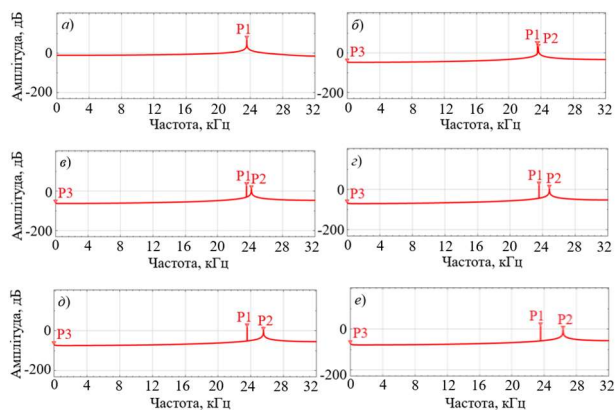


Рис. 4. Зміна вимірюваних параметрів при варіаціях концентрації твердої фази пульпи:

а - ρ_b ; б - $\rho_{b1} = 0.99\rho_b$; в - $\rho_{b2} = 0.95\rho_b$;
г - $\rho_{b3} = 0.9\rho_b$; д - $\rho_{b4} = 0.85\rho_b$; е - $\rho_{b5} = 0.8\rho_b$

Зміна концентрації твердої фази рудної пульпи симулювалась відповідними змінами параметрів блоку Mass досліджуваної моделі. Наведені на рис. 4 залежності мають виражені піки: P1 – на базовій резонансній частоті; P2 – на резонансній частоті системи з новими встановленими параметрами. Пік P3 відповідає початковому сплеску вимірюваних параметрів. Аналіз амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача, наведеної у табл. 1, показує доцільність її використання для визначення параметрів рудної пульпи.

У табл. 1 використано такі позначення: FP1, FP2, FP3, AP1, AP2, AP3 – частота і амплітуда відповідних піків амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача.

Як слідує з результатів моделювання, наведених у табл. 1, для визначення характеристик рудної пульпи доцільно використовувати виміряні значення амплітуди піку P1, а також частоти та амплітуди піку P2. На рис. 5 наведено залежність амплітуди першої гармоніки вимірюваного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та результати її апроксимації із застосуванням поліноміальної (а) та двочленної експоненціальної моделі (б).

Таблиця 1

Спектральний аналіз амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача

Параметри пульпи	P1		P2		P3	
	FP1, кГц	AP1, дБ	FP2, кГц	AP2, дБ	FP3, кГц	AP3, дБ
ρ_b	23.6	68.3	-	-	-	-
$0.99\rho_b$	23.6	54.3	23.7	25.7	0.01	-48.2
$0.95\rho_b$	23.6	29.3	24.2	9.88	0.01	-62.5
$0.9\rho_b$	23.6	20.2	24.8	4.29	0.01	-69.1
$0.85\rho_b$	23.6	16.7	25.6	-0.16	0.01	-72.4
$0.8\rho_b$	23.6	14.2	26.4	-2.70	0.01	-74.4

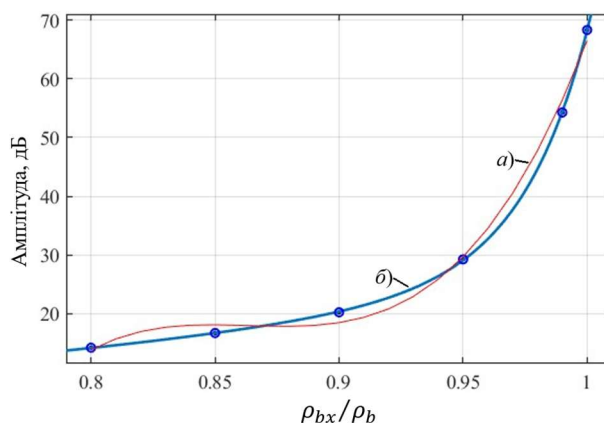


Рис. 5. Результати апроксимації залежності амплітуди піку P1 вимірюваного сигналу від концентрації твердої фази пульпи із застосуванням поліноміальної (а) та двочленної експоненціальної моделі (б)

Апроксимація, наведеної на рис. 5 залежності виконана із застосуванням інструментарію *curveFitter* MATLAB® [18].

Поліноміальні моделі у використаному інструментарії для кривих задаються як

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}, \quad (17)$$

де $n + 1$ – порядок полінома, n – ступінь полінома, а $1 \leq n \leq 9$.

У розглянутому експерименті застосовано поліном третього ступеня (кубичний)

$$y = p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x + p_4. \quad (18)$$

Коефіцієнти до виразу (18) та 95% довірчі інтервали наведено у табл. 2.

Інструментарій *curveFitter* надає двочленну експоненціальну модель у вигляді

$$y = ae^{bx} + ce^{dx}. \quad (19)$$

Таблиця 2

Коефіцієнти та 95% довірчі інтервали для поліноміальної апроксимації

Коефіцієнти	Величина	Нижня межа	Верхня межа
p_1	9.9615	-1.7909	21.7138
p_2	19.4136	9.5170	29.3101
p_3	11.5574	-3.7025	26.8172
p_4	20.0027	11.9579	28.0476

Коефіцієнти до виразу (19) та 95% довірчі інтервали наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти та 95% довірчі інтервали для експоненціальної апроксимації

Коефіцієнти	Величина	Нижня межа	Верхня межа
a	20.3127	18.9884	21.6371
b	0.2518	0.1863	0.3173
c	1.7223	0.8885	2.5561
d	2.9870	2.5981	3.3759

Якість, тобто відповідність результатів апроксимації, характеризують показники наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Показники якості апроксимації

Показник	Поліноміальна модель	Експоненціальна модель
SSE	13.1582	0.0656
R-square	0.9947	1.0000
DFE	2.000	2.0000
Adj R-sq	0.9868	0.9999
RMSE	2.5650	0.1811

Отже, двочленна експоненціальна модель дозволяє отримати якісну апроксимацію результатів моделювання.

Таким чином, моделювання п'єзокерамічного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, свідчить про можливість застосування запропонованого підходу до оперативного визначення концентрації її твердої фази та формування інформаційної бази керування процесом тонкого вологого грохочення руди.

Висновки. Модель п'єзокерамічного перетворювача представлено у вигляді взаємопов'язаних електричного та механічного доменів. Механічний домен симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у досліджуване середовище, тобто пульпу. Фізико-механічні властивості середовища

змодельовані із застосуванням типових блоків Mass, Translational Damper та Translational Spring розширення Simscape для Simulink®/MATLAB®. Досліджено вплив концентрації твердої фази пульпи на характеристики п'єзоелектричного перетворювача. В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу вимірних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини. Доведено доцільність використання залежності амплітуди першої гармоніки вимірюваного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та результатів її апроксимації із застосуванням двочленної експоненціальної моделі для оперативного визначення цього параметру в процесі вологого грохочення руди.

Напрямом подальших досліджень слід вважати визначення впливу крупності частинок подрібненої руди, їх агрегацій та флокулоутворень на електромеханічні характеристики п'єзокерамічного перетворювача, активна поверхня якого контактує із залізорудною пульпою.

Література

1. Moncada M.M. and Rodriguez C. G. Dynamic modeling of a vibrating screen considering the ore inertia and force of the ore over the screen calculated with discrete element method. *Hindawi. Shock and vibration*. 2018, 1714738, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/1714738>.
2. Safranyik F., Csizmadia B.M., Hegedus A. et al. Optimal oscillation parameters of vibrating screens. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019, vol. 33, pp. 2011–2017. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0403-1>.
3. Dong K.J. and Yu A.B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Minerals Engineering*. 2012, vol. 31, p. 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.020>
4. G"otzendorfer A., Kruelle C. A. and Rehberg I. Granular surface waves in a vibratory conveyor. In Garc'ia-Rojo, Herrmann, and McNamara (Eds.). 2005, PG05, Rotterdam, Balkema. pp. 1181–1184.
5. Chu X., Zhu Z. and Wang L. Numerical investigation on the influence of water content on collapse of granular columns. *Granular Matter*. 2023, vol. 25, (2). DOI:10.1007/s10035-023-01324-z.

6. Paar A. *The influence of particles on suspension rheology*. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>
7. Einstein A. *Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. *Annalen der Physik*, 339, 591–592. <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>.
8. Batchelor K.G. The effect of Brwnian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 83, pp. 97–117. doi: 10.1017/S002211207700106.
9. Krieger I.M, Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*. 1959, vol. 3, pp. 137–152. doi: 10.1122/1.548848.
10. Scott G.D, Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2. 1969, vol. 863, p. doi: 10.1088/0022-3727/2/6/311.
11. Моркун В., Моркун Н., Грищенко Я., Бобров Є. Моделювання динаміки надрешітного продукту тонкого вологого грохочення залізної руди. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, 7(293), с. 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.
12. 12. Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Азарян А.А., Грищенко А.М. Моделювання автоматизованого керування об'єктами гірничого виробництва на основі хвильового підходу. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, 10(296), с. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.
13. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O Hryshchenko S.M. Increasing the efficiency of fine wet grinding of ore using the dynamic effect of ultrasound. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025, vol. 6, P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/052>.
14. Ultrasonic Resonators. URL: <https://www.ultrasonic-resonators.org/>.
15. Roozbeh Tabrizian. Piezoelectric Transducer: Concept & Modeling. URL: https://phonon.ece.ufl.edu/wp-content/uploads/sites/67/2022/02/Resonant-MEMS-2022_L5.pdf
16. Mechanical-Electrical analogs. URL: https://www.ultrasonic-resonators.org/vibration_theory/mechanical_electrical_analogs/mechanical_electrical_analogs.html.
17. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
18. Curve Fitter. URL: <https://se.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>.

References

1. Moncada M.M. and Rodriguez C. G. Dynamic modeling of a vibrating screen considering the ore inertia and force of the ore over the screen calculated with discrete element method. *Hindawi. Shock and vibration*. 2018, 1714738, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/1714738>.
2. Safranyik F., Csizmadia B.M., Hegedus A. et al. Optimal oscillation parameters of vibrating screens. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019, vol. 33, pp. 2011–2017. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0403-1>.
3. Dong K.J. and Yu A.B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Minerals Engineering*. 2012, vol. 31, p. 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.020>
4. Götendorfer A., Kruelle C. A. and Rehberg I. Granular surface waves in a vibratory conveyor. In Garc'ia-Rojo, Herrmann, and McNamara (Eds.). 2005, PG05, Rotterdam, Balkema. pp. 1181–1184.
5. Chu X., Zhu Z. and Wang L. Numerical investigation on the influence of water content on collapse of granular columns. *Granular Matter*. 2023, vol. 25, (2). DOI:10.1007/s10035-023-01324-z.
6. Paar A. *The influence of particles on suspension rheology*. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>
7. Einstein A. *Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. *Annalen der Physik*, 339, 591–592. <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>.
8. Batchelor K.G. The effect of Brwnian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 83, pp. 97–117. doi: 10.1017/S002211207700106.
9. Krieger I.M, Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*. 1959, vol. 3, pp. 137–152. doi: 10.1122/1.548848.
10. Scott G.D, Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2. 1969, vol. 863, p. doi: 10.1088/0022-3727/2/6/311.
11. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Bobrov E.Y. *Modeling the dynamics of the oversize product of fine wet screening of iron ore*. *Visnyk of the Volodymyr Dal Eastern Ukrainian National University*. 2025, 293(7). P. 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.
12. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A.M. *Modeling of automated control of mining production facilities based on a wave approach*. *Visnyk of the Volodymyr Dal Eastern Ukrainian National University*. 2025, 10(296), P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.

13. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O. Hryshchenko S.M. Increasing the efficiency of fine wet grinding of ore using the dynamic effect of ultrasound. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025, vol. 6, P. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/052>.
14. Ultrasonic Resonators. URL: <https://www.ultrasonic-resonators.org/>.
15. Roozbeh Tabrizian. Piezoelectric Transducer: Concept & Modeling. URL: https://phonon.ece.ufl.edu/wp-content/uploads/sites/67/2022/02/Resonant-MEMS-2022_L5.pdf
16. Mechanical-Electrical analogs. URL: https://www.ultrasonic-resonators.org/vibration_theory/mechanical_electrical_analogs/mechanical_electrical_analogs.html.
17. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
18. Curve Fitter. URL: <https://se.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuyan O.V., Hryshchenko Y.O. Determination of the influence of ore pulp properties on the parameters of a piezoceramic transducer

Well drilling is the most common and resource-intensive technological operation in the extraction of minerals. The economic efficiency of this operation directly depends on the quality of automated process control, which, in turn, is determined by the completeness of its information support. The main factor affecting the results of the drilling process is the correspondence of the speed of well penetration and the resulting control actions to the physical and mechanical characteristics of the rock or its mineralogical varieties. A method is proposed to improve the efficiency of the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells based on the simulation of the conversion of a probing electromagnetic signal in the studied environment using Simscape® physical modeling blocks for Simulink®/MATLAB®. The approach used is based on the use of an electromagnetic transducer that generates a probing pulse in iron-bearing rock with certain electrical and magnetic properties. As a result, eddy currents are formed in the studied medium, which create an induced magnetic field, affecting parameters such as the voltage on the measuring coil or its impedance. The

electromagnetic properties of the medium material affect the distribution of these induced eddy currents, which changes the parameters of the measuring coil compared to the reference material. During the modeling process, the parameters of the signal measured on the secondary winding of the electromagnetic transducer were determined when the characteristics of the studied medium changed. At the same time, changes in the ratio of minerals in the composition of iron ore varieties were simulated. Analysis of the results obtained shows their strong dependence on the magnetite content in the studied medium. This complicates the recognition of iron ore varieties that include other weakly magnetic minerals with low electrical conductivity. To obtain satisfactory results from this procedure, it is necessary to include additional characteristic features of the physical properties of the object being recognized, which primarily include the parameters of the propagation of ultrasonic waves formed during the formation of an electromagnetic pulse in ferromagnetic rock.

Keywords: *drilling, model, control, automation, characteristics, electromagnetic converter.*

Моркун Володимир Станіславович - д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пир), <https://orcid.org/0000-0003-1506-9759>, morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), <https://orcid.org/0000-0002-1261-1170>, nmorkun@gmail.com.

Поркуян Ольга Вікторівна – д-р техн. наук, проф., ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), <https://orcid.org/0000-0002-4046-0998>, porkuian@snu.edu.ua.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), <https://orcid.org/0009-0002-0582-4140>, grischenckokgtl@gmail.com.

Дата першого надходження статті 16.01.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-70-74>

УДК 681.5:631.5:004.89:519.87

ЦИФРОВЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЯК КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛИЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ

Сотнікова Т.Г., Анікєєв М.А.

DIGITAL EXPERIMENTAL ENVIRONMENT AS A CONCEPT FOR IMPROVING GREENHOUSE MICROCLIMATE CONTROL EFFICIENCY

Sotnikova T.H., Anikieiev M.A.

У статті запропоновано концепцію цифрового експериментального середовища (*digital experimental environment*) для дослідження та вдосконалення систем керування мікрокліматом теплиць. Необхідність такого підходу зумовлена складністю сучасних тепличних об'єктів, для яких важливим є одночасне забезпечення агротехнічно необхідних параметрів середовища, зниження енергоспоживання, економічної ефективності та екологічної прийнятності технологічних рішень. Застосування цифрового середовища дає змогу проводити багаторазове відпрацювання алгоритмів керування, аналізувати динаміку процесів і оцінювати наслідки зміни режимів без втручання в роботу реального обладнання.

Запропонований підхід поєднує засоби імітаційного моделювання, SCADA/HMI-візуалізацію, інструменти збору й оброблення експериментальних даних, а також оптимізаційні методи, орієнтовані на пошук раціональних режимів функціонування системи. Розглянуто ієрархічну структуру керування, у якій нижній рівень забезпечує стабілізацію основних параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості та концентрації CO₂, тоді як верхній рівень реалізує оптимізацію цільових функцій з урахуванням зовнішніх збурень, прогнозованих змін середовища та технічних обмежень. Як критерії оптимізації розглядаються витрати енергії, вартісні показники, а також умови, що впливають на продуктивність технологічного процесу.

У межах дослідження цифрове експериментальне середовище використано для відпрацювання сценаріїв керування тепловим контуром із теплообмінником, у якому джерелом теплоти є вторинна технологічна пара. Це дозволило

проаналізувати роботу системи в різних режимах, оцінити стійкість контурів регулювання та перевірити доцільність використання вторинних енергетичних ресурсів у тепличному господарстві. Показано, що застосування такого середовища підвищує відтворюваність експериментів, зменшує ризики впровадження нових алгоритмів у реальні умови експлуатації та створює основу для подальшого використання інтелектуальних методів аналізу й оптимізації, зокрема засобів штучного інтелекту, у системах керування тепличним мікрокліматом.

Ключові слова: теплиця, мікроклімат, цифрове експериментальне середовище, SCADA, енергоефективність.

Вступ. Тепличне виробництво є одним із найбільш технологічно насичених сегментів сучасного аграрного сектору. У керуванні мікрокліматом теплиці поєднуються біологічні цілі (стабільний ріст і якість продукції) та інженерні обмеження (інерційність системи, залежність від погоди, обмеження потужності, вартість енергоресурсів). В умовах зростання ціни енергії та посилення вимог до декарбонізації особливої ваги набуває перехід від «жорсткого» підтримання уставок до керування, орієнтованого на оптимум – тобто на компроміс між продуктивністю культури, витратами та екологічним слідом.

Окремою проблемою є практична перевірка керуючих алгоритмів. Реальна теплиця – складний об'єкт з істотною інерцією,

неповнотою вимірювань і ризиком втрати врожаю в разі помилки. Тому сучасні підходи дедалі частіше спираються на цифрові двійники, імітаційне моделювання, історичні дані та сценарне тестування. У цій роботі розвиток отримує саме такий підхід – створення цифрового експериментального середовища як проміжної ланки між теорією керування та промисловим впровадженням.

Мета і задачі. Метою є розширення концепції цифрового експериментального середовища для керування тепличним мікрокліматом з акцентом на енергоефективність і економічну доцільність. Для досягнення мети розв’язуються задачі:

1. формалізація ієрархічної структури керування мікрокліматом;
2. побудова математичних моделей теплового контуру й об’єкта керування;
3. інтеграція моделі з HMI/SCADA для відтворення режимів і збору даних;
4. визначення набору оптимізаційних критеріїв із включенням економічної компоненти (вартість енергії) та екологічної компоненти (ефективне використання вторинної теплоти).

Загальну ієрархію запропонованого підходу до керування тепличним комплексом наведено на рис. 1.



Рис. 1. Концептуальна ієрархія керування тепличним комплексом (нижній рівень – стабілізація, верхній – оптимізація)

Основна частина. Відповідно до оглядових досліджень з керування тепличним мікрокліматом, найбільш перспективним є поєднання багаторівневої структури керування з методами прогнозування та оптимізації. Нижній рівень реалізує контури стабілізації (PID/PI, логічні регулятори, локальні МРС-контури), тоді як верхній рівень формує уставки та обмеження на основі прогнозу погоди, стану культури, доступної енергії та економічних параметрів. Таким чином формується

керування, де «ціна енергії» або «доступність вторинної теплоти» стає таким же вхідним фактором, як і температура зовнішнього повітря.[5]

Базовим елементом цифрового експериментального середовища є модель динаміки температури в зоні рослин (або контрольованій зоні теплиці). У спрощеному вигляді тепловий баланс описується диференціальним рівнянням:

$$C_{eff} \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_i(t) - Q_{loss}(t) + Q_{dist}(t)$$

де C_{eff} – ефективна теплоємність контрольованого об’єму; T_i – температура в зоні керування; $Q_i(t)$ – підведена теплота (нагрів/охолодження); $Q_{loss}(t)$ – тепловтрати через огорожувальні конструкції та інфільтрацію; $Q_{dist}(t)$ – збурення, що пов’язані з вентиляцією, сонячною радіацією та внутрішніми тепловиділеннями. У межах середовища параметри C_{eff} та складові Q_{loss} , Q_{dist} можуть уточнюватися за експериментальними даними, що робить модель адаптивною та придатною для різних тепличних конструкцій.[2]

Екологічний і економічний контекст: вторинне тепло. Практична цінність цифрового середовища зростає, коли модель включає реальні джерела енергії та обмеження. У роботі розглянуто використання вторинної технологічної пари як джерела теплоти для нагріву повітря теплиці через теплообмінник. Такий підхід є типовим прикладом промислової симбіозності: відхідне тепло підприємства стає ресурсом агровиробництва, зменшуючи споживання первинного палива та пов’язані викиди.[10]

У сучасних умовах розвитку аграрного виробництва тепличні господарства дедалі частіше розглядаються не лише як інженерні споруди для захисту рослин від несприятливих зовнішніх факторів, а як складні техніко-біологічні системи, у яких поєднуються теплотехнічні, автоматизаційні та інформаційні процеси. Забезпечення стабільного мікроклімату в теплиці є необхідною умовою отримання прогнозованого врожаю високої якості, проте водночас потребує значних енергетичних витрат, основна частка яких припадає на системи опалення. Саме тому підвищення енергоефективності тепличних комплексів є одним із ключових напрямів їхнього технологічного розвитку. У межах даної

роботи теплиці розглядається як об'єкт автоматизованого керування, у якому теплозабезпечення реалізується на основі рекуперації вторинної технологічної теплової енергії. Такий підхід ґрунтується на використанні тепла, що утворюється в промислових технологічних процесах і зазвичай не використовується або втрачається в навколишнє середовище. Залучення вторинної технологічної пари до системи опалення теплиці дозволяє істотно знизити споживання первинних енергоресурсів, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність енергетичного балансу.

Принципову схему використання вторинної технологічної пари для теплопостачання теплиці наведено на рис. 2.

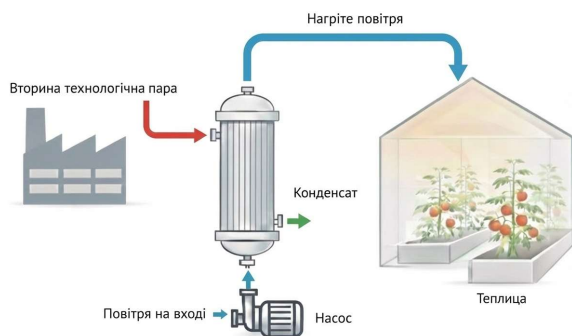


Рис. 2. Принципова схема використання вторинної технологічної пари для теплопостачання теплиці

Ключовим елементом такої системи є кожухотрубний теплообмінник, який виконує функцію теплотехнічної розв'язки між промисловим джерелом тепла та тепличним господарством. У теплообміннику теплота вторинної технологічної пари передається робочому теплоносію, що циркулює в замкненому контурі системи опалення теплиці. При цьому утворений у процесі теплопередачі конденсат відводиться та може бути повернутий у виробничий цикл, що додатково підвищує ресурсну ефективність системи. Така схема забезпечує безпечну інтеграцію промислового та аграрного об'єктів, мінімізуючи ризики прямого контакту технологічних середовищ.

У тепличному комплексі тепла енергія, отримана в теплообміннику, використовується для нагріву повітря та підтримання заданого температурного режиму в зоні росту рослин. Для цього застосовується система циркуляції теплоносія з використанням насосного обладнання, а також елементи повітророзподілу

та вентиляції, які забезпечують рівномірний розподіл тепла по об'єму теплиці. Вентиляційні системи виконують подвійну функцію: з одного боку, вони підтримують температурний баланс, а з іншого забезпечують необхідний повітрообмін, запобігаючи надмірному накопиченню вологи та продуктів життєдіяльності рослин.

Інтеграція з SCADA/HMI та цифровим стендом. Цифрове експериментальне середовище реалізується як зв'язка «імітаційна модель → система збору даних → HMI/SCADA-інтерфейс → модуль керування/оптимізації». Така композиція дозволяє:

1. відтворювати сценарії керування у прискореному масштабі часу;
2. перевіряти коректність сигналів та меж регуляторів;
3. накопичувати дані для подальшого аналізу та ідентифікації;
4. готувати інтерфейси оператора ще до запуску на об'єкті.

З практичного погляду це особливо важливо для тепличних систем, де «ціна помилки» вимірюється не лише енергією, а й врожаєм.[7]

Приклад візуалізації цифрового експериментального середовища у середовищі SCADA/HMI наведено на рис. 3.



Рис. 3. Візуалізація цифрового експериментального середовища: мнемосхема теплового контуру та тренди температур (SCADA/HMI)

Роль даних та моделей культури. Керування мікрокліматом має сенс лише у зв'язку з цільовою функцією культури: вегетаційний розвиток, урожайність та якість. Тому перспективні підходи поєднують моделі мікроклімату з моделями росту (фізіологічними або даними-орієнтованими). У цифровому середовищі це означає, що дані сенсорів (температура, вологість, CO₂, радіація, параметри поливу й живлення) перетворюються на індикатори стану культури, а далі – на оптимізаційні рішення щодо уставок.[1]

Узагальнену схему взаємодії факторів мікроклімату з ростом та розвитком рослин подано на рис. 4.

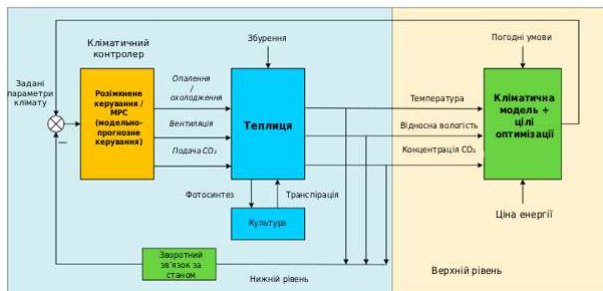


Рис. 4. Узагальнена схема взаємодії факторів мікроклімату з ростом та розвитком рослин

Економічно-оптимізаційний аспект у середовищі. На відміну від класичного регулювання, де метою є мінімізація відхилення від уставки, верхній рівень у цифровому середовищі може мінімізувати сукупну функцію витрат, наприклад:

$$J = \alpha \cdot E + \beta \cdot \Delta y + \gamma \cdot R,$$

де E – енергоспоживання (або його вартість за тарифом), Δy – відхилення ключових показників мікроклімату від оптимальних для культури, R – штраф за порушення обмежень (перегрів, конденсація, критична вологість тощо), а α , β , γ – вагові коефіцієнти. У такій постановці «економіка» вбудовується безпосередньо в алгоритм керування: за зростання тарифу або дефіциту тепла система шукає раціональні компроміси (зміна нічних уставок, перерозподіл вентиляції/подачі CO_2 , використання теплової інерції).[12]

Обговорення і співставлення з літературою. Оглядові роботи з використанням штучного інтелекту та ієрархічних алгоритмів у теплицях показують тенденцію до інтеграції МРС, прогнозування та цифрових двійників у єдину систему. Водночас практичний бар'єр часто полягає в доступності безпечного середовища для тестування й уніфікації даних. Запропоноване цифрове експериментальне середовище саме й покликане закрити цей розрив: воно формує структуру, де інженерні моделі, дані та інтерфейси оператора узгоджуються в одному контурі.

Висновки. Розвинено концепцію цифрового експериментального середовища для керування тепличним мікрокліматом як інструменту перевірки алгоритмів і підготовки промислового впровадження. Обґрунтовано

ієрархічну структуру керування, що поєднує стабілізацію параметрів та оптимізацію енергетичних/економічних критеріїв. Показано, що інтеграція моделі теплового контуру з SCADA/HMI забезпечує відтворюваність сценаріїв та накопичення даних. В роботі продемонстровано доцільність включення у модель джерел вторинної теплоти (технологічної пари) як екологічно й економічно значущого чинника. Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблення моделі культури, інтеграцію прогнозів погоди та застосування методів машинного навчання для адаптації параметрів і прийняття рішень у режимі реального часу.

Література

1. Chen J., et al. Artificial intelligence applications for greenhouse microclimate control: A survey. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 5. Art. 1388.
2. Masteika R., et al. Real-time optimization and control of greenhouse heating system using excess heat from server room. *Applied Energy*. 2023. Vol. 343. Art. 121190.
3. Анікєєв М. М. Комп'ютерно-інтегрована система керування тепличним мікрокліматом з використанням вторинної технологічної пари: магістерська робота. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2025.
4. van Straten G., van Willigenburg L., van Henten E. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
5. Körner O., Challa H. Process-based humidity control in greenhouse crops. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, No. 4. P. 457–469.
6. Hemming S. Use of models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*. 2008. Vol. 801. P. 383–392.
7. Марченко Д. Д. Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарської техніки: метод. рек. Миколаїв, 2021. 106 с.
8. Велика українська енциклопедія. Ам'ячна селітра. URL: https://vue.gov.ua/Ам'ячна_селітра (дата звернення: 15.05.2024).
9. Концевой А. Л. Технологія зв'язаного азоту і хімічних добрив: технологія та алгоритми розрахунків виробництва азотних добрив. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 227 с.
10. 76-а науково-практична конференція «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК». Київ: НУБіП України, 2023. 207 с.
11. Целіщев О. Б., Єлісєєв П. Й., Лорія М. Г., Захаров І. І. Математичне моделювання технологічних об'єктів: підручник. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту, 2011. 421 с.

12. Hemming S. Systematic design of greenhouse crop production systems. INCOSE, 2008. 15 p..

References

1. Chen J., et al. Artificial intelligence applications for greenhouse microclimate control: A survey. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 5. Art. 1388.
2. Masteika R., et al. Real-time optimization and control of greenhouse heating system using excess heat from server room. *Applied Energy*. 2023. Vol. 343. Art. 121190.
3. Anikieiev M. M. Kompiuterno-intehrovana systema keruvannia teplychnym mikroklimatom z vykorystanniam vtorynnoi tekhnolohichnoi pary: mahisterska robota. *Skhidnoukr. nats. un-t im. V. Dalia*, 2025.
4. van Straten G., van Willigenburg L., van Henten E. Optimal Control of Greenhouse Cultivation. Boca Raton: CRC Press, 2010.
5. Körner O., Challa H. Process-based humidity control in greenhouse crops. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, No. 4. P. 457–469.
6. Hemming S. Use of models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*. 2008. Vol. 801. P. 383–392.
7. Marchenko D. D. Elektroobladnannia ta zasoby avtomatyzatsii silskohospodarskoi tekhniki: metodychni rekomendatsii. Mykolaiv, 2021. 106 p.
8. Velyka ukrainska entsyklopediia. Amiachna selitra. URL: https://vue.gov.ua/Amiachna_selitra (accessed: 15.05.2024).
9. Kontsevoi A. L. Tekhnolohiia zviazanoho azotu i khimichnykh dobryv: tekhnolohiia ta alhorytmy rozrakhunkiv vyrobnytstva azotnykh dobryv. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 227 p.
10. 76-a nauково-praktychna konferentsiia “Enerhozabezpechennia, elektrotekhnolohii, elektrotekhnika ta intelektualni upravliaiuchi systemy v APK”. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 2023. 207 p.
11. Tselishchev O. B., Yelisieiev P. I., Loria M. H., Zakharov I. I. Matematychni modeliuvannia tekhnolohichnykh obektiv: pidruchnyk. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu, 2011. 421 p.
12. Hemming S. Systematic design of greenhouse crop production systems. INCOSE, 2008. 15 p..

Sotnikova T.H. Anikieiev M.A. Digital experimental environment as a concept for improving greenhouse microclimate control efficiency

The article substantiates the concept of a digital experimental environment as a tool for improving greenhouse microclimate control under current energy, economic, and environmental constraints. The study is motivated by the need to test advanced control strategies in a safe virtual space before their transfer to real greenhouse facilities, where errors may lead not only to

excessive energy consumption but also to crop losses. The proposed environment integrates simulation models, SCADA/HMI visualization, data acquisition modules, and hierarchical decision-making logic into a unified research and engineering framework.

The lower control level is intended for stabilization of key microclimate parameters, primarily temperature, humidity, and CO₂ concentration, whereas the upper level performs optimization of operating modes with regard to weather disturbances, crop requirements, technical limitations, and the cost of energy resources. Special attention is paid to the possibility of combining greenhouse climate models with crop-oriented indicators, which allows the transition from simple setpoint tracking to economically justified and biologically meaningful control. In this interpretation, the digital environment serves not only as a simulation tool but also as a prototype of a future digital twin for greenhouse production.

The paper also develops the practical idea of using secondary technological steam as an alternative heat source in greenhouse heating systems. The integration of waste-heat recovery into the digital environment makes it possible to assess the stability of thermal control loops, compare operating scenarios, and estimate the potential reduction in primary energy demand and environmental burden. The obtained results show that such an environment increases reproducibility of experiments, supports data-driven optimization, and creates a foundation for further implementation of model predictive control, machine learning, and artificial intelligence methods in greenhouse management. In addition, the proposed approach improves the preparation of operator interfaces, facilitates parameter identification from experimental data, and reduces the risks associated with direct full-scale trials in industrial greenhouse conditions.

Keywords: greenhouse microclimate, digital experimental environment, model predictive control, energy efficiency, SCADA, digital twin.

Сотнікова Тетяна Генадіївна – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, e-mail: sotnikova@snu.edu.ua, ORCID: [0000-0001-6929-7672](https://orcid.org/0000-0001-6929-7672)

Анікєєв Микита Андрійович – магістр кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, e-mail: atp-24dm-717@snu.edu.ua, ORCID: [0009-0003-4399-7752](https://orcid.org/0009-0003-4399-7752)

Дата першого надходження статті 23.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-75-81>

УДК 614.844; 614.845

ПОШИРЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ АЕРОЗОЛІВ В ОБ'ЄМІ

Баланюк В.М., Гірський О.І.

SPREAD OF FIRE-EXTINGUISHING AEROSOLS IN VOLUME

Balanyuk V.M., Hirskyi O.I.

У статті досліджено особливості поширення аерозольних вогнегасних речовин у замкнених приміщеннях зі складною об'ємно-планувальною структурою. Розглянуто вплив геометрії приміщень, наявності перегородок, меблів, дверних прорізів і вентиляційних каналів на формування концентраційних полів діоксиду вуглецю та вогнегасних аерозолів. Проаналізовано відмінності механізмів переносу газо-твердофазних аерозольних систем, зокрема роль конвективного переносу, турбулентного перемішування та дифузійних процесів у формуванні зон ефективного та неефективного пожежогасіння. Показано, що для аерозольних агентів визначальним чинником є гравітаційне осадження частинок, яке зумовлює просторову нерівномірність концентрації та обмежує тривалість ефективної фази гасіння. Особливу увагу приділено аналізу витоків вогнегасних агентів через дверні прорізи й вентиляційні шахти та їх впливу на зниження ефективності систем об'ємного пожежогасіння. Встановлено, що ефективність об'ємного аерозольного пожежогасіння як правило визначається рівномірністю розподілу вогнегасної речовини в приміщенні, швидкістю досягнення розрахункової концентрації та здатністю аерозолію проникати у важкодоступні зони. При цьому на характер поширення аерозолію істотно впливають розмір і форма частинок, початкова швидкість викиду, розташування джерела подачі, а також наявність перешкод і внутрішніх перегородок. При розгляді механізму поширення вогнегасного аерозолію за меблями, було виявлено, що меблі та технологічне обладнання створюють так звану аеродинамічну тінь, у межах якої інтенсивність конвективного переносу зменшується і як наслідок вогнегасна концентрація знижується, що приводить до збільшення часу гасіння. Як наслідок, за масивними меблями можуть формуватися локальні зони з

концентрацією аерозолію нижчою за вогнегасну, що призводить до зниження локальної ефективності пожежогасіння.

Обґрунтовано доцільність застосування чисельного моделювання для прогнозування поведінки вогнегасних агентів у реальних умовах експлуатації, оптимізації розміщення джерел подачі та підвищення ефективності автоматичних систем газового й аерозольного пожежогасіння в приміщеннях зі складною конфігурацією.

Ключові слова: Об'ємне гасіння, вогнегасні аерозолі, діоксид вуглецю, замкнені приміщення.

Вступ. Реальні пожежі характеризуються складним плануванням та геометрією приміщень, наявністю певних перегородок, меблів, дверних прорізів, вентиляційних каналів та інших об'ємно-планувальних особливостей приміщень. Через це експериментальні дослідження занадто дорогі, трудомісткі та часто з обмеженими з точки зору відтворюваності.

У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях усе більшого поширення набувають чисельні методи моделювання процесів пожежогасіння, які дозволяють аналізувати поведінку вогнегасних аерозолів у замкнених об'ємах з урахуванням реальної геометрії приміщень та різноманітних сценаріїв розвитку пожежі.

Ефективність об'ємного аерозольного пожежогасіння як правило визначається рівномірністю розподілу вогнегасної речовини в приміщенні, швидкістю досягнення розрахункової концентрації та здатністю аерозолію проникати у важкодоступні зони. При

цьому на характер поширення аерозолів істотно впливають розмір і форма частинок, початкова швидкість викиду, розташування джерела подачі, а також наявність перешкод і внутрішніх перегородок [1].

Таким чином, дослідження закономірностей поширення вогнегасних аерозолів в об'ємі приміщень є актуальною науково-практичною задачею, спрямованою на підвищення ефективності автоматичних систем об'ємного та локального пожежогасіння та обґрунтування їх проектних параметрів. Отримані результати можуть бути використані як для вдосконалення існуючих нормативних вимог, так і для оптимізації конструктивних та режимних характеристик систем пожежогасіння з урахуванням реальних умов експлуатації [2,3].

Постановка задачі. Поширення вогнегасного аерозолів у приміщенні різного призначення є непростим багатофакторним процесом, який визначається дією декількох фізико-хімічних механізмів, а саме молекулярною дифузією, конвекцією, турбулентністю, гравітаційним осіданням та іншими процесами. Будь-який із цих чинників впливає на швидкість перенесення частинок, характер їх розподілу в об'ємі приміщення та тривалість збереження вогнегасної концентрації.

Сучасні системи пожежогасіння широко використовують вогнегасні аерозольні засоби завдяки їхній здатності швидко гасити дифузійне полум'я, створюючи газотвердофазну суміш, яка інгібує хімічні реакції горіння та частково охолоджує осередок пожежі. Проте ефективність засобів пожежогасіння залежить від розподілу вогнегасного аерозолів в об'ємі приміщення, а також від того, наскільки рівномірно досягається мінімальна ефективна концентрація у всіх зонах, включно з важкодоступними чи зонально обмеженими ділянками. Ці питання стають особливо актуальними в умовах складної геометрії приміщень, наявності перешкод та турбулентних потоків, що виникають під впливом систем вентиляції чи конструктивних елементів.

Викладення основного матеріалу. Пожежі в замкнених об'ємах можуть ефективно гаситися аерозольними речовинами, які утворюють тонкодисперсну газотвердофазну суміш і забезпечують інгібування реакцій горіння в об'ємі приміщення [4]. З огляду на різний фізичний стан і механізм дії зазначених агентів, процеси їх поширення в замкнених просторах мають певні особливості. Для

аерозольних вогнегасних речовин визначальними є газодинамічні процеси формування концентраційних полів і витоку агента через нещільності, а також суттєву роль відіграють дисперсність частинок і процеси їх осадження [5]. Серед аерозольних вогнегасних речовин особливе місце займають піротехнічні аерозольотворювальні сполуки, які при горінні утворюють вогнегасний аерозоль, який широко застосовується для гасіння пожеж у замкнених приміщеннях. Ефективність його використання залежить від герметичності об'єму, оскільки наявність отворів, дверей, вентиляційних шахт та інших каналів витоку істотно впливає на досягнення та утримання вогнегасної концентрації.

Моделювання пожежі при гасінні аерозолем у замкнених просторах ґрунтується на поєднанні газодинамічних, теплових та хімічних процесів, які змінюються у часі. В момент утворення аерозолів володіє високою температурою та спливає в верхню частину об'єму. При аерозольному пожежогасінні ключову роль відіграє дисперсний склад частинок, а також визначальним є часовий характер стабілізації концентрації аерозолів в момент його утворення коли він при охолодженні заповнює об'єм та забезпечує перерозподіл газових сумішей у приміщенні [6,7].

В початковий період: розвиток пожежі до запуску системи пожежогасіння моделюється вільний розвиток пожежі без впливу вогнегасного аерозолів. У цей період визначальними є: швидкість тепловиділення, утворення конвективних потоків, формування температурної стратифікації, споживання кисню в зоні горіння. У чисельних моделях, цей етап задає початкові умови: розміри температурних полів, концентрацію кисню, напрямки потоків. Саме ці параметри істотно впливають на подальшу ефективність гасіння аерозолів, оскільки високі температури створюють потужні конвективні висхідні потоки, які можуть перешкоджати рівномірному заповненню приміщення аерозолем. Після вивільнення аерозолів іде утворення стійкої аерозольної структури яка формується в визначеному об'ємі та залишається стабільною до 20-35 хвилин. Протягом цього часу в об'ємі залишається вогнегасна концентрація, параметри котрої незначно змінюються в зазначеному проміжку часу.

В момент гасіння коли аерозоль надто швидко заповнює захищуваний об'єм відбувається створення надлишкового тиску.

Саме у цей момент відбуваються: інтенсивне турбулентне перемішування; та можливе локальне різке зниження концентрації аерозолі, його часткове охолодження. Це ж саме явище може виникати при гасінні CO_2 через його розширення [8].

Моделювання показує [5-8], що ефективність гасіння на цій стадії визначається не лише кількістю аерозолі, а й швидкістю його подачі. Занадто повільна інжекція може призводити до витоку аерозолі через прорізи й вентиляційні канали, тоді як надто інтенсивна — до нерівномірного розподілу концентрації та зонального дефіциту вогнегасної речовини [9].

Після завершення активної подачі аерозолі система переходить у фазу утримання вогнегасної концентрації. У цей період ключовим є забезпечення умов, за яких об'ємна концентрація залишається стабільною у всьому об'ємі та не відбувається повторне займання. З позиції ефективності гасіння це найбільш чутливий етап, оскільки навіть незначні втрати аерозолі через дверні прорізи або вентиляційні шахти можуть призвести до локального відновлення горіння. Саме тут найбільш проявляється вплив герметичності приміщення та конфігурації сполучених об'ємів [10]. В завершальний період відбувається дегазація та процеси після пожежі. Останній часовий період пов'язаний із поступовим зниженням концентрації аерозолі внаслідок його осідання – седиментації та втрати його частини внаслідок природного або примусового повітрообміну. З погляду пожежної безпеки цей етап не впливає на сам факт гасіння, однак є критичним з точки зору безпеки персоналу, часу допустимого перебування людей та повторного доступу до приміщення.

Вогнегасний аерозоль у замкненому приміщенні являє собою газо-твердофазну систему, поширення якої визначається поєднанням конвективного переносу, турбулентної дифузії та осадження твердих частинок під дією гравітації. На відміну від газових агентів, концентраційне поле аерозолі є просторово неоднорідним, що призводить до формування зон зниженої ефективності пожежогасіння. Ключова відмінність від CO_2 це те, що аерозоль не поводить як ідеальний газ, тому за перегородками та меблями можливі «тіньові зони» [11]. Після активації аерозольної системи у приміщенні формується хмара з мікродисперсних частинок, які зважені у повітряному середовищі. Поширення аерозольних частинок у просторі визначається

взаємодією кількох фізичних процесів: турбулентного перемішування, дифузійного переносу, інерційних сил та гравітаційного осадження. Частинки розмірами від 1 до 10 мкм мають достатню рухливість для заповнення обсягу приміщення, але одночасно значною мірою піддаються осіданню з часом, що призводить до зниження концентрації вогнегасного агента у повітрі. Після розподілу у повітряному середовищі аерозольні частинки з часом осідають під дією гравітаційних сил, що призводить до зниження їхньої концентрації у повітрі. Це відрізняє аерозолі від газів, оскільки зменшення концентрації впливає на тривалість ефективної фази гасіння. Відмінною особливістю аерозолів є те, що їх поширення через дверні прорізи відбувається іншим чином, ніж для газових агентів. За рахунок більшої маси частинок та інерційних ефектів вони мають меншу здатність до витоку через відкриті двері порівняно з легкими газами. Частина частинок може осідати на кромках прорізів або у їх межах, що зменшує масовий потік речовини у суміжні приміщення [12].

З метою виявлення особливостей та параметрів поширення об'ємної вогнегасної речовини, зокрема аерозолі нами було проведено експеримент з виявлення особливостей та параметрів поширення вогнегасного аерозолі в об'ємі за перегородки з різною площею. Для цього було використано камеру розмірами $2 \times 0,5 \times 0,5$. В камері було розташовано перегородки розміром $0,5 \text{ м} \times 0,2 \text{ м}$, $0,5 \text{ м} \times 0,3 \text{ м}$, та $0,5 \text{ м} \times 0,4 \text{ м}$. Згідно цієї методики було проведено визначення зазначених параметрів в наступному порядку. Спочатку в камеру поміщали 1-й тигель з н-гептаном, який підпалювали, встановивши посеред камери відповідні перегородки, потім 2-й тигель, який теж підпалювали і після чого встановлювали заряд аерозолеутворювальної сполуки, яку після 30 секунд горіння тиглів теж підпалювали. Після того фіксували час гасіння тиглів. Дані заносили в таблиці.

Дані наведені в таблиці отримані з розкадровки відеозаписів експерименту, дані котрих частково показано на розкадровках Рис. На рисунку показано розкадровки дослідження при гасінні тиглів з розташуванням перегородки посередині. Рис. (поз 1.1., 1.2) та з розташуванням трьох перегородок з більшої до меншої в кінці камери Рис., позиція 2.1.-2.3.

Таблиця

Результати експерименту з визначення ефективності гасіння н-гептану за перегородками

№	Місце встановлення та розмір перегородки	Час гасіння тиглів с.	Примітка
1	Посередині, біля стінки. 0,2*0,5м	1 тиг - 14 2 тиг - 12	Відбулось інтенсивне перемішування роз приділення аерозольної хмари в верхній частині. Рис.1 (поз.1.1.,-1.2)
2	Посередині, біля стінки. 0,3*0,5м	1 тиг – 11 2 тиг - 15	Спостерігалось інтенсивне перемішування роз приділення роз приділення аерозолі навіть після гасіння.
3	Посередині, біля стінки. 0,4*0,5м	1 тиг – 7 2 тиг - 17	Спостерігалось менш інтенсивне перемішування роз приділення аерозолі.
4	Послідовно розташовані від великої до малої перегородки	1 тиг – 18 2 тиг – 22 3 тиг – 25	Спостерігалось інтенсивне перемішування аерозолі через верхню частину приміщення навіть після гасіння.

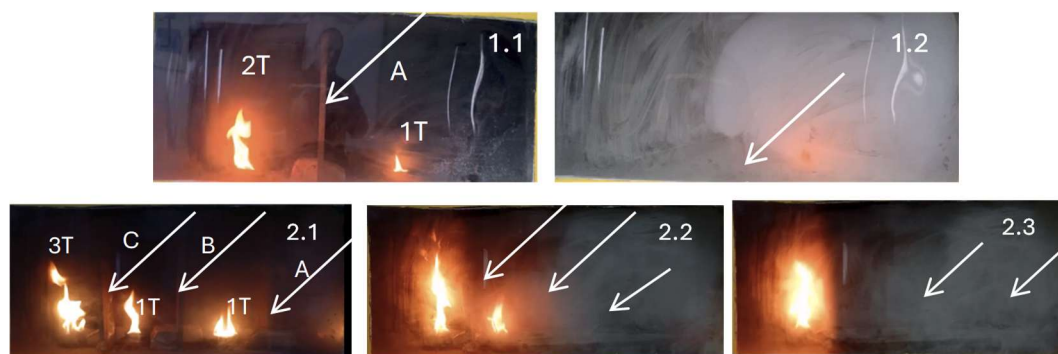


Рис. Розкадровки дослідження гасіння тиглів при розташуванні перегородок всередині камери

На рисунку показано позиції розташування перегородок. На позиції 1.1., стрілкою вказано місце розташування перегородки розмірами 0,2м., на 0,5 м. Виразами 1Т та 2Т позначено місця розташування тиглів в камері. На позиції 2.1-2.3 вказано місце розташування перегородок – А розміром 0,5 на 0,2м, В - розміром 0,5 на 0,3м., та С розміром 0,5 на 0,4м.

Таким чином, виходячи з результатів проведеного експерименту виявлено, із збільшенням розмірів площі перегородки час гасіння у всіх дослідях першого тигля був найменшим, а другого – більшим, при цьому ця величина залежала від площі самої перегородки. У всіх дослідях гасіння тигля відбувалось, коли аерозоль проникав в сусіднє відділення та створював там вогнегасну концентрацію. При цьому цілком логічно було отримано результат коли найдальша та найбільша перегородка найбільше стримувала поширення аерозолі, а час гасіння при цьому зростав – Табл. П 3 та П. 5. З них видно, що час гасіння при використанні перегородки з найбільшою площею зростав відповідно до 17 та 55 секунд. Загалом

спостерігалась явище збільшення часу гасіння, коли остання перегородка мала найбільшу площу – максимальний час гасіння – 55 секунд. І коли перегородки розташовані в зворотньому порядку тобто спочатку перегородка максимальної площі потім по мірі зменшення площі, то відповідно час гасіння становив 25 секунд. Таким чином, можна зробити деякі заключення щодо поширення вогнегасного аерозолі, а саме, при послідовному розташуванні перегородок від більшої до меншої, час гасіння значно зріс для всіх тиглів до 55 секунд при трьох перегородках та 17 секунд при одній перегородці, що вказує на утруднене поширення аерозолі.

Щодо способу поширення потоків аерозолі то інтенсивне перемішування аерозольної хмари спостерігалось у випадках з меншою перегородкою до, та після гасіння при найбільшій перегородці. Відповідно із збільшенням площі перегородки, аерозоль ефективніше гасить перший тигель, але гірше гасить наступний, при цьому мала перегородка забезпечує більш рівномірний розподіл

аерозолі між двома осередками. Велика перегородка створює ефект локалізації, в результаті концентрація аерозолі короткочасно підвищується значно вище за вогнегасну концентрацію відповідно перший тигель гаситься швидко, другий – пізніше, після досягнення вогнегасної концентрації.

Отже, досліджуючи розповсюдження вогнегасного аерозолі, було виявлено що наявність перегородок призводить до значного витоку аерозолі та винесення твердих частинок у суміжні приміщення. Проведений експеримент показав, що через отвори переважно підйом повітряних потоків у вентиляційних шахтах може також сприяти переносу аерозолі на інші рівні будівлі, створюючи потенційні небезпеки та порушуючи умови локального пожежогасіння. Нормативні документи EN 15004-8 та [ДСТУ EN 15276-1:2021](#) (EN 15276-1:2019, IDT) [7] рекомендують враховувати вплив вентиляційних систем під час проектування та випробувань аерозольних систем [13]. Також було визначено, що перегородки змінюють структуру потоку, викликаючи появу зон рециркуляції та застійних областей за перешкодами. У цих зонах концентрація аерозольних частинок може зменшуватися у 1,5–3 рази порівняно з відкритим простором, що негативно впливає на досягнення мінімальної ефективної концентрації гасіння [14]. Таким чином, розглядаючи поширення вогнегасного аерозолі за меблями, було виявлено, що меблі та технологічне обладнання створюють так звану аеродинамічну тінь, у межах якої інтенсивність конвективного переносу зменшується і як наслідок вогнегасна концентрація знижується що приводить до збільшення часу гасіння. Як наслідок, за масивними меблями можуть формуватися локальні зони з концентрацією аерозолі нижчою за вогнегасну, що призводить до зниження локальної ефективності пожежогасіння [5].

Висновки. У результаті проведеного аналізу, досліджено особливості поширення вогнегасних аерозолів у замкнених приміщеннях зі складною геометрією. Показано, що ефективність аерозольного пожежогасіння, істотно залежить від герметичності об'єму та здатності підтримувати необхідну вогнегасну концентрацію, при цьому сам процес поширення аерозолі характеризуються газотвердофазним механізмом поширення з гравітаційним

осадженням частинок і просторовою нерівномірністю концентрацій. Експериментально встановлено, що наявність перегородок, меблів і дверних прорізів суттєво впливає на розподіл вогнегасного аерозолі та тривалість його ефективної дії, що підтверджує необхідність застосування чисельного моделювання при проектуванні систем об'ємного пожежогасіння в реальних умовах експлуатації.

Література

1. Chow, W. K. Дослідження пожеж у закритих камерах. *Журнал пожежних наук*. 1995. Т. 13, № 2. С. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201
2. ДСТУ EN 15276-1:2021. Стационарні системи пожежогасіння. Системи аерозольного пожежогасіння. Частина 1. Вимоги до компонентів і методи їх випробування (EN 15276-1:2019, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95761
3. Zhou, J., Chan, N. K. Чисельне дослідження розподілу концентрації CO₂ в квартирі. *Внутрішнє та антропогенне середовище*. 2010. Т. 20, № 1. С. 91–100. DOI: 10.1177/1420326X10390670
4. McGrattan, K., Bilson, M. Моделювання поздовжньої вентиляції в тунелях за допомогою симулятора пожежної динаміки. *Журнал пожежної безпеки*. 2023. Т. 141. Стаття 103982. ISSN 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103982>
5. Su, Z., Li, Y., Luo, R., Zhong, H., Li, J., Geng, Z., Guo, Z. Механізм розливу шлейфів із кількох отворів на розподіл температури стелі під час пожеж у тунелях метро на основі принципу суперпозиції. *Тунелювання та підземна космічна технологія*. 2025. Т. 158. Стаття 106412. ISSN 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106412>
6. Li, H., Zhang, G., Jia, B., Zhu, G., Guo, D., Zhang, P. Експериментальне дослідження вогнегасних характеристик рідкого азоту в підземному довгому та вузькому просторі. *Тунелювання та підземні космічні технології*. 2021. Т. 114. Стаття 104009. ISSN 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104009>
7. Лі, К., Лю, К., Лу, К., Тан, Л., Ву, Д., Хуан, Х. Вплив прямокутних перешкод на характеристики потоку ультрадисперсного сухого порошкового вогнегасного агента в замкнутих просторах. *Пожежна*. 2025. Т. 8, № 6. С. 236. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8060236>
8. Du, X., Wang, T., Zhao, J., Yu, Z., Zhang, H. Дослідження ефективності змішування ультратонких сухих порошкових вогнегасних агентів у різних зонах рециркуляції перешкод

- гондол літаків. *Безпека процесу та захист навколишнього середовища*. 2026. Т. 206. Стаття 108344. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108344>
9. Hu, X., Kraayeveld, A. Експериментальне та чисельне дослідження вогнегасної ефективності інертних газів у негерметичному корпусі. *Енергії*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124323>
 10. Баланюк, В. М., Козяр, Н. М., Гарасим'юк, О. І. Використання газоаерозольних порошкових вогнегасних сумішей для захисту запалювальних сумішей. *Science Rise*. 2016. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69333
 11. Fan, W. P., Gao, Y., Zhang, Y. M., Chou, C. L., Chow, W. K. Експериментальні дослідження та моделювання швидкості полум'я при турбулентній дефлаграції у відкритій трубі. *Безпека процесу та захист навколишнього середовища*. 2019. Т. 129. С. 291–307. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.013>
 12. Zhang, X., Ismail, M. H., Ahmadun, F., Abdullah, N., He, K. Гарячі аерозольні вогнегасні речовини та пов'язані технології: огляд. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015.
 13. Hu, X., Kraayeveld, A. Експериментальне та чисельне дослідження вогнегасної ефективності інертних газів у негерметичному корпусі. *Енергії*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124323>
 14. Zhang, W.-B., Yin, Q., Liu, M.-R., Li, C.-Q., Wang, Z.-C., Hu, Z.-M. Дослідження ефективності випаровування та раптового охолодження гептафторпропану в збірних пристроях пожежогасіння на основі чисельного методу. *Пожарна*. 2025. Т. 8, № 4. Стаття 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8040124>
 5. Su, Z., Li, Y., Luo, R., Zhong, H., Li, J., Geng, Z., Guo, Z. Mekhanizm rozlyvu shleifiv iz kilkokh otvoriv na rozpodil temperatury steli pid chas pozhezh u tuneliakh metro na osnovi pryntsyphu superpozytsii. *Tuneliuvannia ta pidzemna kosmichna tekhnolohiia*. 2025. Т. 158. Стаття 106412. ISSN 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106412>
 6. Li, H., Zhang, G., Jia, B., Zhu, G., Guo, D., Zhang, P. Eksperymentalne doslidzhennia vohnehasnykh kharakterystyk rikdoho azotu v pidzemnomu dovhomu ta vuzkomu prostori. *Tuneliuvannia ta pidzemni kosmichni tekhnolohii*. 2021. Т. 114. Стаття 104009. ISSN 0886-7798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104009>
 7. Li, K., Liu, K., Lu, K., Tan, L., Vu, D., Khuan, X. Vplyv priamokutnykh pereshkod na kharakterystyky potoku ultradyspersnoho sukhoho poroshkovoho vohnehasnoho ahenta v zamknutykh prostorakh. *Pozhezhna*. 2025. Т. 8, № 6. С. 236. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8060236>
 8. Du, X., Wang, T., Zhao, J., Yu, Z., Zhang, H. Doslidzhennia efektyvnosti zmishuvannia ultratonkykh sukhykh poroshkovykh vohnehasnykh ahentiv u riznykh zonakh retsyrkuliatsii pereshkod hondol litaktiv. *Bezpeka protsesu ta zakhyst navkolyshnoho seredovyscha*. 2026. Т. 206. Стаття 108344. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108344>
 9. Hu, X., Kraayeveld, A. Eksperymentalne ta chyselne doslidzhennia vohnehasnoi efektyvnosti inertnykh haziv u nehermetychnomu korpusi. *Enerhii*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124323>
 10. Balaniuk, V. M., Koziar, N. M., Harasymyuk, O. I. Vykorystannia hazoaerozolnykh poroshkovykh vohnehasnykh sumishei dlia zakhystu zapaliuvalnykh sumishei. *ScienceRise*. 2016. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69333
 11. Fan, W. P., Gao, Y., Zhang, Y. M., Chou, C. L., Chow, W. K. Eksperymentalni doslidzhennia ta modeliuvannia shvydkosti polumia pry turbulentnii deflatsii u vidkrytii trubi. *Bezpeka protsesu ta zakhyst navkolyshnoho seredovyscha*. 2019. Т. 129. С. 291–307. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.013>
 12. Zhang, X., Ismail, M. H., Ahmadun, F., Abdullah, N., He, K. Hariachi aerzolni vohnehasni rehovyny ta poviazani tekhnolohii: ohliad. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015.
 13. Hu, X., Kraayeveld, A. Eksperymentalne ta chyselne doslidzhennia vohnehasnoi efektyvnosti inertnykh haziv u nehermetychnomu korpusi. *Enerhii*. 2022. Т. 15, № 12. Стаття 4323. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124323>
 14. Zhang, W.-B., Yin, Q., Liu, M.-R., Li, C.-Q., Wang, Z.-C., Hu, Z.-M. Doslidzhennia efektyvnosti vyparovuvannia ta raptovoho okholodzhennia heptaftorpropanu v zbirnykh prystroiakh pozhezhohasinnia na osnovi chyselnoho metodu.

References

1. Chow, W. K. Doslidzhennia pozhezh u zakrytykh kamerakh. *Zhurnal pozhezhnykh nauk*. 1995. Т. 13, № 2. С. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201
2. DSTU EN 15276-1:2021. Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Systemy aerzolnoho pozhezhohasinnia. Chastyna 1. Vymohy do komponentiv i metody yikh vyprovuvannia (EN 15276-1:2019, IDT). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.htmlid_doc=95761
3. Zhou, J., Chan, N. K. Chyselne doslidzhennia rozpodilu kontsentratsii SO₂ v kvartyri. *Vnutrishnie ta antropohenne seredovyshe*. 2010. Т. 20, № 1. С. 91–100. DOI: 10.1177/1420326X10390670
4. McGrattan, K., Bilson, M. Modeliuvannia pozdovzhnoi ventyliatsii v tuneliakh za dopomohoiu symuliatora pozhezhnoi dynamiky. *Zhurnal pozhezhnoi bezpeky*. 2023. Т. 141. Стаття 103982. ISSN 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103982>

Pozhezhna. 2025. Т. 8, № 4. Стаття 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8040124>

Balanyuk V.M., Hirskiy O.I. Spread of Fire Extinguishing Aerosols in Volume

The article investigates the peculiarities of the spread of aerosol fire-extinguishing agents in enclosed spaces with complex volumetric and planning structures. The influence of room geometry, the presence of partitions, furniture, door openings, and ventilation channels on the formation of concentration fields of carbon dioxide and fire-extinguishing aerosols is considered. Differences in the mechanisms of transfer of gas-solid-phase aerosol systems are analyzed, in particular the role of convective transport, turbulent mixing, and diffusion processes in the formation of zones of effective and ineffective fire suppression. It is shown that for aerosol agents, the determining factor is gravitational particle deposition, which causes spatial non-uniformity of concentration and limits the duration of the effective extinguishing phase. Special attention is paid to the analysis of leakage of fire-extinguishing agents through door openings and ventilation shafts and their impact on reducing the efficiency of volumetric fire suppression systems. It is established that the effectiveness of volumetric aerosol fire suppression is generally determined by the uniformity of distribution of the extinguishing substance in the room, the speed of reaching the calculated concentration, and the ability of the aerosol to penetrate into hard-to-reach zones. At the same time, the spread of the aerosol is significantly influenced by particle size and shape, initial ejection velocity, source location, as well as the presence of obstacles and internal partitions. When considering the

mechanism of aerosol spread behind furniture, it was found that furniture and technological equipment create so-called aerodynamic shadows, within which the intensity of convective transport decreases and, as a result, the extinguishing concentration is reduced, leading to an increase in extinguishing time. Consequently, behind massive furniture, local zones may form with aerosol concentrations lower than the extinguishing threshold, which reduces local fire suppression efficiency. The expediency of using numerical modeling to predict the behavior of fire-extinguishing agents under real operating conditions, optimize the placement of supply sources, and improve the efficiency of automatic gas and aerosol fire suppression systems in rooms with complex configurations is substantiated.

Keywords: volumetric suppression, fire-extinguishing aerosols, carbon dioxide, enclosed spaces.

Баланюк Володимир Мірчович – д.т.н., доц., професор кафедри фізики та хімії горіння Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

ORSID 0000-0003-0853-4229,

Bagr9111@gmail.com

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190445223>

Гірський Олег Ігорович – аспірант. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

ORSID 0000-0001-6225-0601.

Дата першого надходження статті 14.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-82-95>

УДК 678.026.027

ФОРМУВАННЯ ДВОХРІВНЕВИХ ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНИХ ТЕКСТУР НА ПОВЕРХНІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

Маковський Д.П., Миронюк О.В.

FORMATION OF TWO-LEVEL WATER-REPELLENT TEXTURES ON THE SURFACE OF POLYMER FILMS

Makovskiy D.P., Myronyuk O.V.

У роботі досліджено формування мікро- та ієрархічно текстурованих поверхонь полімерних плівок методом термовідтискання з використанням металевих шаблонів, отриманих фемтосекундною лазерною абляцією, а також проаналізовано вплив текстури й впавлених наночастинок на гідрофобні властивості матеріалів. Як модельні полімери використано поліетиленові (ПЕ) та поліетилентерефталатні (ПЕТ) плівки товщиною 200 мкм. Показано, що ПЕТ-плівки забезпечують найбільш точне та стабільне відтворення мікрорельєфу при прямому термовідтисканні з металевих матриць, тоді як для ПЕ характерні морфологічні дефекти, пов'язані з адгезією до металу та реологічними властивостями матеріалу. Запропоновано використання проміжних ПЕТ-реплік, що дозволяє покращити якість формування ПЕ-відбитків і зменшити негативний вплив метал-полімерної взаємодії. Встановлено, що сформовані мікротекстуровані поверхні демонструють виражену анізотропію змочування, а значення кутів змочування істотно залежать від орієнтації краплі відносно напрямку текстури. Текстуровання забезпечує суттєве підвищення гідрофобності як для гідрофобного ПЕ, так і для початково гідрофільного ПЕТ. Порівняння експериментальних даних із теоретичними розрахунками за моделлю Кассі-Бакстера показало перевищення експериментальних значень, що свідчить про формування додаткового субмікронного рівня шорсткості. Продемонстровано можливість створення ієрархічних поверхонь шляхом впавлення гідрофобізованих наночастинок пірогенного діоксиду кремнію безпосередньо під час процесу термовідтискання. Частинки ефективно фіксуються переважно у вершинах мікрорельєфу, формуючи додаткову нанотекстуру. Найвищі

гідрофобні показники отримано для негативних текстур ПЕТ із впавленими частинками, де досягаються стабільні супергідрофобні властивості з кутом змочування понад $156 \pm 3^\circ$. Отримані результати підтверджують перспективність поєднання термовідтискання та інтеграції наночастинок як масштабованого підходу до створення функціональних полімерних поверхонь із керованими водовідштовхувальними властивостями.

Ключові слова: мікротекстуровання; термовідтискання; поліетилен; поліетилентерефталат; гідрофобність; супергідрофобні поверхні;

Вступ. Текстуровані поверхні протягом останніх десятиліть перебувають у центрі підвищеної уваги наукової спільноти, оскільки поєднання мікро- чи нанотекстур з гідрофобністю матеріалу забезпечує високі показники водовідштовхувальної здатності за рахунок реалізації стану Касі-Бакстера [1]. Окрім власне водовідштовхування, значний інтерес становлять супутні ефекти - самоочищення та зниження адгезії льоду до таких поверхонь. Створено широкий спектр матеріалів, що демонструють супергідрофобність, тобто кут змочування понад 150° , а також надзвичайно низькі значення гістерезису кута змочування та кута скошування краплі [2].

Попри такі високі експлуатаційні характеристики, подібні поверхні мають низку суттєвих недоліків. Одним із ключових є їхня

нестійкість до дії різних чинників, зокрема конденсації вологи, тривалого ультрафіолетового опромінення чи контакту з рідинами низької поверхневої енергії. Ці впливи неминуче спричиняють перехід від змочування у стані Кассі до стану Вензеля через зменшення кількості оклюдованого в текстурі повітря. У результаті різко зростає гістерезис кута скочування, а кут змочування стрімко знижується - нерідко до значень менше ніж 110° , що фактично означає втрату поверхнею своїх унікальних властивостей [3].

Іншим істотним обмеженням є складність масштабування таких поверхонь. Перші дослідження, як і значна частина подальших робіт, були зосереджені на демонстрації можливості отримання супергідрофобних поверхонь, проте проблема промислової масштабованості залишалася поза увагою. Традиційні для таких матеріалів методи - газофазна конденсація, золь-гель технології, селективне лазерне травлення - є малоприсадибними для переходу до великих площ, що суттєво обмежує їхнє практичне застосування.

Перспективним підходом у цьому контексті є використання уже наявних промислових технологій, таких як тиснення, яке за принципом дії близьке до термопресування й дозволяє формувати на поверхні полімерних плівок мікророзмірні патерни, здатні забезпечувати високі показники водовідштовхування. Відомо також, що максимальну ефективність демонструють поверхні з ієрархічною структурою, а введення додаткової нанотекстури суттєво підсилює водовідштовхувальні властивості [4].

В якості вихідних поверхонь (шаблонів) для тиснення можуть бути використані текстуровані відповідно металеві поверхні з періодом патернів в межах 10-100 мкм, що відповідає розмірності реалізації аномалій змочування, зокрема, формуванню стабільного гетерогенного стану Касі. Одержання таких прецизійних шаблонів – нетривіальна задача, яка, втім, може бути вирішена за рахунок використання таких методів як фемтосекундна лазерна абляція або мікрофрезерування.

Хоча процес формування текстур тисненням на поверхні є достатньо вивченим, його аспекти при умові розмірності елементів текстури біля 10 мкм висвітлені недостатньо. Формування суб-текстур на таких поверхнях відбувається зазвичай за рахунок додаткової операції – нанесення золь-гель методом або

газофазним, що знижує можливості масштабування виробництва.

З огляду на викладене, доцільним є застосування полімерних плівок, на поверхні яких мікротекстуру формують методом термопресування з металевих шаблонів, що є легко маштабованим у промислових умовах. Додаткове створення ієрархічної наноструктури може бути забезпечене шляхом вплавлення наночастинок у поверхневий шар матеріалу.

Метою цієї роботи є дослідження можливості перенесення мікротекстур із металевих шаблонів, отриманих методом фемтосекундної лазерної абляції, на полімерні плівки, а також вивчення процесів формування додаткової нанотекстури шляхом вплавлення частинок і аналіз водовідштовхувальних властивостей отриманих матеріалів.

Матеріали і методи. Використовувалися полімерні плівки товщиною 200 мкм, а саме поліетиленова (ПЕ) плівка (Plastics, Україна) та поліетилентерефталатна (ПЕТ) плівка (Napex, Польща). Для модифікації поверхні застосовували гідрофобізований пірогенний діоксид кремнію AEROSIL R972 виробництва Evonik (Німеччина), поверхня якого оброблена диметилдихлорсиланом, що забезпечує знижену поверхневу енергію та підвищену гідрофобність покриттів. Формування мікрорельєфу на поверхні полімерних плівок здійснювали методом термовідтискання з використанням металевих шаблонів, отриманих методом фемтосекундної лазерної абляції. Процес гарячого пресування проводили на термопресі ПМО-45 виробництва МІКРОТЕХ (Україна) при контрольованих параметрах температури та тиску. Морфологію поверхні та якість відтворення мікроструктур аналізували методом оптичної мікроскопії з використанням мікроскопа Konus Academy, оснащеного цифровою камерою UCMOS 1300 (Sigeta Optics, Київ, Україна; програмне забезпечення ToprTek, Hangzhou, Zhejiang, Китай, версія 4.11.23945.2023.1121). Гідрофобні властивості отриманих поверхонь оцінювали шляхом вимірювання статичного кута змочування за допомогою приладу BGD 190 виробництва Biuged Precise Instruments (Guangzhou, Китай). Вимірювання проводили при кімнатній температурі, а наведені значення кута змочування є середніми за результатами щонайменше трьох незалежних вимірювань.

Основний матеріал. У роботі було використано серію металевих шаблонів, сформованих методом фемтосекундної лазерної

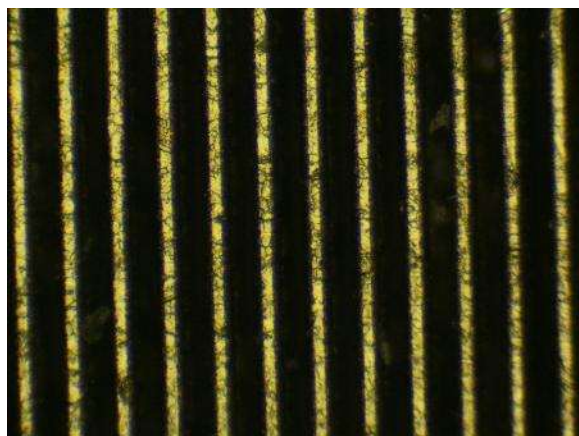
абляції, що забезпечує високоточне формування мікрорельєфу з мінімальною зоною термічного впливу. Надкоротка тривалість імпульсу зумовлює локалізований характер взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, що практично виключає розвиток виражених термічних деформацій, плавлення та повторної кристалізації поверхневих шарів. Такий підхід дозволяє отримувати мікроструктури з контрольованою геометрією та відтворюваними морфологічними характеристиками, що є принципово важливим для подальшого коректного аналізу процесів реплікації рельєфу в полімерних матеріалах [5]. На відміну від підходу, описаного в роботі [6], де лазерна обробка застосовувалась для формування переважно регулярних мікроканалів на поверхні, у даній роботі використовуються шаблони з більш вираженим рельєфом, що характеризується наявністю чітко сформованих западин та вершин текстури. Така геометрія створює своєрідну «рів-вершина» морфологію поверхні, яка спрощує подальше відтворення структури під час реплікації на полімерних плівках та сприяє формуванню більш ефективних водовідштовхувальних властивостей за рахунок утримання повітря у порожнинах текстури. Параметри процесу обробки описані в нашій попередній роботі [7].

Для подальших експериментів було обрано зразок текстури з характерними розмірами структурних елементів 20×60 мкм; мікрофотографії відповідних шаблонів наведені на рис. 1. Поверхня характеризується періодично впорядкованою структурою типу

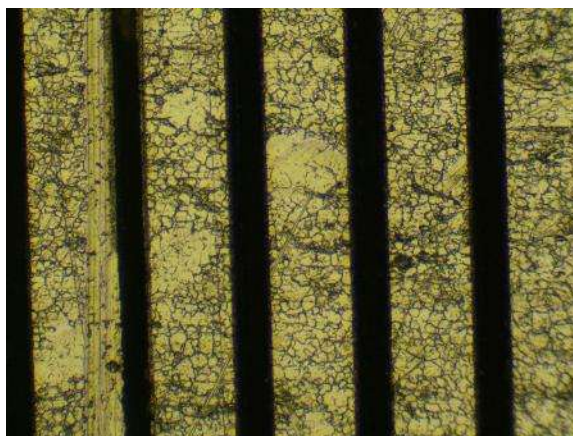
«вершини-канавки», яка формує анізотропний мікрорельєф із чітко вираженим напрямком періодичності. Така геометрія забезпечує різну поведінку поверхні залежно від орієнтації відносно напрямку структур, що є перспективним з точки зору керування змочуванням, адгезією та механічним зчепленням із полімерною матрицею під час термовідтискання.

Виявлені незначні морфологічні дефекти, зокрема локальні нерівності та поодинокі порушення чіткості країв канавок, є типовими для процесів лазерної абляційної обробки й пов'язані з особливостями видалення матеріалу та можливим частковим осадженням продуктів абляції. Водночас ці дефекти не мають системного характеру, не порушують загальної періодичності структури та не призводять до суттєвого спотворення геометрії елементів.

Були отримані відбитки з ПЕ-плівки товщиною 200 мкм на металевих шаблонах із використанням термопресу ПМО-45, оснащеного вбудованим датчиком тиску, що дозволяв підтримувати оптимальні параметри формування. Формування мікрорельєфу здійснювали при контрольованому нагріванні та прикладеному тиску, з часом утримання полімеру під пресом близько 1-2 хвилин. Оптимальною для формування з ПЕ виявилася температура 130°C , тоді як її подальше підвищення спричиняло суттєве зниження рівномірності відбитку за рахунок утворення дефектів типу волокон, що вірогідно зумовлено локальною адгезією розплаву.



а



б

Рис. 1. Металеві шаблони 20 на 40 (а) та 20 на 100 (б)

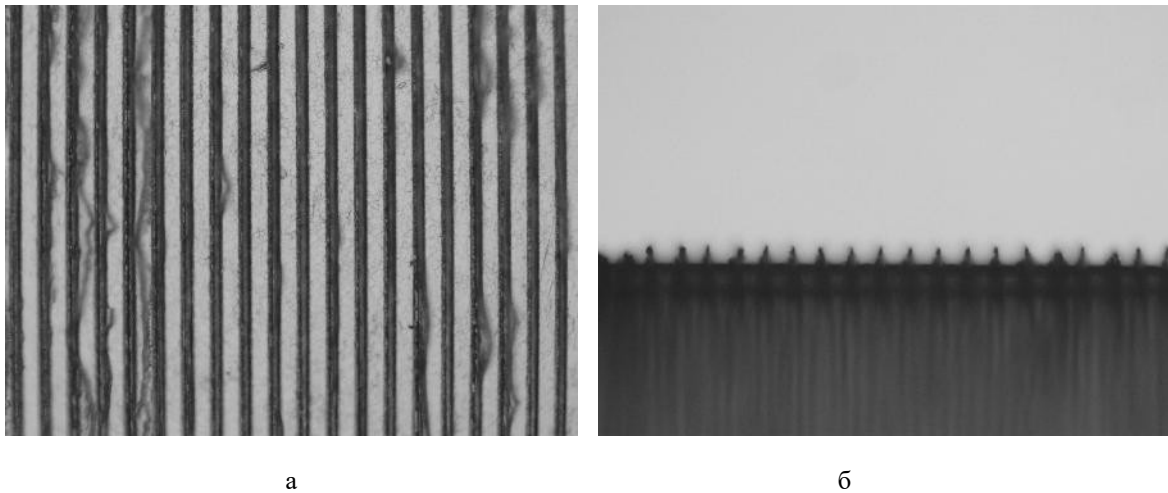


Рис. 2. Фото негативу з ПЕ вид згори (а), вид у профіль (б)

Мікрофотографії показують, що поверхня відбитків не є геометрично ідеальною: вершини структурних елементів мають конусоподібну або заокруглену форму за рахунок значної в'язкості розплаву при температурі формування, а висота та діаметр виступів варіюються, що може бути пов'язано з нерівномірним розподілом температури й тиску, а також із в'язкопружними властивостями ПЕ при термообробці. На зображеннях зверху видно характерний дефект - локальне виривання волокон або фрагментів полімеру, що призводить до утворення мікропорожнин і порушення цілісності рельєфу.

Таким чином, пряме формування відбитків ПЕ-плівки на металевих шаблонах забезпечує відтворення мікрорельєфу, однак супроводжується морфологічними дефектами, обумовленими реологічними властивостями полімеру та адгезійною взаємодією з металом. Це підкреслює доцільність подальшої оптимізації технологічних параметрів, включно з тиском, часом утримання та температурою, або використання проміжних реплік чи антиадгезійних покриттів для підвищення якості поверхні.

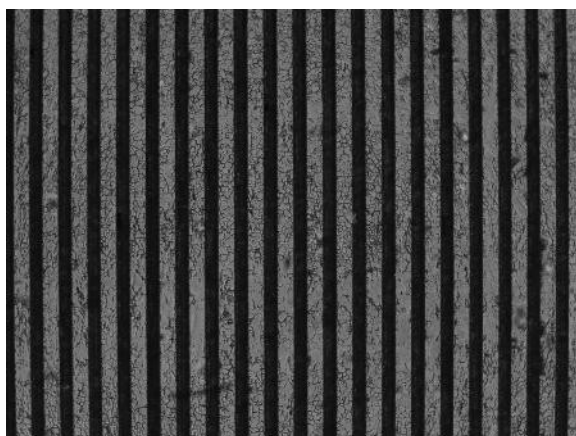
Наступна партія відбитків була виготовлена аналогічним методом термовідтискання на плівці ПЕТ при температурі 145°. Результати наведені на рис.3. На відміну від ПЕ, ПЕТ-плівка продемонструвала суттєво кращу відтворюваність мікрорельєфу та відсутність виражених морфологічних дефектів. Отримана поверхня характеризується чітким формуванням структур типу «канавки-виступи» з добре окресленими межами та стабільними геометричними параметрами по всій площі зразка. При цьому всі інші параметри процесу -

тиск та час утримання плівки під пресом (1-2 хвилини) - збігалися з режимом для ПЕ, тоді як оптимальною температурою для ПЕТ виявився діапазон 140-150 °С, що зумовлено більшою жорсткістю матеріалу.

Мікрофотографії свідчать про повне та коректне заповнення мікропорожнин металевого шаблону без ознак виривання матеріалу, розривів або пластичних деформацій поверхневого шару. Це може бути пов'язано з вищою жорсткістю та кращою розмірною стабільністю ПЕТ порівняно з ПЕ, а також з менш вираженою адгезійною взаємодією з металовою поверхнею, що полегшує процес відділення зразка після формування.

Сформовані таким чином відбитки повністю повторюють текстуру шаблону з інверсією профілю, тобто є його негативним відображенням. У подальшому ці зразки будуть позначатися як негативи та використовуватися як проміжні репліки для отримання наступних копій мікроструктурованих поверхонь.

Крім того, було здійснено відбиток ПЕ плівки з використанням у ролі шаблону раніше отриманих ПЕТ-плівок (рис. 4). У даному випадку ПЕТ-плівка виконувала функцію вторинної матриці, що дало змогу реалізувати процес подвійного реплікування мікрорельєфу. Формування відбувалося за тих же параметрів тиску та часу утримання під пресом, що й для первинних відбитків, проте оптимальною температурою для цього процесу виявилася 120 °С. У результаті сформована текстура ПЕ-плівки відрізняється від первинних зразків, оскільки фактично є позитивним відтворенням копії, а не безпосереднім відбитком з початкового металевого шаблону.

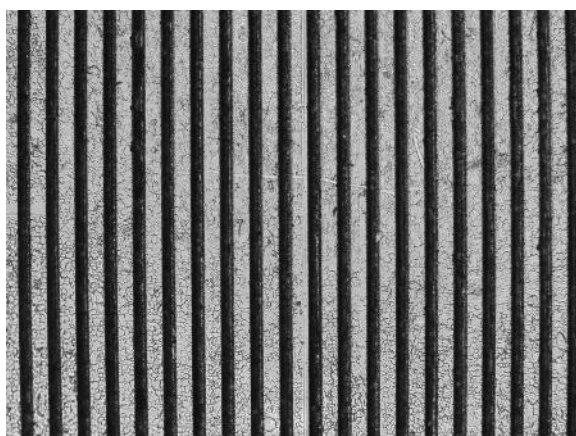


а

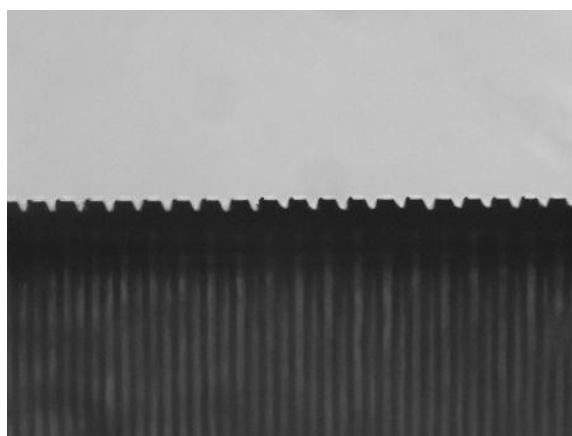


б

Рис. 3. Фото негативу ПЕТ вид згори (а), вид у профіль (б)



а



б

Рис. 4. Фото позитива ПЕ на шаблонах з ПЕТ вид згори (а), вид у профіль (б)

Аналіз мікрогеометрії поверхні показав, що форма виступів зазнала певної трансформації: якщо для первинних структур були характерні більш чітко окреслені та близькі до прямокутних або циліндричних елементів виступи, то у випадку вторинного копіювання їхня геометрія набула ознак усічених фігур. Зокрема, профіль виступів став більш подібним до трапецієподібного, із дещо розширеною основою та згладженими ребрами.

Водночас після проведення процесу реплікації ПЕТ-плівка, що використовувалася як шаблон, зберегла свої фізико-механічні властивості. Не спостерігалось суттєвих ознак деформації, руйнування мікроструктур або втрати цілісності поверхні, що свідчить про можливість її повторного використання в подібних технологічних циклах.

Порівняльний аналіз мікрофотографій усіх отриманих зразків показав суттєві відмінності у якості відтворення мікрорельєфу залежно від типу полімеру та способу реплікації. ПЕТ-плівки продемонстрували найбільш точне та стабільне копіювання текстури при прямому

формуванні з металевих шаблонів, виготовлених методом фемтосекундної лазерної абляції. Геометрія структур типу «вершини-канавки» відтворюється чітко, з добре збереженою періодичністю та однорідністю по всій площі зразка. Межі елементів залишаються виразними, без ознак розривів або матеріальних втрат, що свідчить про ефективне заповнення мікропорожнин шаблону та коректне відділення плівки після термовідтискання.

На відміну від ПЕТ, відбитки з ПЕ-плівки, отримані безпосередньо з металевих матриць, характеризуються нижчою морфологічною досконалістю. Для них притаманні певні спотворення геометрії виступів (зокрема конусоподібність замість чітко окресленого профілю), а також прояви адгезійної взаємодії з металом, що призводили до часткового пошкодження поверхневого шару під час зняття зразка. Це свідчить про те, що реологічні властивості ПЕ та його схильність до прилипання істотно впливають на якість формування мікроструктури при прямому контакті з металевим шаблоном.

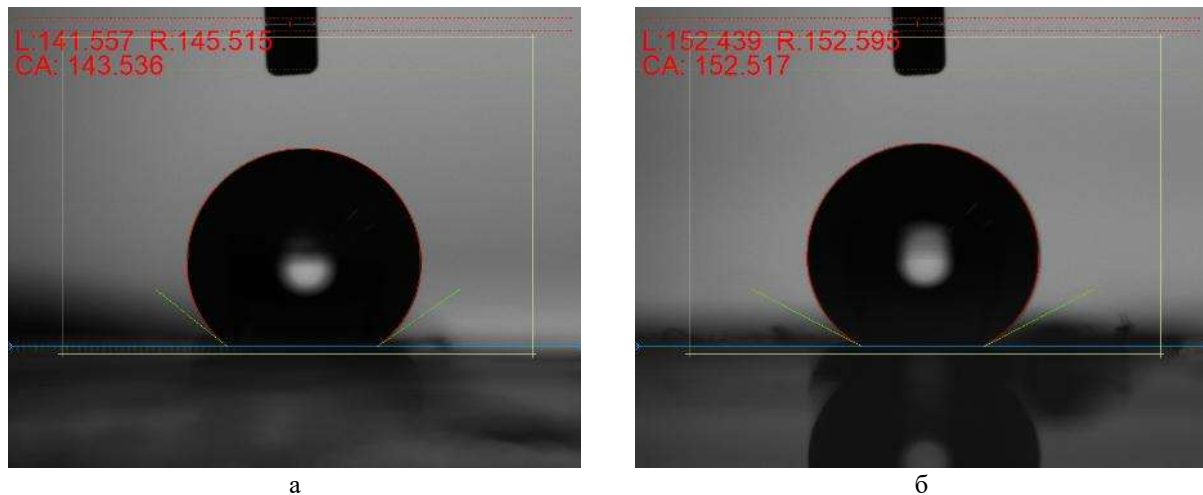


Рис. 5. Кут змочування негативу ПЕ поперечний(а), поздовжній(б)

Водночас застосування проміжної ПЕТ-репліки (негативу) для подальшого формування ПЕ-відбитків дозволило змінити характер поверхневої геометрії та зменшити вплив метал-полімерної адгезії. У таких зразках спостерігається більш впорядкована структура, хоча профіль елементів набуває ознак геометричної трансформації - виступи стають більш згладженими та наближеними до трапецієподібної форми. Це вказує на накопичення незначних відхилень геометрії при багатоетапному копіюванні, однак без критичної втрати періодичності чи анізотропності рельєфу.

Отже, серед усіх досліджених варіантів саме ПЕТ-плівки при прямому термовідтисканні з металевих шаблонів забезпечують найвищу точність і відтворюваність мікроструктури, тоді як ПЕ потребує оптимізації умов формування або використання проміжних реплік для досягнення порівнянної якості поверхні.

Для кількісної характеристики морфологічних та гідрофобних властивостей отриманих поверхонь було проведено вимірювання кутів змочування методом сидячої краплі за допомогою приладу BGD 190. На поверхню зразків наносили декілька невеликих крапель дистильованої води при кімнатній температурі ($\sim 18^{\circ}\text{C}$), після чого програмне забезпечення приладу автоматично визначало значення кута змочування. Для кожного зразка виконували щонайменше п'ять незалежних вимірювань, що дозволяло мінімізувати випадкові похибки та отримати репрезентативні середні значення. У роботі наведено результати, які відповідають середньому значенню кута змочування.

Слід зазначити, що для текстурованих поверхонь значення кута змочування суттєво залежать від орієнтації краплі щодо напрямку перерізу мікрорельєфу - поздовжній або поперечний. У зв'язку з цим результати представлені для обох орієнтацій.

Для негативних відбитків ПЕ кут змочування при поперечному перерізу становив 143° , тоді як при поздовжньому - 152° (рис. 5). Це свідчить про наявність вираженого анізотропного ефекту змочування та демонструє, що у певному напрямку поверхня досягає значень, близьких до супергідрофобних.

Для негативних відбитків ПЕТ кут змочування при поперечному перерізу склав 138° (рис. 6). Вимірювання в поздовжньому перерізу виконати не вдалося через повне розтікання краплі вздовж текстури, що вказує на значне зниження кута змочування у цьому напрямку та локальну гідрофільність поверхні.

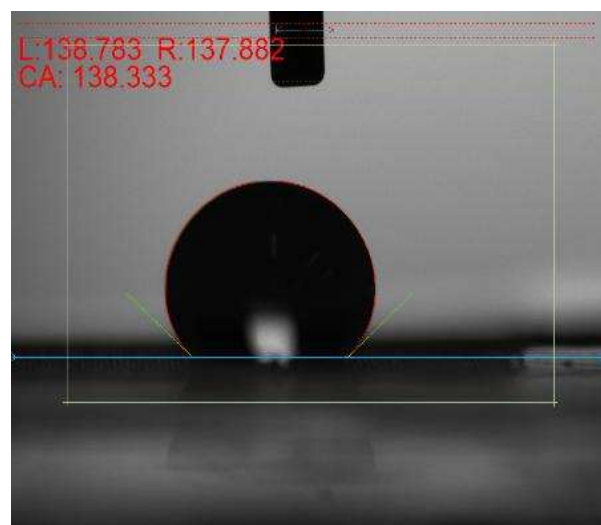


Рис. 6. Кут змочування негативу ПЕТ поперечний

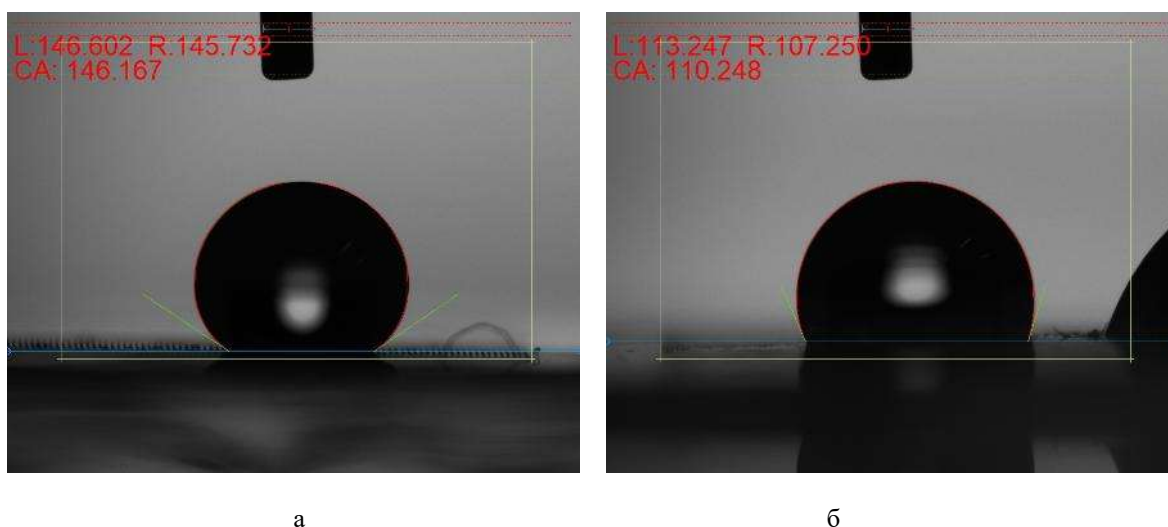


Рис. 7. Кут змочування позитиву ПЕ поперечний (а), поздовжній (б)

Для позитивних відбитків ПЕ кут змочування при поперечному перерізу становив 146° , тоді як при поздовжньому - 110° (рис. 7), що підтверджує анізотропність властивостей текстурованих поверхонь і суттєве зменшення змочуваності вздовж напрямку текстури.

Для порівняння також було виміряно кут змочування гладкої (нетекстурованої) ПЕ-плівки, який становив 100° (рис. 8), що відповідає типовим гідрофобним властивостям ПЕ. У випадку гладкої ПЕТ-плівки відомо, що типовий кут змочування становить близько 76° , підтверджуючи її гідрофільний характер. Водночас текстуровані ПЕТ-відбитки при поперечному перерізу демонструють значне зростання кута змочування до 138° , що свідчить про суттєвий вплив мікрорельєфу на зміну гідрофобних властивостей поверхні.

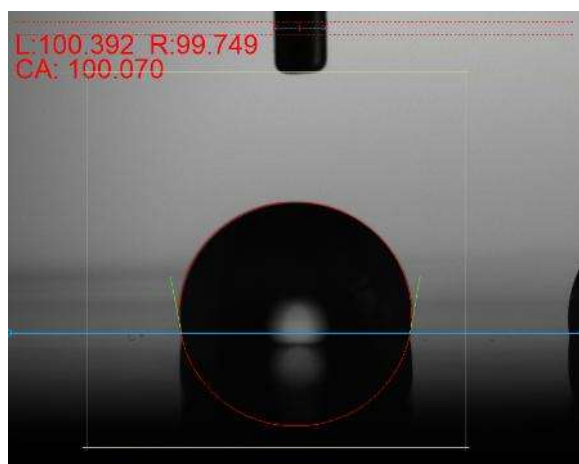


Рис. 8. Кут змочування гладкої (нетекстурованої) плівки ПЕ

Загалом аналіз отриманих даних демонструє наявність тенденції до підвищення кута змочування при поперечному перерізу порівняно з поздовжнім перерізом, що узгоджується з характером анізотропного мікрорельєфу. Незважаючи на наявність окремих дефектів, текстуровані поверхні ПЕ та ПЕТ показують суттєве покращення гідрофобних властивостей: мінімальне значення кута змочування для текстурованого ПЕ (110°) перевищує відповідне значення для гладкої плівки (100°), а максимальні значення (понад 150°) наближаються до характеристик супергідрофобних поверхонь.

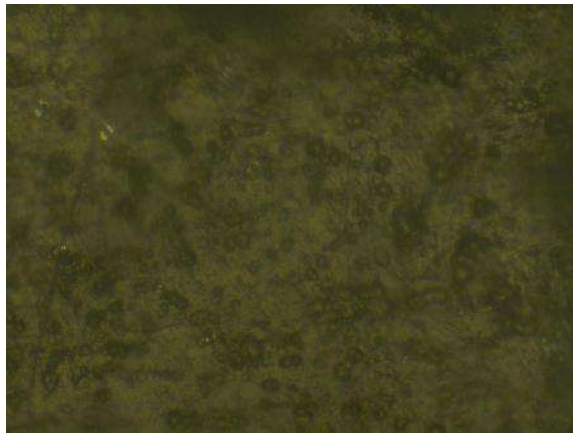
Таким чином, отримані результати підтверджують, що формування мікротекстурованих поверхонь є ефективним способом регулювання гідрофобних властивостей полімерних плівок, при цьому орієнтація краплі щодо напрямку текстури відіграє ключову роль у визначенні рівноважних кутів змочування.

З одержаних показників змочування очевидно що має місце аномалія формування значення статичного кута змочування на текстурованих поверхнях. Оскільки геометрично текстури є рівномірними та анізотропними, було вирішено провести порівняння фактичних значень кутів змочування з теоретичними (Таблиця 1). Для розрахунку теоретичних кутів використовувалося припущення що на суб-мікрорівні поверхня матеріалу є пласкою, а геометрія мікронерівностей може бути описана еквівалентними за розмірами прямокутниками. Розрахунок здійснювався за рівнянням Касі-Бакстера (1):

Таблиця 1

Порівняння результатів визначення показників змочування поверхонь

№	Текстура	Θ^* за (2)	Θ^* поперечний	Θ^* поздовжній
1	РЕ негатив	136	143	152
2	РЕ позитив	116	146	110
3	РЕТ негатив	125	138	-



а



б

Рис. 9. Мікроскопія поверхні РЕ з вплавленим пірогенним кремнеземом (а) та (б) вид згори, демонструють розподіл частинок у різних зонах

$$\cos\theta^* = f_1 \cos\theta_1 + f_2 \cos\theta_2, \quad (1)$$

де $\cos\theta^*$ - косинус кута змочування текстурованої поверхні; f_1 та f_2 – долі поверхні контакту фракції (1) та (2); $\cos\theta_1$ і $\cos\theta_2$ – косинус кута змочування відповідних плоских поверхонь фракції (1) та (2).

Оскільки під фракціями 1 та 2 в оригінальному рівнянні Касі розуміються саме тверді матеріали, при розгляді пористих поверхонь, в яких роль фракції 2 відіграє повітря, а значення $\cos\theta_2 = (-1)$, рівняння приймає вигляд (2):

$$\cos\theta^* = f_1 \cos\theta_1 - f_2, \quad (2)$$

З результатів наведених в Табл. 1 звертає на себе увагу той факт що експериментальні результати значно перевищують очікувані теоретичні. Це може бути пояснене двома причинами. По-перше, отримані поверхні містять рівень субмікронних елементів текстур, які формуються внаслідок комплексного впливу процесів склування полімеру, його адгезійного захоплення формою, наявності субмікронних паттернів на поверхні самих металевих шаблонів. Втім, теоретична тенденція в більшості випадків зберігається: зразки 1 та 4 мають найвищий прогнозований кут та найвищі кути змочування в поздовжньому напрямку.

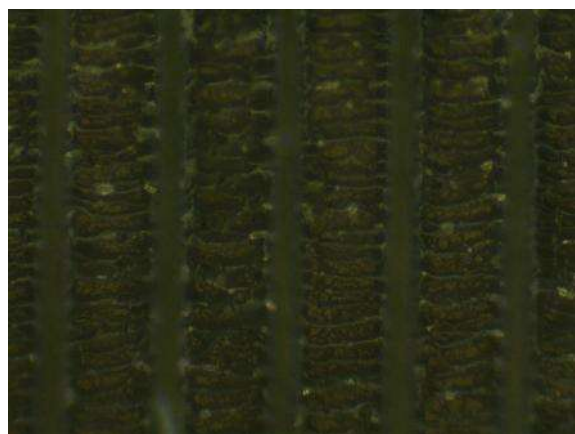
Аномальна поведінка зразку 2 може бути пояснена кінетичним характером вимірювань [8].

З огляду на перспективність формування додаткового шару ієрархічної текстур [9], [10] для підвищення водовідштовхувальних властивостей, у роботі було використано пірогенний діоксид кремнію AEROSIL R972, який фіксувався на поверхні плівок шляхом вплавлення під час термопресування оригінальних текстур. На Рис. 9 наведено результат такої обробки для гладкої плівки, тоді як на Рис. 10 та Рис. 11 подано аналогічні результати для РЕ та ПЕТ плівок відповідно.

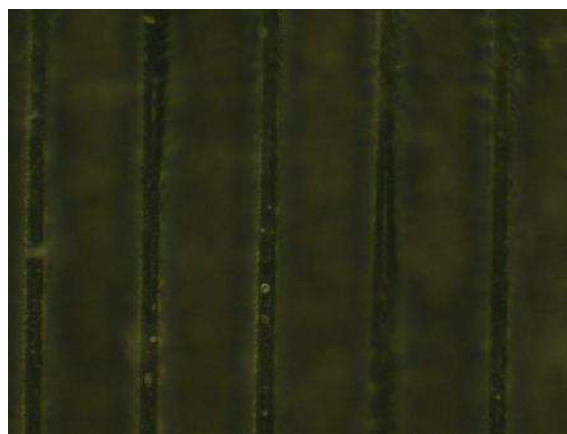
З рисунка 9 видно, що частинки аеросилу займають статистично рівномірне положення по всій площі поверхні зразка. Частинки агреговані, розташовані нерівномірно.

У разі наявності мікротекстури частинки переважно розташовуються на її виступах, що добре видно на рисунку 10. Значна їх кількість зосереджена саме у верхній частині текстурованого рельєфу.

У випадку негативної текстури спостерігається аналогічна закономірність. На рисунку 11 а видно, що частинки розташовуються на вузьких вершинах виступів, фактично обрамлюючи або інкрустуючи їх. Ці частинки утворюють справжній субмікронний додатковий рівень текстурування.

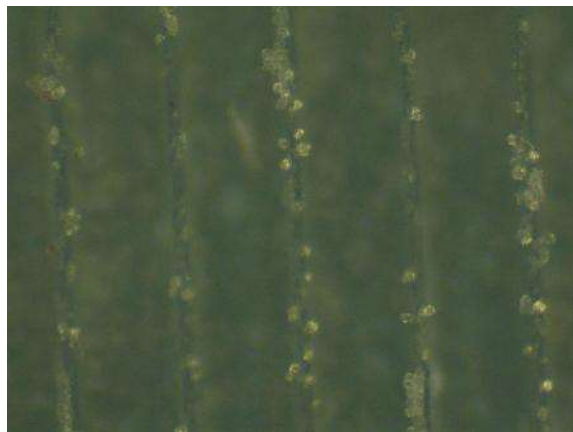


а

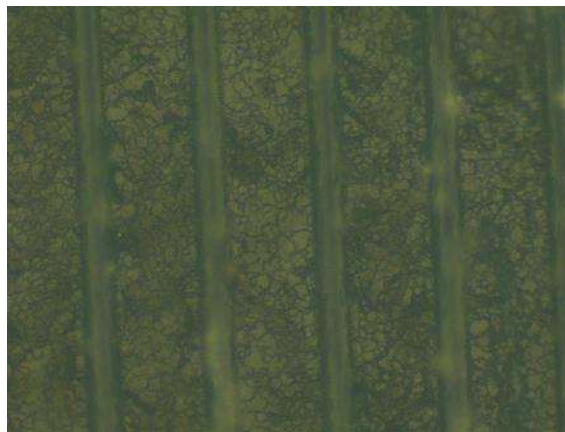


б

Рис. 10. Мікроскопія позитиву текстурованої поверхні ПЕ:
а – виступи текстури; б – западини текстури



а



б

Рис. 11. Мікроскопія негативу текстурованої поверхні ПЕТ:
а – виступи текстури; б – западини текстури

Таким чином, проведені експерименти демонструють, що під час процесу термоформування текстури на полімерних плівках можлива інтеграція додаткових частинок для формування багаторівневого рельєфу шляхом їх прямого вплавлення. Частинки ефективно фіксуються навіть на вузьких та гострих елементах рельєфу, характерних для негативних текстур поверхні, тоді як у канавках спостерігається їх менша концентрація, що можна пояснити локальними змінами топографії та зменшеним контактом з матеріалом основи.

Для поверхонь із вплавленими частинками аеросилу були проведені вимірювання кута змочування методом сидячої краплі для оцінки гідрофобних властивостей полімерів. Для нетекстурованого ПЕ впровадження аеросилу призвело до збільшення кута змочування до

приблизно 128° , що суттєво перевищує значення для чистого ПЕ, яке становило близько 100° (рис. 12). Це підкреслює ефективність створення мікрощорсткої поверхні за рахунок вплавлених частинок і, відповідно, зменшення змочуваності матеріалу.

Для текстурованого ПЕ спостерігалася виражена анізотропія кута змочування. Кут змочування при поперечному перерізу досягав приблизно 143° , тоді як при поздовжньому перерізу кут становив 126° (рис. 13). Таке розходження свідчить про помірне підвищення гідрофобності в порівнянні з текстурованим чистим ПЕ і вказує на часткове утримання аеросилу на поверхні, причому ефективність вплавлення зменшується на ділянках із позитивною топографією, де контакт частинок із матеріалом обмежений.

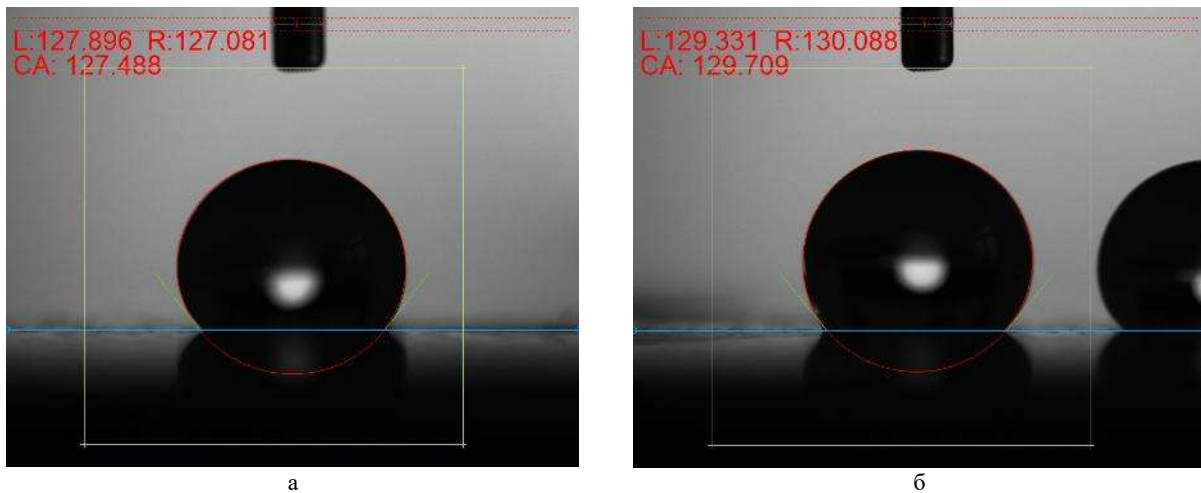


Рис 12. Кути змочування нетекстурованого ПЕ з вплавленими частинками аеросилу (а) та (б), демонструють кути в різних частинах поверхні

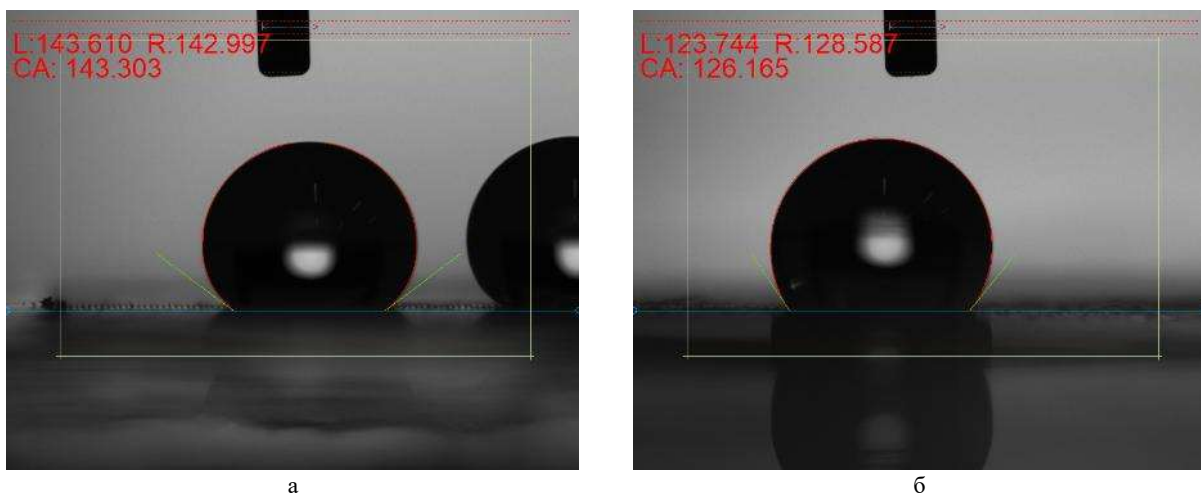


Рис 13. Кути змочування позитиву ПЕ з вплавленими частинками аеросилу поперечний (а), поздовжній(б)

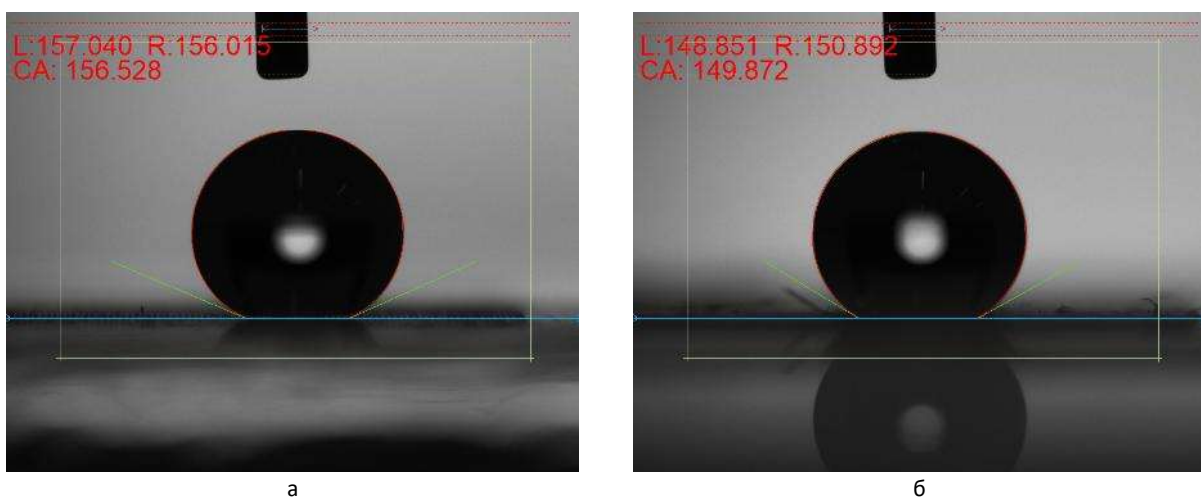


Рис 14. Кути змочування негативу ПЕТ з вплавленими частинками аеросилу поперечний (а), поздовжній(б)

Для негативних відбитків із ПЕТ кути змочування в поперечному та поздовжньому перерізах склали 156° та 149° відповідно (рис. 14), що демонструє високу ефективність вплавлених частинок аеросилу у підвищенні

гідрофобних властивостей. Це пов'язано з якісним вплавленням частинок у піки рельєфу ПЕТ, що забезпечує надійну фіксацію та формування поверхні із супер-гідрофобними властивостями.

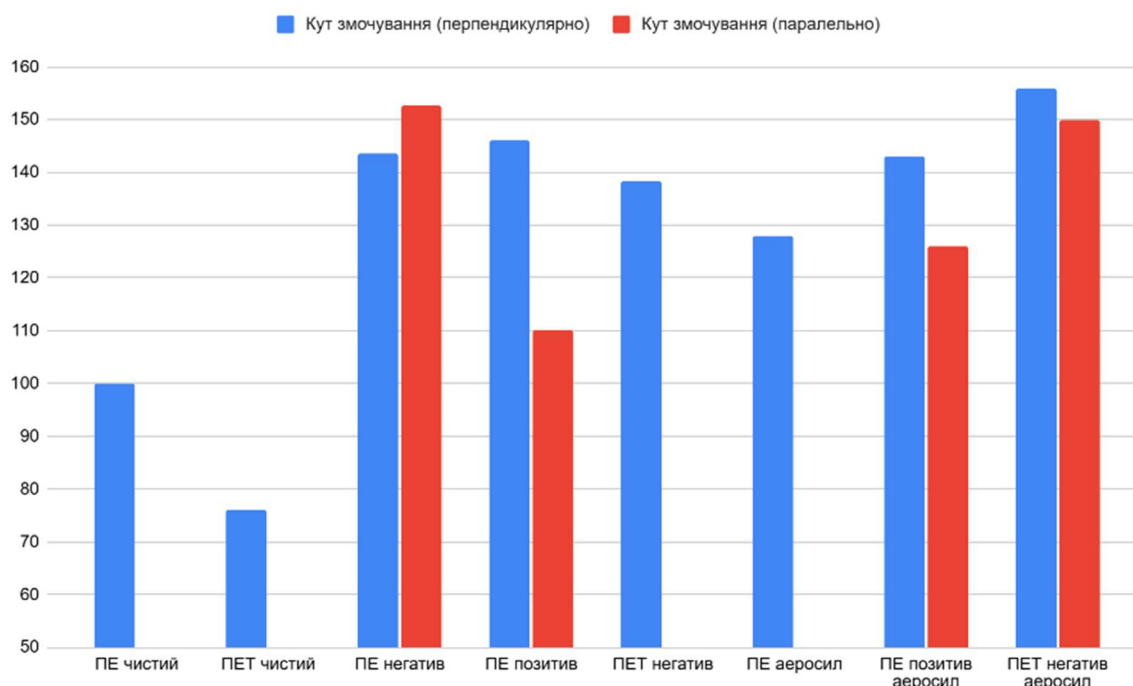


Рис. 15. Порівняння кутів змочування різних текстур

Загалом, порівняння значень кутів змочування всіх досліджених матеріалів (рис. 15), дозволяє зробити висновок про поступове підвищення ефективності при текстурованні поверхні на мікро рівні за допомогою металевих шаблонів та на нанорівні шляхом вплавлення гідрофобних частинок. Останнє дозволяє частково замінити порівняно гідрофільну поверхню ПЕТ гідрофобізованою поверхнею наночастинок пірогенного діоксиду кремнію за біомететичним принципом *Salvinia moleste* [11].

Аналіз отриманих результатів демонструє чіткий вплив текстури та впровадження аеросилу на гідрофобні характеристики полімерів. У чистого ПЕ кут змочування становив 100° , тоді як впровадження частинок підвищувало його до 128° , що свідчить про значне покращення водовідштовхувальних властивостей. Текстуровані відбитки ПЕ продемонстрували анізотропію: негативні піки забезпечували кут змочування $143\text{--}152^\circ$, а позитивні - $110\text{--}146^\circ$, причому вплавлення аеросилу підвищувало поперечний кут до 143° та поздовжній до 126° . Це підтверджує, що частки аеросилу частково не утримуються на поверхнях із позитивною топографією, що зменшує ефективність гідрофобізації.

У випадку ПЕТ природний кут змочування для плоского матеріалу становить приблизно 76° , що відображає його гідрофільні

властивості. Негативні текстури ПЕТ без аеросилу демонстрували поперечний кут 138° , тоді як поздовжній кут виміряти не вдалося через розтікання краплі, що підкреслює анізотропний характер гідрофільності. Вплавлення аеросилу в текстуровану поверхню ПЕТ забезпечило значне підвищення гідрофобності до 156° та 149° у поперечному та поздовжньому перерізах відповідно, що свідчить про ефективне утримання частинок у піках рельєфу та формування стабільного супергідрофобного ефекту.

Таким чином, результати підтверджують, що комбіноване використання текстуровання поверхні та вплавлення аеросилу є ефективним підходом для підвищення гідрофобних властивостей полімерних плівок, із особливо високою ефективністю для негативних відбитків ПЕТ, де забезпечується максимальна фіксація частинок у структурних елементах рельєфу.

Висновок. У роботі систематично досліджено можливість формування мікро- та ієрархічно текстурованих полімерних поверхонь методом термовідтискання з використанням металевих шаблонів, виготовлених фемтосекундною лазерною абляцією, а також оцінено вплив такої текстури і вплавлених наночастинок на гідрофобні властивості полімерних плівок.

Показано, що металеві шаблони з періодичним мікрорельєфом розміром 20 на 60 мкм забезпечують ефективне та відтворюване перенесення текстури на полімерні плівки. Серед досліджених матеріалів поліетилентерефталатні плівки продемонстрували найкращу якість реплікації при прямому термовідтисканні з металевих матриць: мікроструктура відтворюється чітко, без значних морфологічних дефектів, із високою однорідністю по площі зразка. Поліетиленові плівки при прямому контакті з металевими шаблонами схильні до утворення дефектів, пов'язаних з адгезією та в'язкопружними властивостями матеріалу, що знижує морфологічну досконалість поверхні.

Встановлено, що застосування проміжних ПЕТ-реплік як вторинних шаблонів для формування ПЕ-відбитків дозволяє зменшити негативний вплив адгезії метал-полімер та отримати більш впорядковану структуру, хоча при цьому відбувається певна трансформація геометрії елементів рельєфу (згладжування, перехід до трапецієподібних профілів). Це свідчить про непристосованість даної текстури поверхні до повторної реплікації, однак термовідтискання проходить без критичної втрати періодичності та анізотропності текстури.

Вимірювання кутів змочування підтвердили суттєвий вплив мікротекстури на гідрофобні властивості поверхонь. Для всіх текстурованих зразків зафіксовано виражену анізотропію змочування, зумовлену орієнтацією краплі відносно напрямку мікрорельєфу. Текстуровання дозволяє значно підвищити кут змочування як для гідрофобного ПЕ, так і для початково гідрофільного ПЕТ, причому максимальні значення досягають або наближаються до області супергідрофобності. Порівняння експериментальних значень кута змочування з теоретичними, отриманими за моделлю Кассі-Бакстера, показало, що фактичні кути змочування значно перевищують розрахункові. Це свідчить про наявність додаткового субмікронного рівня текстуровання та ускладнений характер змочування, який не враховується в рамках ідеалізованої моделі. Крім того, спостережене значне розходження кутів змочування при вимірюваннях у поперечному та поздовжньому перерізах свідчить про недоцільність застосування моделі Кассі-Бакстера для даних типів текстурованих поверхонь.

Продемонстровано принципову можливість формування ієрархічних поверхонь шляхом вплавлення гідрофобізованих наночастинок пірогенного діоксиду кремнію безпосередньо під час процесу термовідтискання. Частинки аеросилу ефективно фіксуються на поверхні, переважно у вершинах мікрорельєфу, формуючи додатковий субмікронний рівень шорсткості. Найбільший ефект досягнуто для негативних текстур ПЕТ, де забезпечується надійна фіксація частинок і формування стабільних супергідрофобних поверхонь з кутом змочування 156°.

Таким чином, поєднання масштабованого методу термовідтискання з використанням лазерно текстурованих металевих шаблонів і вплавлення наночастинок є ефективним та технологічно перспективним підходом до створення мікро- та ієрархічно текстурованих полімерних поверхонь із керованими, у тому числі супергідрофобними, властивостями. Отримані результати створюють основу для подальшої оптимізації технологічних параметрів і розширення практичного застосування таких поверхонь у функціональних покриттях та промислових виробках.

Це дослідження було профінансовано в рамках проекту № 2025.06/0031 «Полімерні рідинно-інфузовані плівки зі здатністю до антиоблединіння» (контракт № 217.0031 01.08.2025) Національного фонду досліджень України.

Л і т е р а т у р а

1. Recent advancements in fabrication strategies and applications of superhydrophobic coatings / Z. Jiang et al. Journal of materials science. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-025-10878-7>.
2. Research progress on micro/nano materials and low surface energy modification in superhydrophobic coatings / G. Dong et al. Nano materials science. 2026. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2025.12.007>.
3. Erbil H. Y. Practical applications of superhydrophobic materials and coatings: problems and perspectives. Langmuir. 2020. Vol. 36, no. 10. P. 2493–2509. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03908>.
4. A scalable two-step hot-embossing strategy enabling durable superhydrophobic surfaces for anti-fouling and freshwater collection / F. Wang et al. Surface and coatings technology. 2026. P. 133294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133294>.

5. Myronyuk O., Baklan D., Rodin A. M. Owens–Wendt method for comparing the UV stability of spontaneous liquid-repellency with wet chemical treatment of laser-textured stainless steel. *Biomimetics*. 2023. Vol. 8, no. 8. P. 584. URL: <https://doi.org/10.3390/biomimetics8080584>.
6. Hierarchical microtextures embossed on PET from laser-patterned stamps / F. Bouchard et al. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 1756. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14071756>.
7. Myronyuk O., Baklan D., Rodin A. M. UV resistance of super-hydrophobic stainless steel surfaces textured by femtosecond laser pulses. *Photonics*. 2023. Vol. 10, no. 9. P. 1005. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics10091005>.
8. Estimation of the structure of hydrophobic surfaces using the cassie–baxter equation / O. Myronyuk et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 17. P. 4322. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17174322>.
9. Erdene-Ochir O., Do V.-T., Chun D.-M. Facile fabrication of durable and flexible superhydrophobic surface with polydimethylsiloxane and silica nanoparticle coating on a polyethylene terephthalate film by hot-roll lamination. *Polymer*. 2022. P. 125158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125158>.
10. Recent advances in bio-inspired superhydrophobic coatings utilizing hierarchical nanostructures for self-cleaning and anti-icing surfaces / F. Acha et al. *Physchem*. 2025. Vol. 5, no. 4. P. 48. URL: <https://doi.org/10.3390/physchem5040048>.
11. Tang Z. Q., Tian T., Molino P. J., Skvortsov A., Ruan D., Ding J., Li Y. Recent Advances in Superhydrophobic Materials Development for Maritime Applications / *Advanced Science*. 2024. Vol. 11, № 16. e2308152. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202308152>.

References

1. Recent advancements in fabrication strategies and applications of superhydrophobic coatings / Z. Jiang et al. *Journal of materials science*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-025-10878-7>.
2. Research progress on micro/nano materials and low surface energy modification in superhydrophobic coatings / G. Dong et al. *Nano materials science*. 2026. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2025.12.007>.
3. Erbil H. Y. Practical applications of superhydrophobic materials and coatings: problems and perspectives. *Langmuir*. 2020. Vol. 36, no. 10. P. 2493–2509. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03908>.
4. A scalable two-step hot-embossing strategy enabling durable superhydrophobic surfaces for anti-fouling and freshwater collection / F. Wang et al. *Surface and coatings technology*. 2026. P. 133294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133294>.

Makovkyi D.P., Myronyuk O.V. Formation of two-level water-repellent textures on the surface of polymer films

This study investigates the fabrication of micro- and hierarchically textured polymer film surfaces via thermoforming using metallic molds produced by femtosecond laser ablation. The influence of surface texture and embedded nanoparticles on the hydrophobic properties of the materials was analyzed. Polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET) films with a thickness of 200 μm were used as model polymers. It was shown that PET films provide the most accurate and stable reproduction of the microrelief during direct thermoforming with metallic molds, whereas PE exhibits morphological defects associated with polymer–metal adhesion and its rheological properties. The use of intermediate PET replicas was proposed to improve the quality of PE imprints and reduce the adverse effects of polymer–metal interactions. The fabricated microtextured surfaces demonstrated pronounced wetting anisotropy, with contact angles strongly depending on the droplet orientation relative to the

texture direction. Surface texturing significantly enhanced the hydrophobicity of both inherently hydrophobic PE and initially hydrophilic PET. Comparison of experimental data with theoretical predictions using the Cassie–Baxter model revealed higher experimental contact angles, indicating the formation of an additional submicron roughness level. The possibility of creating hierarchical surfaces by embedding hydrophobized fumed silica nanoparticles directly during the thermoforming process was demonstrated. The particles were effectively fixed predominantly at the microrelief peaks, forming an additional nanotexture. The highest hydrophobic performance was achieved for negative PET textures with embedded nanoparticles, reaching stable superhydrophobicity with contact angles exceeding $156 \pm 3^\circ$. The results confirm the potential of combining thermoforming with nanoparticle integration as a scalable approach to fabricate functional polymer surfaces with tunable water-repellent properties.

Keywords: microtexturing; thermoforming; polyethylene; polyethylene terephthalate; hydrophobicity; superhydrophobic surfaces

Маковський Денис Петрович – аспірант хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", <https://orcid.org/0009-0006-9155-128X>, makovskiy.denis@iitl.kpi.ua.

Миронюк Олексій Володимирович – д.т.н., доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", <https://orcid.org/0000-0003-0499-9491>, o.myronyuk@kpi.ua.

Дата першого надходження статті 13.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-96-106>

УДК 66.017

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ГІДРОЛІЗАТІВ ТЕТРАЕТОКСИСИЛАНІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Тихонов П.С., Свідерський В.А.

FEATURES OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING HYDROLYSATES OF TETRAETHOXYSILANES FOR VARIOUS FUNCTIONAL PURPOSES Tykhonov P.S., Sviderskyi V.A.

Актуальність дослідження гідролізатів тетраетоксисилану зумовлена широкими можливостями їх використання у створенні функціональних неорганічних і гібридних матеріалів із керованими властивостями, що застосовуються в матеріалознавстві, будівництві, медицині, енергетиці та захисних технологіях. У роботі узагальнено особливості отримання гідролізатів тетраетоксисилану у золь-гель процесі та проаналізовано основні технологічні параметри, що визначають їх фізико-хімічну стабільність і функціональне призначення. Розглянуто механізми гідролізу та поліконденсації етилсилікату у кислому та лужному середовищах, а також їх вплив на формування силоксанової структури золю. Показано, що співвідношення швидкостей гідролізу і конденсації суттєво залежить від рН середовища: у кислому середовищі гідроліз переважає над конденсацією, що сприяє формуванню однорідних прозорих золь, тоді як у лужному середовищі інтенсифікується конденсація і відбувається швидке утворення просторово щільної силоксанової сітки та укрупнення частинок. Проаналізовано вплив молярного співвідношення $H_2O/TEOS$, типу каталізатора, природи розчинника, температури синтезу та умов перемішування на кінетику реакцій і стабільність системи. Встановлено, що оптимальні значення параметрів синтезу дозволяють контролювати морфологію частинок, ступінь зшивання силоксанової мережі та реологічні властивості гідролізатів. Окрему увагу приділено відмінностям між $TEOS$ та етилсилікатом-40, що визначають їх застосування у лабораторних та промислових технологіях. Показано, що контроль складу золю та умов гідролізу дає можливість регулювати властивості кінцевих матеріалів і розширювати сфери їх використання. Узагальнено сучасні напрями застосування гідролізатів $TEOS$,

зокрема у формуванні захисних та антикорозійних покриттів, синтезі кремнеземних наночастинок, аерогелів, функціональних текстильних матеріалів, волокон та композиційних систем. Визначено основні проблеми, пов'язані з підвищенням стабільності золь, обмеженнями використання, відтворюваністю результатів та оптимізацією технологічних режимів золь-гель синтезу. Обґрунтовано перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: золь-гель процес, тетраетоксисилан, покриття, гідроліз, поліконденсація.

Вступ. Золь-гель процес — це «м'яка» мокра хімічна технологія, яка дозволяє синтезувати матеріали при низьких температурах, що зменшує споживання енергії на відміну від традиційних високотемпературних методів синтезу кераміки та покриттів. До його переваг ще відносяться легка масштабованість у промисловості, порівняна екологічна безпечність, внаслідок меншої кількості токсичних речовин та універсальність застосування. Стабільні гідролізати $TEOS$ (тетраетоксисилану) у золь-гель технології десятки років є основою для отримання широкого спектра поліфункціональних матеріалів: від захисних покриттів на металах, склі, сонячних панелях, дереві до порошків різної дисперсності та зв'язуючих і просочуючих систем. Продукти відповідного гідролізу і конденсації в золь-гель синтезі корисні завдяки своїй бар'єрній і корозійній стійкості, особливо за можливості досягнення супергідрофобного стану шляхом

текстування поверхні, біомедичній сумісності, біостійкості, здатності до утворення гібридних органо-, неорганічних покриттів, підвищень термостабільності.[1,2,3,4]. У процесі отримання стабільних гідролізатів можна систематично вивчати зв'язок умов синтезу і властивостей кінцевого матеріалу. Дослідження процесів гідролізу та конденсації ТЕОС у часі допомагає зрозуміти структурну еволюцію золю на молекулярному та нанорівнях і підібрати технологічні режими для подальшого прикладного використання. Можливість модифікації функціональними групами та введення добавок дозволяє розробляти інноваційні, гібридні матеріали з заданими хімічними та механічними властивостями, що має високу актуальність і науково-практичну значущість для матеріалознавства та інженерії.

Постановка проблеми. Попри значний обсяг досліджень, присвячених золь-гель системам на основі ТЕОС, у сучасній літературі відсутній узгоджений підхід до визначення критеріїв стабільності гідролізатів та їх класифікації залежно від умов синтезу і функціонального призначення. Дані щодо впливу рН, молярного співвідношення компонентів, типу каталізатора, розчинника та температури подаються фрагментарно, а результати різних авторів часто є складними для порівняння через відмінності у методиках проведення експериментів і характеристиці отриманих систем. У більшості робіт увага зосереджується або на фундаментальних механізмах гідролізу і конденсації, або на прикладних аспектах застосування матеріалів, тоді як комплексний аналіз взаємозв'язку «умови синтезу – структура золю – властивості кінцевого продукту» представлений обмежено. Крім того, недостатньо систематизовані дані щодо довготривалої стабільності гідролізатів, впливу умов зберігання та реологічних характеристик на подальше використання систем у покриттях, порошках і композиційних матеріалах. У зв'язку з цим актуальним є узагальнення сучасних підходів до отримання стабільних гідролізатів ТЕОС та аналіз факторів, що визначають їх фізико-хімічну стабільність.

Мета. Метою даної оглядової статті є узагальнення сучасних наукових підходів до отримання стабільних гідролізатів тетраетоксисилану у золь-гель процесі, встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів синтезу на фізико-хімічну стабільність золь і властивості кінцевих

матеріалів. У межах поставленої мети передбачається здійснити аналіз сучасних літературних даних щодо механізмів гідролізу та конденсації ТЕОС у різних середовищах, узагальнити вплив основних параметрів процесу — зокрема рН, молярного співвідношення прекурсорів, природи каталізатора, типу розчинника й температури — на поведінку золю та його стабільність у часі. Також даною роботою передбачено оглянути різноманітні застосування таких гідролізатів.

Виклад основного матеріалу.

Гідролітична поліконденсація етилсилікату досить складний, хоча і вивчений, процес паралельних і послідовних реакцій. Вважається, що початкові етоксигрупи(–OEt) заміщуються на гідроксильні(–OH), утворюючи силанолі (–Si–OH), або кремнієві кислоти які є нестабільними й переходять в силосанові(Si–O–Si) сполуки, безпосередньо формуючи полімерну 3D сітку. Через комплексність цього процесу завжди утворюється суміш складних продуктів.[5]

Первинний етап - гідроліз, є реакцією нуклеофільного заміщення першого порядку типу S_N2-Si , що характеризуються перехідним станом, в якому атом силіцію є п'ятикоординатним. Відбувається шляхом атаки молекули води на атом силіцію, що призводить до утворення силанолів (–Si–OH) і одночасного вивільнення етанолу. У водно-спиртовому середовищі без каталізатора реакція йде дуже повільно, тому для прискорення застосовують кислотний або лужний каталіз[5].

У кислому середовищі гідроліз тетраетоксисилану ініціюється протонуванням атома кисню в етоксигрупі або силосанового містка при атомі силіцію в олігомерах. Протонування підвищує електрофільність силіцію, роблячи його більш чутливим до нуклеофільної атаки молекули води. Внаслідок цього відбувається заміщення –OEt груп на –OH з утворенням силанолів і виділенням етанолу. Реакція проходить послідовно — від частково гідролізованих форм до повного перетворення $Si(OR)_4$ у $Si(OH)_4$. (Рис. 1)

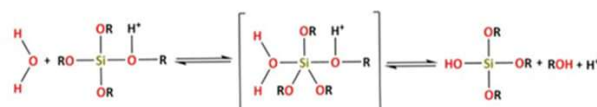


Рис. 1. Схема протікання гідролізу ТЕОС в кислому середовищі [6]

Конденсація у кислотному середовищі відбувається переважно через реакцію між протонованими силанольними групами. Утворення Si–O–Si містків супроводжується виділенням води або спирту. Механізм зазвичай проходить через електрофільну активацію силанольної групи, що сприяє формуванню відносно лінійних або слабкорозгалужених полімерних ланцюгів[7]. (Рис. 2).

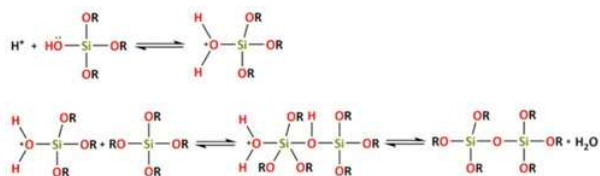


Рис. 2. Схема протікання конденсації ТЕОС в кислому середовищі [6]

Через те що конденсація відбувається повільніше, ніж гідроліз, формується більш однорідна мережа з меншим ступенем локальної агрегації. У результаті переважно виникають прозорі золі з невеликим розміром кластерів. Такі умови є сприятливими для формування тонких однорідних прозорих плівок і покриттів із низькою пористістю.

У лужному середовищі гідроліз відбувається за участю гідроксид-йонів, які безпосередньо атакують атом силіцію. На відміну від кислотного механізму, тут не відбувається попереднього протонування — реакція йде через нуклеофільний механізм з утворенням пентакоординованого перехідного стану. У цих умовах гідроліз і конденсація часто відбуваються майже одночасно. Як тільки утворюється силанольна група, вона швидко перетворюється в силанолат-аніон і вступає в реакцію конденсації, що значно скорочує період існування окремих гідролізованих мономерів. (Рис.3).

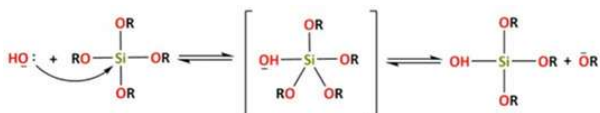


Рис. 3. Схема протікання гідролізу ТЕОС в лужному середовищі [6]

Конденсація в лужному середовищі проходить через депротоновані силанольні групи (Si–O[−]), які є сильними нуклеофілами. Це значно підвищує швидкість утворення Si–O–Si зв'язків. Припускають, що відбувається полімеризація за іонним механізмом. У

результаті формується тривимірна сітка з високим ступенем зшивання вже на ранніх стадіях процесу[7]. (Рис. 4)

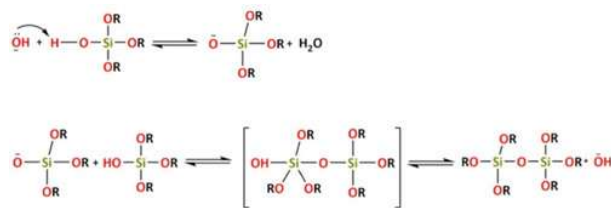


Рис. 4. Схема протікання конденсації ТЕОС в лужному середовищі [6]

Поверхневий заряд частинок визначає стабільність гідролізатів у процесі реакцій. Ізоелектрична точка кремнезему знаходиться в межах приблизно рН 2–3 залежно від умов синтезу, іонної сили та ступеня конденсації частинок. У цій області сумарний поверхневий заряд частинок SiO₂ прямує до нуля, що означає мінімальне електростатичне відштовхування між ними. Саме тому поблизу ізоелектричної точки зростає схильність до агрегації та коагуляції, а колоїдна стабільність є найнижчою. При відхиленні рН у кислу або лужну сторону поверхня набуває відповідно позитивного (Si–OH₂⁺) або негативного (Si–O[−]) заряду, що підвищує електростатичну стабілізацію золю[5,7,8].

Швидкість й тип процесів залежать від кислотності середовища. У сильноокислій області швидкість гідролізу є відносно високою, тоді як конденсація відбувається повільніше, що сприяє накопиченню силанольних груп і формуванню дрібних, менш зшитих структур. У проміжній зоні (близько нейтрального рН) швидкість гідролізу проходить через мінімум, де конденсація активізується, що змінює механізм структурування. У лужному середовищі (рН > 7) концентрація OH[−] різко прискорює нуклеофільну атаку на Si–OR та Si–OH групи, тому швидкість конденсації значно перевищує швидкість гідролізу. Це веде до швидкого формування зшитої мережі та укрупнення частинок. Ефективний плівкоутворювальний золь утворюється за умови повнішого гідролізу та обмеження конденсації[8]. (Рис. 5)

Встановлення і вимірювання рН є не такою простою задачею. Так як реакція відбувається не у водному середовищі, а зазвичай у суміші води й спирту, то звичайний індикаторний папір буде давати похибку, через те що він змочується спиртом. Але, його можна використовувати при

оцінці рН суміші води й каталізатора, необхідного для реакції, при чому слід вважати що при змішуванні з алкоксисилановим розчином він змінюватиметься. Тому кращим буде вимірювання потенціометрично, з калібруванням на відповідну суміш розчинників. Крім цього, стандартна шкала кислотності визначена для водних систем і не враховує специфічного впливу змішаного розчинника на активність іонів водню, враховуючи каталізatori різної сили. Наприклад, для розчинів сильних кислот у присутності гідролізованого ТЕОС величина рН практично відповідає $-\log(c_{\text{Кислоти}})$ і слабо залежить від складу розчинника, що дозволяє використовувати скориговане значення рН як наближену характеристику активності протонів. Натомість у системах зі слабкими кислотами виміряне значення рН відображає не лише активність H^+ , але й зміну констант дисоціації під впливом водно-спиртового середовища, що необхідно враховувати при інтерпретації кінетичних даних гідролізу та конденсації ТЕОС[9].

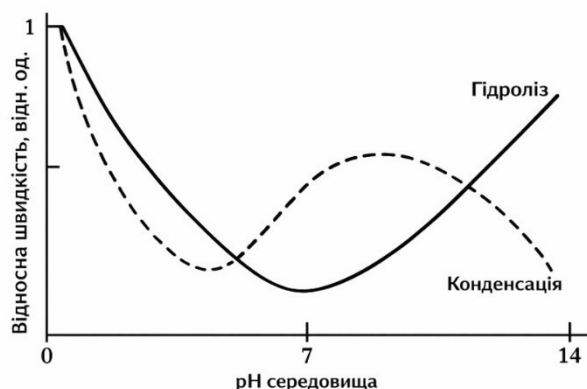


Рис. 5. Залежність відносних швидкостей гідролізу та конденсації від рН розчину [8]

Рівень рН визначає швидкість процесу і домінування гідролізу або конденсації при заданих умовах. Навіть невелика зміна цього параметру суттєво змінює якість утвореного продукту. Традиційно для отримання прозорих та однорідних тонких плівок обирають слабкокислий каталіз[10]. У лужних умовах отримують більш щільні, сферичні або монодисперсні частинки кремнезему, характерні для Штобер-подібних систем; такі матеріали застосовують як наповнювачі, абразиви, носії каталізаторів, пігменти, а також для одержання порошків і покриттів із підвищеною механічною міцністю[11].

Проте, два розчини з однаковим рН можуть мати різний час гелеутворення, залежно від природи протиіона, за інших рівних параметрів. Тому різні каталізatori неоднозначно можуть впливати на реакційне середовище[5]. Наприклад, найчастіше для кислотного каталізу застосовують сильні мінеральні кислоти HCl або HNO_3 , у яких швидкість гідролізу достатньо контрольована порівняно з конденсацією. Причому нітратна сповільнює поліконденсацію шляхом утворення полімерів типу $\text{Si}-\text{O}-\text{NO}_2$ [12]. У гідролізатах ТЕОС з HF та H_3PO_4 конденсація відбувається приблизно на три порядки швидше, ніж в інших. Це пов'язано з каталізуючою дією аніона F^- і з утворенням донорно-акцепторних зв'язків між H_3PO_4 та сусідніми силосановими ланцюгами. Ці містки можуть зближувати сусідні ланцюги один з одним і стерично полегшувати конденсацію між зв'язками $\text{Si}-\text{OH}$ (або SiOEt). Однак, ця проблема заслуговує на подальші дослідження[9]. Щодо лужного каталізу, часто використовується водний розчин амоніаку[13,14], або ж його сучасний аналог, більш м'який і водночас гідрофобізуючий агент — гексаметилдисилазан[15,16].

Вибір прекурсору значно впливає на синтез гідролізатів. Доступно декілька варіантів, які містять тетраетил ортосилікат. Найчастіше використовуються ЕТС-40, ЕТС-32 і ТЕОС. Етилсилікат-40 (ЕТС-40) відрізняється від тетраетоксисилану тим, що є сумішшю олігоетоксисилосанів різної розгалуженості, в тому числі і циклічних[17] із вмістом близько 40 % SiO_2 в перерахунку, тоді як ТЕОС — це індивідуальна мономерна сполука $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ з теоретичним виходом близько 28 % SiO_2 . Для більш точного визначення складу зазвичай проводиться хроматографічний аналіз фракцій отриманих під час вакуумної дистиляції. Завдяки попередньо сформованим зв'язкам $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$, ЕТС-40 має вищу в'язкість, менші леткості і усадку під час гідролізу та конденсації. Це зменшує тріщиноутворення і внутрішні напруження у товстих шарах покриттів, а також забезпечує кращі зв'язувальні властивості щодо мінеральних і металевих наповнювачів[18].

У практичному застосуванні ТЕОС переважно використовують як чистий прекурсор у контрольованих золь-гель процесах, для синтезу тонких плівок, наноструктур і функціональних покриттів, де важлива керована кінетика гідролізу. Натомість ЕТС-40 більш придатний для промислових

систем — зокрема як неорганічне зв'язувальне в ливарному виробництві, цинк-силікатних антикорозійних фарбах та термостійких покриттях — де необхідні підвищений вихід SiO_2 , менша леткість і стабільність при формуванні масивних або товстошарових матеріалів.

Крім цього необхідно враховувати співвідношення субстрату й реагенту в реакції. Молярне співвідношення $\text{H}_2\text{O}/\text{TEOS}$ (r) є одним із ключових параметрів, що визначає кінетику гідролізу та механізм структуроутворення в золь-гель процесі. При гідролізі, кількість води на одну етоксильну групу 0,5 моль, заведено вважати стехіометричною нормою для подальшої конденсації в SiO_2 -структуру. За низьких значень r ($\approx 1-2$) швидкість гідролізу обмежена, а конденсаційні реакції відносно переважають, що сприяє формуванню лінійних або слабо розгалужених полімерних структур, з неповним заміщенням гідроксильних груп, придатних для прозорих покриттів і монолітних матеріалів. При середніх значеннях r ($\approx 2-4$) досягається більш збалансоване співвідношення гідролізу та конденсації, що забезпечує формування тривимірної сітки полікремнієвих кислот з контрольованою пористістю, характерної для ксерогелів і функціональних покриттів [17,19]. Збільшення r до ≥ 4 суттєво прискорює як гідроліз, так і конденсацію, інтенсифікує нуклеацію та сприяє утворенню силікагелю або колоїдних частинок, що використовується для синтезу порошків і монодисперсних SiO_2 частинок. Найбільш стабільними є розчини у яких r є 2-2,5 згідно з експериментальними даними [20].

Оскільки етилсилікати не змішуються з водою, то у випадку TEOS найчастіше використовують нижчі спирти — етанол або ізопропанол. Оптимальним є етанол, він є продуктом гідролізу, тому система термодинамічно стабільніша, зменшується фазове розшарування і забезпечується рівномірний гідроліз. Він добре змішується з водою, знижує поверхневий натяг і дозволяє контролювати швидкість реакції. Ізопропанол дає повільніший гідроліз (через більшу стеричну перешкоду і нижчу полярність), що корисно для уповільнення гелеутворення та формування більш однорідних покриттів. Метанол прискорює процес, але є токсичнішим і частіше застосовується в лабораторії, ніж у промисловості. Для ЕТС-40 також переважно застосовують етанол, іноді ацетон оскільки він забезпечує добру сумісність з наявними

олігомерами та контроль в'язкості. У промислових покриттях можуть використовувати суміші спиртів або ароматичні розчинники (ксилол, толуол) для зменшення швидкості випаровування та товщини шару, але такі системи менш характерні для класичного золь-гель синтезу [5,7,11,12].

Відомі також методи гідролізу без використання розчинника [17,21], як більш екологічно чисті. Реакція тоді проходить локально на межі фаз, гідроліз відбувається нерівномірно, виникають мікроділянки з різною швидкістю конденсації, що призводить до агрегації частинок і нестабільного гелеутворення. Такі методи мають свої обмеження, наприклад у використанні в оптично прозорих однорідних плівках для сонячних панелей. Додавання спирту робить систему гомогенною, забезпечує рівномірний розподіл води та каталізатора і, відповідно, контрольовану кінетику, тому що золь-гель метод дуже чутливий до умов в мікрооб'ємах. Також розчинник регулює швидкість реакції. Розбавлення знижує локальну концентрацію реагентів, зменшує швидкість нуклеації частинок і дозволяє уникнути миттєвого гелеутворення. Це особливо важливо для формування тонких плівок або стабільних золів з контрольованим розміром частинок. Співвідношення розчинника і мономеру впливає на товщину утворюваних покриттів. Крім того, розчинник зменшує внутрішні напруження при висиханні. Спирт уповільнює випаровування, знижує поверхневий натяг і дозволяє формувати більш однорідну Si-O-Si сітку [22].

Процес протікає при відносно низьких температурах, що є вагомою перевагою. Підвищена температура здатна інтенсифікувати тепловиділення, що, своєю чергою, може передчасно ініціювати реакції конденсації вже на початкових стадіях гідролізу. Це сприяє швидкому зростанню частинок, коагуляції та можливому розшаруванню гідролізату і швидкому гелеутворенню. Реакція гідролізу етилсилікату езотермічна, що особливо помітно з сильними кислотами каталізаторами. З огляду на це, в літературі зустрічається охолодження вихідних реагентів попередньо до $5-10^\circ\text{C}$ [12]. Зниження температури дозволяє зменшити екзотермічний ефект, уповільнити швидкість конденсації та забезпечити більш контрольований і повний перебіг гідролізу. Вирішальним слугує баланс між живучістю розчину і швидкістю процесу. Зазвичай це

кімнатна температура, яка може підтримуватися в середині реактора за допомогою охолоджувальних пристроїв[9].

Стабільність гідролізатів ТЕОС у часі знижується через безперервне протікання реакцій поліконденсації та поступове формування просторової силоксанової сітки: частинки укрупнюються, зростає ступінь зшивання, підвищується в'язкість, і система зрештою переходить у гель. Ступінь однорідності етилсилікатного золю знаходиться в прямій залежності від кінетичних параметрів протікання послідовно-паралельних реакцій гідролізу і поліконденсації етилсилікату. У процесі старіння відбувається структурна перебудова та ущільнення, що додатково зменшує колоїдну стабільність. Перемішування на ранніх стадіях забезпечує однорідність системи, а в більш структурованих золях може тимчасово знижувати в'язкість за рахунок руйнування слабких міжчастинкових зв'язків, однак після зупинки зсуву структура частково відновлюється[5,7]. Якщо перемішування продовжується довше, ніж триває стадія гідролізу, у системі починає домінувати поліконденсація в межах послідовно-паралельного каскаду «гідроліз-поліконденсація», що активізує зшивання силоксанових ланцюгів через місткові зв'язки Si–O–Si та пришвидшує формування тривимірної сітки. Натомість припинення перемішування одразу після завершення гідролізу сприяє інтенсивному росту колоїдних частинок саме полікремнієвої кислоти, причому швидкість їх укрупнення підвищується зі зростанням локальної концентрації кислотного каталізатора. В результаті золь стає структурно неоднорідним: у ньому співіснують асоційовані частинки різного розміру й різного ступеня поліконденсації. За надлишку кислоти формуються переважно зшиті, сітчасті структури, а за її дефіциту — більш лінійні полімерні форми[12].

Функціональне призначення. Розглянуті особливості процесів гідролізу ТЕОС дозволяють прогнозувати конкретні кінцеві властивості продукту та сучасні сфери ефективного використання.

Технологічні режими отримання гідролізатів тетраетоксисилану, а також їх подальше модифікування, витримання і перетворення визначає галузь застосування кінцевого матеріалу. Змінюючи умови синтезу можна впливати на властивості й поведінку отриманих систем в широкому діапазоні. Золь-

гель метод з таким прекурсором дозволяє отримувати наповнювачі для стоматологічних матеріалів, вогнезахисні покриття на тканинах для пожежників. У текстильній промисловості за допомогою просочення можна надавати тканинам водовідштовхувальність, масловідштовхувальність, та самоочищення[23,24]. Розчини на основі кремнезему з ТЕОС, підготовлені за допомогою методу золь-гель, є ідеальними для виробництва волокон за допомогою електропрядіння. Волокна, виготовлені за допомогою цього методу, демонструють вражаючі властивості, включаючи високу термостійкість, хімічну інертність та біосумісність. Крім того, вони мають такі переваги, як електропровідність, механічна міцність та велика площа поверхні, що робить їх дуже перспективними для зберігання енергії та застосування в електроніці[25].

Гідролізати ТЕОС є основою для отримання похідних аерогелів низької щільності ($0,003\text{--}0,5\text{ г/см}^3$) та мінімальної теплопровідності. Висока пористість дозволяє використовувати їх як ефективний адсорбент для збирання залишків фармацевтичних препаратів з довілля та системах низькоризикової доставки ліків [26]. Гідрогелі на основі тетраетилортосилікату, що мають властивості реагувати на зсувне напруження та вивільняти ліки, можна отримати простим гідролізом з подальшою корекцією об'єму за допомогою водних розчинників та регулюванням рН. Вік гідролізату, який використовується для приготування, впливає на структуру наночастинок і жорсткість тиксогелів. Щобільше, механізм формування або порушення наночастинкової мережі значно впливає на профілі вивільнення включеного лікарського засобу[27].

Отримано гібридне супергідрофобне покриття з кутом контакту 160° і дуже низьким кутом скочування ($<1^\circ$) з високою міцністю за допомогою золь-гель методу. Основними компонентами золю були тетраетил ортосилікат і метилтриетоксисилан як матриця золю, триетоксиктилсилан як прекурсор з низькою поверхневою енергією та наночастинки пірогенного кремнезему для формування шорсткості. Міцність покриття була значно покращена шляхом додавання золів з різними значеннями рН і почергового нанесення їх на скляну підкладку. За рН 4 велика кількість гідроксильних груп зумовила хорошу адгезію до підкладки, а за рН 8 - підвищена конденсація сприяла більшій гідрофобності. В результаті

довговічність супергідрофобних властивостей в умовах прискореного старіння досягла 1500 годин, що вважається високою стійкістю до старіння. Покриття зберегло свою гідрофобність після трьох циклів випробування на відшарування стрічки та 26 хвилин безперервної ерозії суспензією. Щодо золь-гель техніки, дослідження продемонструвало, як підвищити стійкість супергідрофобного покриття, використовуючи лише хімічні властивості золів та доступні матеріали на основі нефтормісних сполук[8].

Плівки SiO_2 були виготовлені методом нанесення золь-гель системи на алюмінієві листи. Покриття, отримані за допомогою кислотного золю, однорідні й не мали дефектів. Структура покриттів, отриманих за допомогою основного золю, була пористою і містила нанометричні тріщини/отвори. Всі покриття мали хорошу корозійну стійкість, що тісно пов'язано з параметрами процесу нанесення покриття (зольний каталізатор, швидкість вилучення та температура термічної обробки) [28].

Кремнеземні золі, які містять гідрофільні (ОН) або гідрофобні (OSiH_3) групи, можна отримати шляхом регулювання кількості води, ТЕОС і основного каталізатора, що має значний вплив на ступінь гідролізу та конденсації. Повний гідроліз ТЕОС призводив до конденсації у вигляді двовимірного лінійного ланцюга або тривимірної сітчастої структури з великою кількістю груп ОН. Неповний гідроліз ТЕОС супроводжується утворенням тривимірної сітчастої структури з групами OSiH_3 . Крім того, зі збільшенням кількості основного каталізатора розмір частинок кремнезему збільшувався, а кількість груп з одинарним зв'язком OSiH_3 зростала. Серія плівок кремнезему на поверхні які мали різні кути контакту з водою від $7,7^\circ \pm 1,5^\circ$ до $121,6^\circ \pm 1,8^\circ$, була виготовлена за допомогою розробленого одноступеневого виробничого процесу, використовуючи лише золі кремнезему, отримані з ТЕОС, без будь-яких модифікацій. Поверхня неорганічних неметалевих, металевих і полімерних матеріалів могла підтримувати різну змочуваність. За термічної обробки гідрофобну плівку кремнезему можна було змінити на гідрофільну. Підвищення температури та подовження часу витримки були еквівалентні розриву хімічного зв'язку, що призводило до зміни змочуваності [29].

Гідролізати етилсилікату застосовуються як поверхневі просочувальні склади для обробки аеродромного цементобетону з метою зниження його проникності. Після нанесення вони проникають у поверхневий шар (кілька міліметрів) та в результаті гідролізу і конденсації утворюють додатковий C–S–H гель, який ущільнює порову структуру, зменшує водопоглинання, проникнення хлоридів і глибину карбонізації[30].

Перспективи для майбутніх досліджень і виклики. У зв'язку із глобальною тенденцією щодо енергоефективності, зменшення відходів при виробництві, а також принципами зеленої хімії, золь-гель процес із неорганічними прекурсорами постає одним із перспективних методів при розробці нових технологічних матеріалів із керованими властивостями на молекулярному рівні. Простота регульованих параметрів синтезу, комерційна доступність прекурсорів, а також можливість масштабованості є привабливою перевагою для багатьох галузей використання гідролізатів етилсилікату як основи. А їх поєднання з наповнювачами й ко-прекурсорами робить можливість створення принципово нових гібридних матеріалів широкого вжитку.

При чому, безперечно, присутні деякі недоліки які лімітують та ускладнюють використання таких систем. До них можна віднести:

- кислотний каталіз золів обмежує їх використання на металах безпосередньо, наприклад на магнієвій підкладці - є потреба в розробці більш м'якого каталізу або використання проміжних шарів.

- висока усадка гелей створює проблеми з розтріскуванням при формуванні покриттів – умови нанесення повинні бути спроектовані відповідним чином, або ж необхідно вводити органічні замісники.

- стійкість в різних середовищах, наприклад у водному також має бути покращена – проведення досліджень і збір експериментальних даних за різних умов.

- висока чутливість до параметрів середовища впливає на без того і так комплексний процес золь-гель синтезу – використання комп'ютерних моделей на фундаментальному рівні дозволить прогнозувати властивості результуючого гідролізату та його застосування.

- обмежений термін зберігання і можливість неконтрольованого гелеутворення –

необхідне створення складів з контрольованою кінетикою.

• окремою проблемою залишається низька відтворюваність результатів, зумовлена чутливістю процесу до незначних змін технологічних параметрів, а також недостатній рівень статистичної обробки експериментальних даних, що ускладнює об'єктивну оцінку стабільності золів і кінетики гелеутворення.

Висновки. У статті було представлено актуальність і корисність золь-гель технології отримання гідролізатів тетраетоксисиланів як для науки, так і для специфічних галузей матеріалознавства й інженерії, завдяки чіткій залежності структура-властивості та можливості впровадження в промислових масштабах. На основі проаналізованої літератури оглянуто фундаментальні процеси гідролізу та конденсації ТЕОС. Визначено вплив основних технологічних параметрів синтезу на структуру золю і властивості кінцевого матеріалу. Показано, що властивості та умови отримання гідролізатів визначають їх область застосування. Також продемонстровано проблематику та можливі майбутні напрямки досліджень.

Л і т е р а т у р а

1. Sol-gel based materials for biomedical applications / G. J. Owens et al. *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 77. P. 1–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.12.001>.
2. Wang D., Bierwagen G. P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 64, no. 4. P. 327–338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.010>.
3. Preparation and characterization of hydrophobic coatings on wood surfaces by a sol-gel method and post-aging heat treatment / L. Qu et al. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. P. 109429. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109429>.
4. A Review on Transparent Superhydrophobic Coatings for Self-cleaning Solar Cell Panels: Its Fabrication, Robustness and Industrial Implementation / S. S. Ingole et al. *Surfaces and Interfaces*. 2025. P. 106794. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106794>.
5. Brinker C. J. Hydrolysis and condensation of silicates: Effects on structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1988. Vol. 100, no. 1-3. P. 31–50. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(88\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(88)90005-1).
6. Figueira R. B. Hybrid Sol-gel Coatings for Corrosion Mitigation: A Critical Review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 689. URL: <https://doi.org/10.3390/polym12030689>.
7. Hench L. L., West J. K. The sol-gel process. *Chemical Reviews*. 1990. Vol. 90, no. 1. P. 33–72. URL: <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>.
8. Tuning up Sol-Gel Process to Achieve Highly Durable Superhydrophobic Coating / R. R. Hashjin et al. *Surfaces and Interfaces*. 2022. P. 102282. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102282>.
9. Cihlár J. Hydrolysis and polycondensation of ethyl silicates. 1. Effect of pH and catalyst on the hydrolysis and polycondensation of tetraethoxysilane (TEOS). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1993. Vol. 70, no. 3. P. 239–251. URL: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80298-s](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80298-s).
10. Formation and prevention of fractures in sol-gel-derived thin films / E. J. Kappert et al. *Soft Matter*. 2015. Vol. 11, no. 5. P. 882–888. URL: <https://doi.org/10.1039/c4sm02085e>.
11. Al-Saadi S., Singh Raman R. K. Silane Coatings for Corrosion and Microbiologically Influenced Corrosion Resistance of Mild Steel: A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7809. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15217809>.
12. Керамічні, композиційні матеріали та вогнестійкі покриття на основі гібридних гелів : монографія / О. Б. Скородумова та ін. Харків : НУЦЗУ, 2017. 102 с.
13. Two-step sol-gel method-based superhydrophobic SiO₂ antireflective coatings with high transmittance and excellent environmental stability / L. Ye et al. *Ceramics International*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.381>.
14. Superhydrophobic silica antireflective coatings with high transmittance via one-step sol-gel process / J. Xu et al. *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 631. P. 193–199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.03.005>.
15. Sol-gel processed silica based highly transparent self-cleaning coatings for solar glass covers / D. Adak et al. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. P. 2429–2433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.331>.
16. A simple method for preparation of transparent hydrophobic silica-based coatings on different substrates / F. Wang et al. *Applied Physics A*. 2011. Vol. 106, no. 1. P. 229–235. URL: <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6566-y>.
17. Семченко Г., Д. Золь-гель процес у керамічній технології. Харків, 1997. 144 с.
18. Cihlár J. Hydrolysis and polycondensation of ethyl silicates. 2. Hydrolysis and polycondensation of ETS40 (ethyl silicate 40). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1993. Vol. 70, no. 3. P. 253–268. URL: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80299-t](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80299-t).
19. Sakka S., Kamiya K. The sol-gel transition in the hydrolysis of metal alkoxides in relation to the formation of glass fibers and films. *Journal of Non-*

- Crystalline Solids. 1982. Vol. 48, no. 1. P. 31–46. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(82\)90244-7](https://doi.org/10.1016/0022-3093(82)90244-7).
20. Пашенко О. Поліфункціональні елементорганічні покриття. Київ : Вища шк., 1987. 198 с.
 21. Solvent-Free Process for the Development of Photocatalytic Membranes / R. M. Huertas et al. *Molecules*. 2019. Vol. 24, no. 24. P. 4481. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules24244481>.
 22. Issa A., Luyt A. Kinetics of Alkoxysilanes and Organoalkoxysilanes Polymerization: A Review. *Polymers*. 2019. Vol. 11, no. 3. P. 537. URL: <https://doi.org/10.3390/polym11030537>.
 23. Progress in Sol-Gel Technology for the Coatings of Fabrics / A. P. Periyasamy et al. *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 8. P. 1838. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13081838>.
 24. Control of the degradation of silica sol-gel hybrid coatings for metal implants prepared by the triple combination of alkoxysilanes / F. Romero-Gavilán et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2016. Vol. 453. P. 66–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.09.026>.
 25. TEOS-Based Fiber Fabrication via Electrospinning: Influence of Process Parameters and NMC Doping on Functional Properties / N. Tezgel et al. *Coatings*. 2025. Vol. 15, no. 10. P. 1220. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings15101220>.
 26. Silica Aerogels in Nano Drug Delivery Systems: A Comprehensive Review from Preparation to Medical Applications / X. Qian et al. *Gels*. 2025. Vol. 11, no. 11. P. 859. URL: <https://doi.org/10.3390/gels11110859>.
 27. Serban B. A., Barrett-Catton E., Serban M. A. Tetraethyl Orthosilicate-Based Hydrogels for Drug Delivery—Effects of Their Nanoparticulate Structure on Release Properties. *Gels*. 2020. Vol. 6, no. 4. P. 38. URL: <https://doi.org/10.3390/gels6040038>.
 28. Adelkhani H., Nasoodi S., Jafari A. H. Corrosion protection properties of silica coatings formed by sol–gel method on Al: The effects of acidity, withdrawal speed, and annealing temperature. *Progress in Organic Coatings*. 2014. Vol. 77, no. 1. P. 142–145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.08.011>.
 29. Controlled hydrophilic/hydrophobic property of silica films by manipulating the hydrolysis and condensation of tetraethoxysilane / X. Yang et al. *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 376. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.02.068>.
 30. Li T., Wu Y. Effect of Modified Tetraethyl Orthosilicate Surface Treatment Agents on the Permeability of Airport Pavement Concrete. *Coatings*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 1027. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12071027>.

References

1. Sol–gel based materials for biomedical applications / G. J. Owens et al. *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 77. P. 1–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.12.001>.
2. Wang D., Bierwagen G. P. Sol–gel coatings on metals for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 64, no. 4. P. 327–338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.010>.
3. Preparation and characterization of hydrophobic coatings on wood surfaces by a sol-gel method and post-aging heat treatment / L. Qu et al. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. P. 109429. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109429>.
4. A Review on Transparent Superhydrophobic Coatings for Self-cleaning Solar Cell Panels: Its Fabrication, Robustness and Industrial Implementation / S. S. Ingole et al. *Surfaces and Interfaces*. 2025. P. 106794. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106794>.
5. Brinker C. J. Hydrolysis and condensation of silicates: Effects on structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1988. Vol. 100, no. 1-3. P. 31–50. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(88\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(88)90005-1).
6. Figueira R. B. Hybrid Sol–gel Coatings for Corrosion Mitigation: A Critical Review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 689. URL: <https://doi.org/10.3390/polym12030689>.
7. Hench L. L., West J. K. The sol-gel process. *Chemical Reviews*. 1990. Vol. 90, no. 1. P. 33–72. URL: <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>.
8. Tuning up Sol-Gel Process to Achieve Highly Durable Superhydrophobic Coating / R. R. Hashjin et al. *Surfaces and Interfaces*. 2022. P. 102282. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102282>.
9. Cihlár J. Hydrolysis and polycondensation of ethyl silicates. 1. Effect of pH and catalyst on the hydrolysis and polycondensation of tetraethoxysilane (TEOS). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1993. Vol. 70, no. 3. P. 239–251. URL: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80298-s](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80298-s).
10. Formation and prevention of fractures in sol–gel-derived thin films / E. J. Kappert et al. *Soft Matter*. 2015. Vol. 11, no. 5. P. 882–888. URL: <https://doi.org/10.1039/c4sm02085e>.
11. Al-Saadi S., Singh Raman R. K. Silane Coatings for Corrosion and Microbiologically Influenced Corrosion Resistance of Mild Steel: A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7809. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15217809>.
12. Керамічні, композитні матеріали та вогнестійкі покриття на основі гібридних хелів : монографія / О. Б. Skorodumova та ін. Kharkiv : NUTS ZU, 2017. 102 с.
13. Two-step sol-gel method-based superhydrophobic SiO₂ antireflective coatings with high transmittance and excellent environmental stability / L. Ye et al.

- Ceramics International. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.381>.
14. Superhydrophobic silica antireflective coatings with high transmittance via one-step sol-gel process / J. Xu et al. Thin Solid Films. 2017. Vol. 631. P. 193–199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.03.005>.
 15. Sol-gel processed silica based highly transparent self-cleaning coatings for solar glass covers / D. Adak et al. Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. P. 2429–2433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.331>.
 16. A simple method for preparation of transparent hydrophobic silica-based coatings on different substrates / F. Wang et al. Applied Physics A. 2011. Vol. 106, no. 1. P. 229–235. URL: <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6566-y>.
 17. Semchenko H., D. Zol-hel protses u keramichnii tekhnolohii. Kharkiv, 1997. 144 s.
 18. Cihlár J. Hydrolysis and polycondensation of ethyl silicates. 2. Hydrolysis and polycondensation of ETS40 (ethyl silicate 40). Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1993. Vol. 70, no. 3. P. 253–268. URL: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80299-t](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80299-t).
 19. Sakka S., Kamiya K. The sol-gel transition in the hydrolysis of metal alkoxides in relation to the formation of glass fibers and films. Journal of Non-Crystalline Solids. 1982. Vol. 48, no. 1. P. 31–46. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(82\)90244-7](https://doi.org/10.1016/0022-3093(82)90244-7).
 20. Pashchenko O. Polifunktsionalni elementorhanichni pokryttia. Kyiv : Vyshcha shk., 1987. 198 s.
 21. Solvent-Free Process for the Development of Photocatalytic Membranes / R. M. Huertas et al. Molecules. 2019. Vol. 24, no. 24. P. 4481. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules24244481>.
 22. Issa A., Luyt A. Kinetics of Alkoxysilanes and Organoalkoxysilanes Polymerization: A Review. Polymers. 2019. Vol. 11, no. 3. P. 537. URL: <https://doi.org/10.3390/polym11030537>.
 23. Progress in Sol-Gel Technology for the Coatings of Fabrics / A. P. Periyasamy et al. Materials. 2020. Vol. 13, no. 8. P. 1838. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13081838>.
 24. Control of the degradation of silica sol-gel hybrid coatings for metal implants prepared by the triple combination of alkoxysilanes / F. Romero-Gavilán et al. Journal of Non-Crystalline Solids. 2016. Vol. 453. P. 66–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.09.026>.
 25. TEOS-Based Fiber Fabrication via Electrospinning: Influence of Process Parameters and NMC Doping on Functional Properties / N. Tezgel et al. Coatings. 2025. Vol. 15, no. 10. P. 1220. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings15101220>.
 26. Silica Aerogels in Nano Drug Delivery Systems: A Comprehensive Review from Preparation to Medical Applications / X. Qian et al. Gels. 2025. Vol. 11, no. 11. P. 859. URL: <https://doi.org/10.3390/gels11110859>.
 27. Serban B. A., Barrett-Catton E., Serban M. A. Tetraethyl Orthosilicate-Based Hydrogels for Drug Delivery—Effects of Their Nanoparticulate Structure on Release Properties. Gels. 2020. Vol. 6, no. 4. P. 38. URL: <https://doi.org/10.3390/gels6040038>.
 28. Adelkhani H., Nasoodi S., Jafari A. H. Corrosion protection properties of silica coatings formed by sol-gel method on Al: The effects of acidity, withdrawal speed, and annealing temperature. Progress in Organic Coatings. 2014. Vol. 77, no. 1. P. 142–145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.08.011>.
 29. Controlled hydrophilic/hydrophobic property of silica films by manipulating the hydrolysis and condensation of tetraethoxysilane / X. Yang et al. Applied Surface Science. 2016. Vol. 376. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.02.068>.
 30. Li T., Wu Y. Effect of Modified Tetraethyl Orthosilicate Surface Treatment Agents on the Permeability of Airport Pavement Concrete. Coatings. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 1027. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12071027>.

Tykhonov P.S., Sviderskyi V. A. Features of the technology for obtaining tetraethoxysilane hydrolysates for various functional purposes

The relevance of studying tetraethoxysilane hydrolysates is due to their wide range of applications in the creation of functional inorganic and hybrid materials with controlled properties, which are used in materials science, construction, medicine, energy, and protective technologies. The paper summarizes the features of obtaining tetraethoxysilane hydrolysates in the sol-gel process and analyzes the main technological parameters that determine their physicochemical stability and functional purpose. The mechanisms of hydrolysis and polycondensation of ethyl silicate in acidic and alkaline environments, as well as their influence on the formation of the siloxane structure of the sol, are considered. It is shown that the ratio of hydrolysis and condensation rates significantly depends on the pH of the environment: in an acidic environment, hydrolysis prevails over condensation, which contributes to the formation of homogeneous transparent sols, while in an alkaline environment, condensation intensifies and rapid formation of a spatially cross-linked siloxane network and particle enlargement occurs. The influence of the molar ratio of H₂O/TEOS, the type of catalyst, the nature of the solvent, the synthesis temperature, and the stirring conditions on the reaction kinetics and stability of the system was analyzed. It has been established that the optimal values of the synthesis parameters allow control of the particle morphology, the degree of siloxane network cross-linking, and the rheological properties of the hydrolysates. Particular attention is paid to the differences between TEOS and ethyl silicate-40, which

determine their application in laboratory and industrial technologies. It is shown that control of the sol composition and hydrolysis conditions makes it possible to regulate the properties of the final materials and expand their areas of application. The modern directions of application of TEOS hydrolysates are summarized, in particular in the formation of protective and anti-corrosion coatings, the synthesis of silica nanoparticles, aerogels, functional textile materials, fibers, and composite systems. The main problems associated with increasing the stability of sols, restrictions on use, reproducibility of results, and optimization of sol-gel synthesis technological modes are identified. The prospects for further research are substantiated.

Keywords: *sol-gel process, tetraethoxysilane, coatings, hydrolysis, polycondensation;*

Тихонов Платон Сергійович – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID 0009-0004-7208-6613.

tykhonov.platon@iit.kpi.ua

Свідерський Валентин Анатолійович – д.т.н., професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID 0000-0002-4457-6875.

xtkm@kpi.ua.

Дата першого надходження статті 22.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-107-118>

УДК 656.2:656.072:004.89

РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ПАСАЖИРОПОТОКАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Доля К.В.

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF URBAN PASSENGER FLOWS ON RAIL TRANSPORT IN REAL TIME

Dolia K.V.

У статті запропоновано інтегровану модель адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу, орієнтовану на зниження затримок, зменшення перевантаження вузлів та підвищення якості сервісу. Методологія поєднує просторово-мережевий аналіз, короткострокове прогнозування попиту, багатокритеріальну оптимізацію, симуляційне тестування керуючих сценаріїв і контур самоадаптації за результатами фактичного виконання рішень. Транспортну систему формалізовано як орієнтований граф із часово-змінними параметрами пропускну здатності та насичення, а вибір керуючих дій здійснюється за інтегральним критерієм, що враховує операційні, сервісні та енергетичні показники. Для врахування невизначеності використано сценарну перевірку альтернатив перед впровадженням у диспетчерську практику. На відміну від локальних підходів, запропонована архітектура забезпечує узгодження прогнозного, оптимізаційного та виконавчого рівнів у єдиному циклі прийняття рішень. Результати модельного експерименту показали стале покращення ключових індикаторів у порівнянні з базовим режимом: скорочення середніх затримок, зниження частки перевантажених вузлів, покращення сервісної стабільності та зменшення питомих енерговитрат. Проведений аналіз чутливості до зміни ваг критеріїв підтвердив робастність отриманих висновків у межах практично релевантних параметричних варіацій. Обґрунтовано, що найбільший ефект досягається за умов випереджального реагування на зростання насичення та синхронізації інформаційних впливів на пасажирів із оперативним коригуванням режимів руху. Практичне значення

роботи полягає у можливості впровадження моделі в диспетчерських центрах міських залізничних систем як інструменту підвищення надійності перевізного процесу, сервісної якості та ресурсної ефективності. Запропонований підхід може бути використаний як основа для цифрового двійника транспортного вузла, інтегрованого з поточними даними датчиків, системами інформування пасажирів і платформами підтримки диспетчерських рішень. Перспективою подальших досліджень є масштабування моделі на мультимодальні мережі та врахування довгострокових інфраструктурних обмежень. Окремо доцільно додатково дослідити вплив екстремальних подій на стійкість оперативного контуру керування.

Ключові слова: адаптивне управління; пасажиропотоки; міський залізничний транспорт; реальний час; короткострокове прогнозування; багатокритеріальна оптимізація; симуляційне моделювання; диспетчеризація.

Вступ. Сучасні міські агломерації характеризуються високою мобільністю населення, нерівномірністю попиту на перевезення та зростанням навантаження на транспортну інфраструктуру. За таких умов залізничний транспорт є системоутворювальним елементом міських і приміських перевезень, однак традиційні підходи до управління, що спираються на статичні графіки, не забезпечують належної гнучкості в пікові періоди та під час збурень. Це

зумовлює потребу переходу до адаптивного управління пасажиропотоками в режимі реального часу.

Аналіз сучасних досліджень підтверджує суттєвий прогрес у прогнозуванні пасажиропотоків, оптимізації роботи станцій, оцінюванні ефективності транспортних систем, а також у застосуванні цифрових двійників та інтелектуальних інструментів підтримки рішень. Водночас більшість наявних підходів вирішують локальні задачі та не формують єдиного інтегрованого контуру керування, який одночасно враховує оперативні обмеження, якість обслуговування пасажирів і ресурсну ефективність. Отже, науково-прикладна проблема побудови комплексної адаптивної моделі залишається актуальною.

Особливу вагу ця проблематика має для міських залізничних вузлів із високою інтенсивністю руху, де навіть незначні відхилення в інтервалах руху або збільшення часу посадки-висадки призводять до каскадних затримок і нерівномірного розподілу пасажиронавантаження. У практиці експлуатації це проявляється у перевантаженні окремих платформ, зниженні передбачуваності поїздок, погіршенні якості сервісу та зростанні експлуатаційних витрат. Тому сучасні підходи до керування мають бути орієнтовані не лише на післяфактум-аналіз, а насамперед на проактивне прийняття рішень: оперативне перерозподілення пасажиропотоків, адаптацію параметрів руху, узгодження пересадочних зв'язків та динамічне інформування пасажирів. Поєднання потокових даних, короткострокового прогнозу і сценарного оцінювання дозволяє формувати більш стійкий керуючий контур, здатний зменшувати пікові перевантаження та підвищувати надійність роботи транспортної системи загалом.

Метою роботи є розробка інтегрованої моделі адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу.

Об'єкт дослідження. Процеси формування та перерозподілу міських пасажиропотоків у системі залізничних перевезень.

Предмет дослідження. Методи та моделі адаптивного управління пасажиропотоками в умовах динамічної зміни попиту й параметрів функціонування транспортної мережі.

Завдання дослідження:

сформувати структуру інтегрованої моделі та інформаційні зв'язки між її підсистемами;

розробити механізм оперативного коригування керуючих рішень на основі поточних даних і короткострокового прогнозу; визначити критерії оцінювання ефективності моделі за показниками пропускної спроможності, регулярності та якості сервісу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений аналіз наукових джерел показує, що дослідження в галузі міських пасажирських перевезень на залізничному транспорті розвиваються у логіці поступового переходу від описових і локальних рішень до комплексних data-driven підходів. Ранній етап формувався навколо задач прогнозування попиту, операційного планування та технічних параметрів перевезень, тоді як сучасний етап дедалі більше орієнтується на інтеграцію цифрових даних, симуляцій і адаптивного керування в реальному часі. Саме ця еволюція підходів є критично важливою для теми статті, оскільки інтегрована модель адаптивного управління потребує одночасного врахування просторової структури попиту, стану інфраструктури, поведінки пасажирів та експлуатаційних обмежень.

У роботах [1]–[3] акцентовано фундаментальні передумови для побудови такої моделі. Дослідження [1] демонструє можливості аналізу просторової конфігурації транспортної мережі на основі великих масивів пасажирських даних, що дозволяє виділяти вузли концентрації попиту та оцінювати силу міжвузлових зв'язків. Праця [2] фокусується на трансформації систем громадського транспорту в умовах різких зовнішніх шоків і доводить необхідність гнучких організаційних механізмів реагування. У джерелі [3] розглянуто управлінсько-обліковий контур підприємств міського електротранспорту, який важливий для подальшого впровадження системи показників ефективності та відповідальності в адаптивній моделі.

Значний масив досліджень [4]–[12] присвячений оцінюванню ефективності та стійкості транспортних систем. У цих роботах застосовуються багатокритеріальні методики, DEA-підходи, логістичні принципи та методичні рамки порівняльного аналізу. Їхній ключовий внесок полягає у розширенні переліку критеріїв: від суто економічних до комплексних, які включають регулярність руху, якість сервісу, надійність, доступність і ресурсну ефективність. Водночас більшість моделей у цьому блоці є переважно статичними або періодичними за характером оновлення даних, що обмежує їхню

придатність для оперативного диспетчерського управління в умовах швидкої зміни пасажиронавантаження. Таким чином, ці праці створюють важливу методичну базу, але потребують інтеграції з інструментами реального часу.

Напрямок прогнозування попиту та поведінки пасажирів послідовно представлено в джерелах [13]–[15]. У роботі [13] порівнюються soft-computing підходи до передбачення вибору пасажиром поїздки, що є важливим для поведінкового моделювання. У [14] запропоновано концептуальну архітектуру «розумної» станції на базі цифрового двійника, яка принципово важлива для об'єднання потокових даних, аналітики і керуючих впливів. Дослідження [15] демонструє гібридний підхід до прогнозу попиту за умов складної динаміки часових рядів. У сукупності ці праці вказують, що підвищення точності прогнозу є необхідною, але недостатньою умовою: без інтеграції з блоком прийняття рішень прогноз не трансформується в керуючі дії.

Операційно-диспетчерський вимір предметно розкрито в роботах [16]–[20]. Джерело [16] демонструє переваги агентно-орієнтованого моделювання для вирішення задач диспетчеризації завантажених станцій, а [17] акцентує увагу на моделюванні оборотної спроможності станційних процесів. У [18] розглянуто розпізнавання активностей пасажирів за мобільними сенсорами, що відкриває додаткові можливості оперативного моніторингу. Праці [19], [20] зосереджені на коригуванні режимів роботи ліній та оптимізаційних планах функціонування пасажирських систем. Загалом цей блок підтверджує, що симуляційні та алгоритмічні підходи мають високий потенціал для управління у реальному часі, однак часто впроваджуються фрагментарно, без єдиного інтегрованого критеріального контуру.

Дослідження [21]–[23] формують екологічно-безпечний компонент літератури. У [21] аналізується якість повітря в пасажирських вагонах, у [22] – когнітивне навантаження машиністів, у [23] – енергоефективність бортових систем живлення з використанням відновлюваних джерел. Для теми статті ці результати є принциповими, оскільки адаптивна модель не може бути зведена лише до перерозподілу потоків: вона має враховувати безпечність, комфорт пасажирів і енергетичні наслідки управлінських рішень.

Блок [24]–[29] поглиблює аналітику попиту за рахунок дослідження заявок на бронювання, факторних моделей, нечітких оцінок QoS та data mining-підходів. Джерело [24] дає уявлення про часову структуру вхідного попиту в системах продажу квитків; [25], [26] виділяють ключові фактори, що визначають обсяги та поведінку пасажиропотоків; [27] інтегрує ієрархічні та нечіткі процедури для оцінки задоволеності сервісом; [28] пропонує мезоскопічне оцінювання спроможності станційної інфраструктури; [29] демонструє прикладне використання data mining для прогнозування потоків. Сукупно ці праці обґрунтовують доцільність побудови багаторівневої інформаційної моделі, де прогностичний, поведінковий та інфраструктурний компоненти взаємодіють в одному керуючому циклі.

Завершальний тематичний кластер [30]–[32] підкреслює роль цифрових сервісів

і технічної якості перевезень. У [30] розглянуто застосування NFC-технологій у пасажирському транспорті як інструмент підвищення зручності взаємодії з користувачем; у [31] використано TOPSIS для оцінки ефективності пересадок на станціях; у [32] проаналізовано вимірювання вібраційно-шумових параметрів у швидкісному рухомому складі. Ці результати доповнюють операційний контур досліджень, демонструючи, що кінцева ефективність системи визначається не лише пропускнуою спроможністю, а й якістю пасажирського досвіду.

Отже, узагальнення джерел [1]–[32] дозволяє зробити висновок, що наявна наукова база є достатньо широкою, проте фрагментованою: одні праці розв'язують задачі прогнозування, інші – задачі оцінювання ефективності, треті – задачі диспетчеризації чи сервісної цифровізації. Водночас недостатньо опрацьованою залишається постановка єдиної інтегрованої моделі, яка в режимі реального часу поєднує моніторинг, прогноз, симуляційне тестування сценаріїв, вибір керуючого рішення та його оцінювання за багатокритеріальною системою показників. Саме ця науково-прикладна прогалина обґрунтовує актуальність і логіку подальшого дослідження в межах обраної теми.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонований підхід до адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті сформовано як інтегровану методичну конструкцію, у якій поєднано прогнозні,

оптимізаційні, симуляційні та сервісно-орієнтовані інструменти. Така архітектура відповідає висновкам літературного аналізу [1]–[32], де показано, що ізольоване використання окремих методів (лише прогнозу, лише диспетчеризації або лише оцінки QoS) не забезпечує стабільного ефекту в умовах динамічної зміни попиту. Тому в межах дослідження реалізовано послідовний контур: *дані* → *прогноз* → *вибір керуючих дій* → *симуляційна перевірка* → *корекція рішень у реальному часі*.

Для розв’язання поставлених у роботі задач використано комбінований набір методів, обраний на основі релевантності до предметної області, обчислювальної реалізованості у режимі реального часу та можливості критеріально прозорого пояснення диспетчерських рішень. Нижче наведено розширений огляд кожного методу: його математичний зміст, управлінську інтерпретацію, сильні сторони та обмеження.

1. Методи просторово-мережевого аналізу.

Транспортна система подана орієнтованим графом $G = (V, E)$, де вершини V відповідають станціям, платформам або пересадковим вузлам, а ребра E — напрямам переміщення пасажирів між ними. Кожному ребру $(i, j) \in E$ ставиться у відповідність вектор параметрів $\mathbf{a}_{ij}(t) = \{\tau_{ij}(t), c_{ij}(t), q_{ij}(t)\}$, де $\tau_{ij}(t)$ — середній час проходження ділянки, $c_{ij}(t)$ — її пропускна спроможність, $q_{ij}(t)$ — поточний потік. Для виявлення структурно критичних вузлів використано зважену центральність (1):

$$C_i^{(w)} = \sum_{j:(i,j) \in E} \frac{q_{ij}}{\tau_{ij} + \eta}, \quad (1)$$

де $\eta > 0$ — стабілізуючий доданок.

Додатково аналізується баланс потоків у вузлі (2):

$$\Delta_i(t) = \sum_{j:(j,i) \in E} q_{ji}(t) - \sum_{k:(i,k) \in E} q_{ik}(t), \quad (2)$$

що дозволяє виявляти точки накопичення пасажирів. Смісл цього методу полягає у переході від локального «спостереження черг» до системного бачення топології перевантажень: диспетчер бачить не лише факт затору, а його мережеву причину (вузол-джерело, вузол-буфер, вузол-поглинач).

Аналіз методу показує, що мережевий підхід має дві ключові переваги: масштабованість для великих систем; природну інтеграцію з алгоритмами маршрутизації і перерозподілу потоків. Водночас він має і

суттєві обмеження. По-перше, агрегація пасажирів у потік q_{ij} приховує індивідуальні поведінкові відмінності (різну толерантність до пересадок, різну чутливість до затримок). По-друге, статична топологія G не повністю відображає тимчасові обмеження (закриття платформ, локальні ремонти, події блокування). По-третє, прості центральності можуть переоцінювати «геометрично важливі», але фактично недовантажені вузли. Для зменшення цих ризиків у роботі поєднано мережеву діагностику з часовими коефіцієнтами насичення та подальшою симуляційною перевіркою. Отже, мережевий аналіз не розглядається як самодостатній інструмент вибору рішень, а як перший аналітичний рівень, що фільтрує зони підвищеного ризику для наступних модулів.

2. Методи оцінювання ефективності та стійкості.

Для уникнення одновимірної оптимізації (лише за затримкою або лише за витратами) використано багатокритеріальний функціонал (3):

$$J(t) = \sum_{k=1}^m w_k \widetilde{F}_k(t), \quad \sum_{k=1}^m w_k = 1, w_k \geq 0, \quad (3)$$

де F_{ek} — нормовані критерії (затримки, перевантаження, енерговитрати, сервіс), w_k — вагові коефіцієнти.

Нормування виконується у вигляді (4):

$$\widetilde{F}_k(t) = F_k(t) - F_k^{\min} / F_k^{\max} - F_k^{\min} + \delta, \quad (4)$$

де δ запобігає діленню на нуль при вузькому діапазоні змін критерію.

Для оцінки стійкості рішень до зміни управлінських пріоритетів застосовано аналіз чутливості (5):

$$S_k = \left| \frac{\partial J}{\partial w_k} \right| \approx |\widetilde{F}_k|, \quad (5)$$

а також сценарне варіювання ваг у межах допустимого інтервалу. Смісл методу — формально узгодити суперечливі цілі, зберігши прозорість: диспетчер бачить, якою «ціною» покращується один показник і чи не погіршує це інші показники понад прийнятний поріг.

Критично важливо, що лінійно-зважена форма є компромісом між математичною строгістю та операційною інтерпретованістю. Її сильна сторона — швидке переобчислення у контурі реального часу та можливість явного

керування пріоритетами. Її слабкість — ризик «компенсації» поганого значення одного критерію добрим значенням іншого. Наприклад, незначне зниження енерговитрат може формально перекрити неприйнятне зростання часу очікування. Також результат залежить від якості калібрування ваг w_k : некоректна вагова політика може породжувати систематичні зміщення рішень. Тому у роботі багатокритеріальний функціонал доповнено жорсткими обмеженнями на граничні сервісні показники, а не лише їх «штрафами» в цільовій функції. Це зменшує ризик формально оптимальних, але соціально неприйнятних режимів експлуатації.

3. Методи прогнозування попиту.

Для короткострокового горизонту (5–15 хв) застосовано адаптивну рекурентну модель (6):

$$\hat{q}_i(t + \Delta T) = \alpha_i(t)q_i(t) + (1 - \alpha_i(t))\hat{q}_i(t) + \beta_1\phi_i(t) + \beta_2\psi_i(t), \quad (6)$$

де $q_i(t)$ — вимірний потік у вузлі i , $\hat{q}_i(t)$ — попередній прогноз, $\phi_i(t)$ — календарночасові фактори, $\psi_i(t)$ — події фактори.

Адаптація параметра пам'яті виконується за правилом (7):

$$\alpha_i(t + 1) = \text{clip}(\alpha_i - \mu \partial \epsilon_i t \partial \alpha_i, \alpha_{\min}, \alpha_{\max}), \quad (7)$$

Практичний смисл методу полягає у тому, що модель «підлаштовує» інерційність: при спокійному русі більше довіряє історії, а при різких збуреннях оперативніше реагує на нові вимірювання.

Критичний аналіз цього підходу має дві площини. З одного боку, модель відзначається обчислювальною легкістю, прозорістю параметрів і стійкістю за неповних даних, що є критично важливим для диспетчерських систем. З іншого боку, її прогностична здатність обмежена у випадках складної нелінійної динаміки (масові події, каскадні збої, багатокритеріальні піки попиту), де глибокі нейромережеві моделі потенційно точніші. Додатковий ризик — переналаштування під короткий горизонт, що знижує якість прогнозу на 20–40 хв. Саме тому у роботі рекурентний прогноз не використовується як «остаточна істина»: кожне керуюче рішення додатково проходить симуляційну валідацію, а при зростанні похибки понад поріг запускається консервативний режим керування. Така

архітектура знижує залежність системи від помилок окремого прогностичного блоку.

4. Методи оперативної диспетчеризації та симуляції. Вибір керуючої дії виконується в дискретні моменти t_r через задачу умовної оптимізації (8):

$$u^*(t_r) = \arg \min, \quad (8)$$

де $x(t_r)$ — вектор стану мережі, $U(t_r)$ — множина допустимих дій (зміна інтервалів, перерозподіл потоків, інформаційні сценарії). Кандидатні дії перевіряються на моделі переходу стану (9,10):

$$x(t + \Delta t) = f(x(t), u(t), \xi(t)), \quad (9)$$

де $\xi(t)$ — випадкові збурення. Для оцінки надійності рішення застосовано очікуваний ризик

$$R(u) = E_{\xi}[L(x, u, \xi)], \quad (10)$$

а в оперативний контур передається рішення, що одночасно мінімізує J та не перевищує допустимий поріг ризику. Смисл методу — не лише знайти математично «найкращий» варіант, а перевірити його поведінку в умовах невизначеності до фактичного впровадження.

Критичний аналіз показує, що симуляційний контур суттєво підвищує надійність керування, але має ціну. По-перше, точність результату залежить від адекватності калібрування моделі $f(\cdot)$; погано ідентифіковані параметри можуть породжувати хибне відчуття безпеки. По-друге, у режимі жорстких часових обмежень неможливо перевірити «всі» сценарії, отже виникає проблема неповного покриття ризиків. Потрете, надмірно складна симуляція може сповільнити контур прийняття рішень і зробити реакцію запізнілою. Для балансування цих суперечностей у роботі використано дворівневу логіку: швидкий скринінг сценаріїв спрощеною моделлю і поглиблена перевірка лише для 2–3 найкращих альтернатив. Це дозволяє зберегти обчислювальну дисципліну без втрати критично важливої перевірки керуючих дій.

5. Методи оцінки сервісу та поведінкових реакцій. Для включення «людського фактора» у контур керування застосовано сервісний індекс (11):

$$S(t) = \gamma_1 \widetilde{T_{wait}}(t) + \gamma_2 \widetilde{T_{transfer}}(t) + \gamma_3 \widetilde{I_{comfort}}(t), \quad \sum_{j=1}^3 \gamma_j = 1 \quad (11)$$

Реакцію пасажирів на інформаційні впливи (оголошення, навігацію, push-повідомлення) формалізовано через імовірність вибору альтернативного маршруту (12):

$$P_{r \rightarrow s}(t) = \frac{\exp(-\lambda C_s(t) + \kappa I_s(t))}{\sum_{m \in \mathcal{R}} \exp(-\lambda C_m(t) + \kappa I_m(t))}, \quad (12)$$

де $C_s(t)$ — узагальнена «вартість» маршруту, $I_s(t)$ — інтенсивність інформаційної підтримки, λ, κ — параметри чутливості.

Для неповних даних використано нечітке ранжування QoS із функцією належності (13):

$$\mu_{QoS}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_{min} \\ z - z_{min} / z_{max} - z_{min}, & z_{min} < z < z_{max}, \\ 1, & z \geq z_{max} \end{cases} \quad (13)$$

Смисл підходу полягає у тому, що керування перестає бути суто інфраструктурним і враховує поведінковий відгук пасажирів, без якого реальний ефект диспетчерських дій часто виявляється нижчим за розрахунковий.

Критично цей метод слід оцінювати обережно. Його перевага — здатність зменшити розрив між «плановим» і «фактичним» ефектом, особливо для пересадкових вузлів із високою інформаційною невизначеністю. Проте на поведінкові моделі впливають соціодемографічні та контекстні фактори, які важко повно врахувати в оперативному контурі. Параметри λ, κ з часом дрейфують, а нечіткі оцінки можуть маскувати гетерогенність груп пасажирів. Крім того, надмірна ставка на інформаційне перенаправлення без інфраструктурної підтримки інколи лише «переміщує» проблему між платформами. Тому у роботі поведінковий модуль використовується як доповнення до інфраструктурних дій, а його параметри регулярно перекалібровуються за фактичними даними виконання пересадок.

6. Методи енергетично-екологічної верифікації. Для оцінки ресурсної ефективності рішень введено показник питомих енерговитрат (14):

$$E_{sp}(t) = \frac{E_{tot}(t)}{Q_{tot}(t)}, \quad (14)$$

де $E_{tot}(t)$ — енергія, спожита у вікні аналізу, $Q_{tot}(t)$ — кількість перевезених пасажирів. Енергетичний баланс деталізовано як (15):

$$E_{tot} = \sum_{p \in \mathcal{P}} \int_{t_0}^{t_1} (P_p^{tr}(t) + P_p^{aux}(t)) dt, \quad (15)$$

де P_p^{tr} — тягове, P_p^{aux} — допоміжне споживання. Для екологічної інтерпретації використано індикатор умовних викидів (16):

$$CO_2^{eq}(t) = \chi E_{tot}(t), \quad (16)$$

де χ — питомий коефіцієнт вуглецевого еквівалента для відповідного енергоміксу. Смисл методу — перевірити, чи не досягається операційне покращення (зниження затримок) неприйнятним зростанням енергоспоживання та екологічного навантаження.

Критичний аналіз показує, що введення енергетично-екологічного контуру дисциплінує процес оптимізації і захищає систему від короткозорих рішень. Водночас є методичні труднощі: складність точного розділення тягової та допоміжної складових у реальному часі; залежність показника CO_2^{eq} від зовнішнього енергоміксу, який оператор перевезень контролює лише частково; конфлікт між енергозощадженням і сервісом у пікові періоди. За цих умов енергокритерій у роботі використано як рівноправний, але не домінуючий: рішення відхиляються, якщо покращують один вимір ефективності за рахунок непропорційного погіршення інших. Такий підхід забезпечує не лише оперативну, а й стратегічну стійкість моделі.

Опис застосованих методів та аргументація їх вибору

Математичну основу моделі задано через вектор стану системи (17):

$$\mathbf{x}(t) = \{q_i(t), h_j(t), v_j(t), c_k(t), s_l(t), e_j(t)\}, \quad (17)$$

де $q_i(t)$ — потік пасажирів у вузлі i ; $h_j(t)$ — інтервал руху на дільниці j ; $v_j(t)$ — швидкість; $c_k(t)$ — пропускна спроможність; $s_l(t)$ — сервісний стан вузла l ; $e_j(t)$ — енерговитрати в контурі j . Керуючі впливи формують вектор (18):

$$\mathbf{u}(t) = \{\Delta h_j(t), \Delta \tau_s(t), \Delta r_z(t), \Delta I_n(t)\}, \quad (18)$$

де $\Delta r_z(t)$ — керований перерозподіл потоку між альтернативними маршрутами, а $\Delta I_n(t)$ — зміна інформаційного сценарію для пасажирів (вивіски, додаток, гучномовні оголошення).

Цільова функція багатокритеріальної оптимізації має вигляд (19, 20):

$$J(t) = w_1 \widetilde{F_{delay}}(t) + w_2 \widetilde{F_{crowd}}(t) + w_3 \widetilde{F_{energy}}(t) + w_4 \widetilde{F_{service}}(t), \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^4 w_k = 1, \quad w_k \geq 0, \quad (20)$$

де тильдою позначено нормовані критерії. Нормування виконано за формулою (21):

$$\widetilde{F}_k(t) = F_k(t) - F_k^{min}/F_k^{max} - F_k^{min} + \delta, \quad (21)$$

де δ — малий стабілізуючий параметр.

Вибір лінійно-зваженої форми функціоналу обґрунтований практикою транспортних оцінок [4], [8], [11], [31]: вона інтерпретована для диспетчера, придатна для швидкої переоцінки ваг і забезпечує прозорість управлінської логіки. Більш складні нелінійні конструкції відхилено на цьому етапі, оскільки вони підвищують обчислювальні витрати і ускладнюють пояснюваність рішень.

Короткостроковий прогноз попиту формується адаптивним рівнянням (22):

$$\widehat{q}_i(t + \Delta T) = \alpha q_i(t) + (1 - \alpha)\widehat{q}_i(t) + \beta_1 \phi_i(t) + \beta_2 \psi_i(t), \quad (22)$$

де $\phi_i(t)$ — календарно-часові фактори, $\psi_i(t)$ — подієві фактори (збої, пересадочні хвилі, нерівномірність прибуття). Параметри α, β_1, β_2 коригуються онлайн за критерієм мінімуму поточної похибки прогнозу (23):

$$\varepsilon_i(t) = \frac{|q_i(t) - \widehat{q}_i(t)|}{q_i(t) + \epsilon}. \quad (23)$$

Чому обрано саме адаптивну рекурентну модель? По-перше, вона стабільна на короткому горизонті та не потребує надвеликих навчальних вибірок, що відповідає умовам оперативної експлуатації [24], [29]. По-друге, параметри можна коригувати в реальному часі без повного перенавчання. По-третє, такий підхід добре узгоджується з факторною логікою робіт [25], [26].

Для інфраструктурного контролю застосовано коефіцієнт насичення (24):

$$P_k(t) = \frac{q_k(t)}{c_k(t)}. \quad (24)$$

Прийнято три зони керування: штатна ($\rho_k \leq 0.85$), попереджувальна ($0.85 < \rho_k \leq 1.0$), критична ($\rho_k > 1.0$). Така градація відповідає практиці оперативної диспетчеризації та дозволяє запускати превентивні сценарії ще до входу в критичне перевантаження.

У сервісному контурі використано узагальнений індекс (25):

$$S(t) = \gamma_1 \widetilde{T}_{wait}(t) + \gamma_2 \widetilde{T}_{transfer}(t) + \gamma_3 \widetilde{I}_{comfort}(t), \quad (25)$$

де T_{wait} — нормований час очікування;

$T_{transfer}$ — нормований час пересадки;

$I_{comfort}$ — інтегральний індикатор комфортності. Включення цього індексу обґрунтовано роботами [27], [30], [31], у яких доведено, що сервісні параметри безпосередньо впливають на перерозподіл пасажиропотоків.

Енергетичний ефект оцінюється питомим показником (26):

$$E_{sp}(t) = \frac{E_{tot}(t)}{Q_{tot}(t)}, \quad (26)$$

де E_{tot} — сумарні енерговитрати у вікні спостереження, Q_{tot} — кількість перевезених пасажирів. Включення E_{sp} до оптимізаційного критерію підтримано висновками [6], [7], [23].

Загальну логіку взаємодії модулів наведено на рис. 1.

Проведемо експеримент. Мета експерименту. Перевірити, чи забезпечує запропонована модель статистично помітне покращення порівняно з базовим режимом статичного керування графіком і пересадками.

Об'єкт експерименту. Типова міська залізнична підсистема з 12 станціями, 3 пересадковими вузлами, 2 піковими хвилями попиту протягом операційного вікна 120 хв. Стан системи оновлювався кожні 5 хв.



Рис. 1. Структурно-функціональна схема інтегрованої моделі

Сценарії.

Сценарій А (базовий): фіксовані інтервали, реакція лише після факту перевантаження;

Сценарій В (адаптивний): прогноз + багатокритеріальна оптимізація + сценарна перевірка рішень.

Метрика порівняння. Використано чотири ключові індикатори: середня затримка пасажирів T_{delay} , частка перевантажених вузлів P_{over} , питомі енерговитрати E_{sp} , індекс сервісної стабільності I_{serv} . Додатково розраховано інтегральний індекс керованості (27):

$$K_{\text{adm}} = 1 - \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \max(0, \rho_k - 1). \quad (27)$$

Параметри оптимізації. У базовому варіанті обрано ваги $w_1 = 0.35$, $w_2 = 0.30$, $w_3 = 0.20$, $w_4 = 0.15$. Таке співвідношення відображає пріоритет мінімізації затримок і перевантажень, але з обов'язковим урахуванням енерго- та сервісних компонентів. Процедура. Для кожного кроку часу виконувались:

- (1) оновлення даних;
- (2) прогноз на горизонт $\Delta T = 10$ хв;
- (3) формування набору керуючих альтернатив;
- (4) обчислення J для кожної альтернативи;
- (5) вибір найкращої дії;
- (6) симуляційна перевірка наслідків і, за потреби, корекція. Загальна кількість ітерацій у одному прогоні — 24.

Відносне покращення за ключовими метриками склало: за затримкою – близько 30%, за часткою перевантажених вузлів – понад 40%, за питомими енерговитратами – близько 9%, за сервісною стабільністю – близько 20%. Це підтверджує, що інтеграція прогнозного й оптимізаційного контурів дає не локальний, а системний ефект.

Динаміка коефіцієнта насичення для найбільш завантаженого вузла подана на рис. 2. Видно, що в адаптивному режимі пік навантаження нижчий, а період перебування в зоні $\rho > 1$ суттєво коротший.

Аналіз стійкості результату. Додатково проведено варіацію ваг w_k у межах ± 0.05 від базових значень. Отримано, що за всіх протестованих комбінацій сценарій В зберігає перевагу над сценарієм А за T_{delay} і P_{over} , а відхилення фінальних значень не перевищує 6–8%. Це дозволяє вважати результат робастним до помірних змін пріоритетів диспетчерського керування.

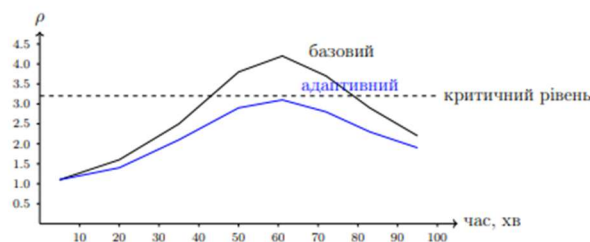


Рис. 2. Порівняння динаміки насичення вузла у двох сценаріях

Обмеження експерименту. По-перше, частина вхідних параметрів задана у вигляді агрегованих потоків, без індивідуальних траєкторій пасажирів. По-друге, у поточній версії не враховано повний набір довгострокових інфраструктурних обмежень (ремонтні «вікна», сезонні режими). По-третє, сервісний індекс розраховано у спрощеній нормованій формі. Проте ці обмеження не нівелюють головного висновку про ефективність інтегрованого підходу.

Отже, проведений експеримент підтвердив доцільність обраного комплексу методів та коректність їх інтеграції в єдину модель адаптивного управління. Поєднання мережевого аналізу, короткострокового прогнозу, багатокритеріальної оптимізації й симуляційної перевірки забезпечує відчутне покращення операційних, сервісних та ресурсних показників. Отримані результати формують практичну основу для подальшого масштабування моделі на рівень реальних міських залізничних систем із підключенням цифрових двійників і потокових диспетчерських платформ.

Висновки. У роботі розв'язано науково-прикладну задачу побудови інтегрованої моделі адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу. На основі аналізу сучасних досліджень обґрунтовано доцільність поєднання мережевого представлення транспортної системи, короткострокового прогнозування попиту, багатокритеріальної оптимізації керуючих дій та симуляційної верифікації сценаріїв. Запропонована модель формалізована через вектор стану, вектор керувань і цільову функцію, що враховує затримки, перевантаження вузлів, енерговитрати та сервісні параметри.

Проведений експеримент засвідчив, що адаптивний контур керування забезпечує системне покращення ключових показників функціонування: зменшення середніх затримок

пасажирів, скорочення частки перевантажених вузлів, підвищення сервісної стабільності та зниження питомих енерговитрат порівняно з базовим статичним режимом. Отримані результати підтверджують практичну придатність обраного комплексу методів і доводять ефективність інтеграції прогнозного, оптимізаційного та контрольного модулів в єдиному циклі прийняття рішень.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному поєднанні методів, які в більшості наявних досліджень застосовуються ізольовано, та в реалізації єдиного механізму адаптації керувань до динаміки попиту в короткому часовому горизонті. Практичне значення результатів полягає у можливості впровадження моделі в диспетчерських центрах міських залізничних систем для підвищення стійкості перевізного процесу, покращення якості обслуговування пасажирів і підтримки ресурсно-ефективної експлуатації. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі на мультимодальні мережі, включенням довгострокових інфраструктурних обмежень та інтеграцією з цифровими двійниками транспортних вузлів.

Література

1. Urban network spatial connection and structure in China based on railway passenger flow big data / M. Li et al. *Land*. 2022. Vol. 11, № 2. Art. 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020225>.
2. Petrov A. I., Petrova D. A. Open business model of COVID-19 transformation of an urban public transport system: The experience of a large Russian city. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021. Vol. 7, № 3. Art. 171. DOI: <https://doi.org/10.3390/joitmc7030171>.
3. Nykyforak I., Duhanets N., Kobrusieva Y. Organization of responsibility accounting of city electric transport enterprises' activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, № 3-92. P. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126178>.
4. Makarova I., Shubenkova K., Pashkevich A. Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*. 2021. Vol. 36, № 2. P. 123–133. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14996>.
5. Increased efficiency and reliability of maintenance of mass passenger flow with the regular route network of city transport / V. Kurganov et al. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2020. Vol. 108. P. 107–119. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.108.10>.
6. Diversity and changes in energy consumption by transport in EU countries / T. Rokicki et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 17. Art. 5414. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14175414>.
7. Energy efficiency solutions for sustainable urban mobility: Case study of the Milan metropolitan area / C. N. Businge et al. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019. Vol. 182. P. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.2495/UT180151>.
8. Development of provisions for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport system / S. Mochalin et al. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14, № 1. P. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.5>.
9. Saxena P. A benchmarking strategy for Delhi Transport Corporation: An application of data envelopment analysis. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2019. Vol. 4, № 1. P. 232–244. DOI: <https://doi.org/10.33889/ijmems.2019.4.1-020>.
10. Condition for application of logistic principles in practice of urban public passenger transport in the city of Omsk / S. Mochalin et al. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12, Special Edition. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.6>.
11. Vdovychenko V., Nagornyy Y. Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, № 3-81. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>.
12. Morchadze T., Rusadze N. Ways to address the challenges in passenger traffic within the urban transport systems. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13, № 3. P. 65–77. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.3>.
13. Xi Y. et al. A comparative study on predict effects of railway passenger travel choice based on two soft computing methods. *LISS 2012 Proceedings*. Springer, 2013. P. 543–552. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32054-5_77.
14. Li D., Yang X., Xu X. A framework of smart railway passenger station based on digital twin. *CICTP 2020 Proceedings*. ASCE, 2020. P. 2623–2634. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482933.22>.
15. Peng C. A hybrid method based on chaotic phase space restructuring and comparability principle for railway passenger demand forecasting. *ICTE 2007 Proceedings*. ASCE, 2007. P. 3536–3541. DOI: [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)580](https://doi.org/10.1061/40932(246)580).
16. He B. et al. A microscopic agent-based simulation for real-time dispatching problem of a busy railway passenger station. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294651>.
17. Liu W., Li J. A simulation model and algorithm for turning-back capacity of intercity dedicated passenger railway station. *ICTE 2011 Proceedings*.

- ASCE, 2011. P. 948–953. DOI: [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)157](https://doi.org/10.1061/41184(419)157).
18. Activity recognition of railway passengers by fusion of low-power sensors in mobile phones / M. Elhamshary et al. *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1145/2820783.2820847>.
19. Chen D., Li Y., Zhang Y. Adjustment of intercity passenger dedicated line operation. *ICTE 2011 Proceedings*. ASCE, 2011. P. 1168–1173. DOI: [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)193](https://doi.org/10.1061/41184(419)193).
20. Xie X., Feng X., Ren Q. Adjustment plan of passenger traffic special line optimization study. *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*. ASCE, 2008. P. 3791–3796. DOI: [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)556](https://doi.org/10.1061/40996(330)556).
21. Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China / T. Li et al. *Science of the Total Environment*. 2006. Vol. 367, № 1. P. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.007>.
22. Haramina H., Ljubaj I., Toš I. An analysis of passenger train driver's cognitive workload in relation to Croatian national train control system. *Sigurnost*. 2017. Vol. 59, № 2. P. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.31306/s.59.2.1>.
23. An energy efficiency assessment of a railroad passenger-car power-supply system using wind generators and photovoltaic panels / A. N. Balalaev et al. *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, № 3. P. 195–198. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371220030062>.
24. Bao Y., Liu J., Ma M. Analysis and simulation of passengers' ticket booking request arrival process in a ticket booking period. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2012. Vol. 36, № 6. P. 27–32.
25. Gu S., Lu X. Analysis of China railway passenger volume's influence factors based on principal component regression. *LISS 2015*. IEEE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369737>.
26. Xi Y., Jing L. Analysis on predict model of railway passenger travel factors judgment with soft-computing methods. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2014. Vol. 7, № 1. P. 100–114. DOI: <https://doi.org/10.3926/jiem.940>.
27. Deng P., Chuansheng Z. Analytic hierarchy process and fuzzy evaluation of passengers' satisfactory degree for QoS of railway passenger transportation. *WCICA Proceedings*. IEEE, 2010. P. 5215–5220. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2010.5554881>.
28. Zhong M., Yue Y., Li D. Analyzing and evaluating infrastructure capacity of railway passenger station by mesoscopic simulation method. *ICIRT 2018*. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018>.
29. Application of data mining in the forecasting of railway passenger flow / D. Zheng et al. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 834-836. P. 958–962. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.834-836.958>.
30. Application of NFC technology in railway passenger transport by introducing new products / E. Brumercikova et al. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2017. Vol. 19, № 2. P. 32–35.
31. Zhang C., Xu L. Application of TOPSIS in evaluating transfer efficiency at urban railway passenger station. *ICTE 2009 Proceedings*. ASCE, 2009. P. 1866–1871. DOI: [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)309](https://doi.org/10.1061/41039(345)309).
32. Application research of vibration and noise test and analysis system in high speed railway passenger car / Y. Liu et al. *ICMTMA 2011 Proceedings*. IEEE, 2011. Vol. 1. P. 573–576. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.146>.

References

1. Li, M., Guo, W., Guo, R., He, B., Li, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2022). Urban network spatial connection and structure in China based on railway passenger flow big data. *Land*, 11(2), Article 225. <https://doi.org/10.3390/land11020225>
2. Petrov, A. I., & Petrova, D. A. (2021). Open business model of COVID-19 transformation of an urban public transport system: The experience of a large Russian city. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(3), Article 171. <https://doi.org/10.3390/joitmc7030171>
3. Nykyforak, I., Duhanets, N., & Kobrusieva, Y. (2018). Organization of responsibility accounting of city electric transport enterprises' activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3-92), 31–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126178>
4. Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2021). Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*, 36(2), 123–133. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14996>
5. Kurganov, V., Gryaznov, M., Davydov, K., & Polyakova, L. (2020). Increased efficiency and reliability of maintenance of mass passenger flow with the regular route network of city transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 108, 107–119. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.108.10>
6. Rokicki, T., Koszela, G., Ochnio, L., Wojtczuk, K., Ratajczak, M., Szczepaniuk, H., ... & Bereźnicka, J. (2021). Diversity and changes in energy consumption by transport in EU countries. *Energies*, 14(17), Article 5414. <https://doi.org/10.3390/en14175414>
7. Businge, C. N., Viani, S., Pepe, N., Borgarello, M., Caruso, C., Tripodi, G., & Soresinetti, S. (2019).

- Energy efficiency solutions for sustainable urban mobility: Case study of the Milan metropolitan area. *WIT Transactions on the Built Environment*, 182, 151–163. <https://doi.org/10.2495/UT180151>
8. Mochalin, S., Kasper, M., Nikiforov, O., Levkin, G., & Kurshakova, N. (2019). Development of provisions for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport system. *Transport Problems*, 14(1), 45–58. <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.5>
 9. Saxena, P. (2019). A benchmarking strategy for Delhi Transport Corporation: An application of data envelopment analysis. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4(1), 232–244. <https://doi.org/10.33889/ijmems.2019.4.1-020>
 10. Mochalin, S., Kasper, M., Nikiforov, O., & Levkin, G. (2017). Condition for application of logistic principles in practice of urban public passenger transport in the city of Omsk. *Transport Problems*, 12(Special Edition), 71–86. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.6>
 11. Vdovychenko, V., & Nagorny, Y. (2016). Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3-81), 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>
 12. Morchadze, T., & Rusadze, N. (2018). Ways to address the challenges in passenger traffic within the urban transport systems. *Transport Problems*, 13(3), 65–77. <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.3>
 13. Xi, Y., Li, Z., Long, C., Shu, K., Yue, G., & Jing, L. (2013). A comparative study on predict effects of railway passenger travel choice based on two soft computing methods. In *LISS 2012 Proceedings* (pp. 543–552). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32054-5_77
 14. Li, D., Yang, X., & Xu, X. (2020). A framework of smart railway passenger station based on digital twin. In *CICTP 2020 Proceedings* (pp. 2623–2634). ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784482933.22>
 15. Peng, C. (2007). A hybrid method based on chaotic phase space restructuring and comparability principle for railway passenger demand forecasting. In *ICTE 2007 Proceedings* (pp. 3536–3541). ASCE. [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)580](https://doi.org/10.1061/40932(246)580)
 16. He, B., Chen, P., D'Ariano, A., Chen, L., Zhang, H., & Lu, G. (2020). A microscopic agent-based simulation for real-time dispatching problem of a busy railway passenger station. In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294651>
 17. Liu, W., & Li, J. (2011). A simulation model and algorithm for turning-back capacity of intercity dedicated passenger railway station. In *ICTE 2011 Proceedings* (pp. 948–953). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)157](https://doi.org/10.1061/41184(419)157)
 18. Elhamshary, M., Youssef, M., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., & Higashino, T. (2015). Activity recognition of railway passengers by fusion of low-power sensors in mobile phones. In *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2820783.2820847>
 19. Chen, D., Li, Y., & Zhang, Y. (2011). Adjustment of intercity passenger dedicated line operation. In *ICTE 2011 Proceedings* (pp. 1168–1173). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)193](https://doi.org/10.1061/41184(419)193)
 20. Xie, X., Feng, X., & Ren, Q. (2008). Adjustment plan of passenger traffic special line optimization study. In *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals* (pp. 3791–3796). ASCE. [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)556](https://doi.org/10.1061/40996(330)556)
 21. Li, T., Bai, Y., Liu, Z., Liu, J., Zhang, G., & Li, J. (2006). Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 367(1), 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.007>
 22. Haramina, H., Ljubaj, I., & Toš, I. (2017). An analysis of passenger train driver's cognitive workload in relation to Croatian national train control system. *Sigurnost*, 59(2), 99–108. <https://doi.org/10.31306/s.59.2.1>
 23. Balalaev, A. N., Korkina, S. V., Plokhov, E. M., & Polovinkina, A. Y. (2020). An energy efficiency assessment of a railroad passenger-car power-supply system using wind generators and photovoltaic panels. *Russian Electrical Engineering*, 91(3), 195–198. <https://doi.org/10.3103/S1068371220030062>
 24. Bao, Y., Liu, J., & Ma, M. (2012). Analysis and simulation of passengers' ticket booking request arrival process in a ticket booking period. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 36(6), 27–32.
 25. Gu, S., & Lu, X. (2015). Analysis of China railway passenger volume's influence factors based on principal component regression. In *LISS 2015*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369737>
 26. Xi, Y., & Jing, L. (2014). Analysis on predict model of railway passenger travel factors judgment with soft-computing methods. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(1), 100–114. <https://doi.org/10.3926/ijem.940>
 27. Deng, P., & Chuansheng, Z. (2010). Analytic hierarchy process and fuzzy evaluation of passengers' satisfactory degree for QoS of railway passenger transportation. In *WCICA Proceedings* (pp. 5215–5220). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2010.5554881>
 28. Zhong, M., Yue, Y., & Li, D. (2018). Analyzing and evaluating infrastructure capacity of railway passenger station by mesoscopic simulation method. In *ICIRT 2018*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018>
 29. Zheng, D., Wang, Y., Tang, P. Z., & Wu, Y. P. (2014). Application of data mining in the

- forecasting of railway passenger flow. *Advanced Materials Research*, 834-836, 958–962. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.834-836.958>
30. Brumerickova, E., Bukova, B., Kondek, P., & Drozdziel, P. (2017). Application of NFC technology in railway passenger transport by introducing new products. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 19(2), 32–35.
 31. Zhang, C., & Xu, L. (2009). Application of TOPSIS in evaluating transfer efficiency at urban railway passenger station. In *ICTE 2009 Proceedings* (pp. 1866–1871). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)309](https://doi.org/10.1061/41039(345)309)
 32. Liu, Y., Yang, B., Zhang, X. P., & Xing, S. M. (2011). Application research of vibration and noise test and analysis system in high speed railway passenger car. In *ICMTMA 2011 Proceedings* (Vol. 1, pp. 573–576). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.146>

Dolia K.V. Development of an integrated model for adaptive management of urban passenger flows on rail transport in real time

The article proposes an integrated model of adaptive management of urban passenger flows in railway transport in real time, focused on reducing delays, reducing congestion at nodes and improving the quality of service. The methodology combines spatial-network analysis, short-term demand forecasting, multi-criteria optimization, simulation testing of control scenarios and a self-adaptation circuit based on the results of actual decision implementation. The transport system is formalized as a directed graph with time-varying parameters of throughput and saturation, and the selection of control actions is carried out according to an integral criterion that takes into account operational, service and energy indicators. To take into account uncertainty, scenario testing of alternatives was used before implementation in dispatching practice. Unlike local approaches, the proposed architecture ensures coordination of the forecast, optimization and execution levels in a single decision-making cycle. The results of the model experiment showed a steady

improvement of key indicators compared to the baseline: reduction of average delays, reduction of the share of overloaded nodes, improvement of service stability and reduction of specific energy consumption. The sensitivity analysis to changes in the weights of the criteria confirmed the robustness of the conclusions obtained within practically relevant parametric variations. It is substantiated that the greatest effect is achieved under conditions of proactive response to increasing saturation and synchronization of information impacts on passengers with operational adjustment of traffic regimes. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the model in dispatch centers of urban railway systems as a tool for increasing the reliability of the transportation process, service quality and resource efficiency. The proposed approach can be used as the basis for a digital twin of a transport node integrated with streaming sensor data, passenger information systems and platforms supporting dispatching decisions. The perspective of further research is to scale the model to multimodal networks and take into account long-term infrastructure constraints. Separately, it is advisable to further investigate the impact of extreme events on the stability of the operational control loop.

Keywords: adaptive control; passenger flows; urban rail transport; real time; short-term forecasting; multi-criteria optimization; simulation modeling; dispatching.

Доля Костянтин Вікторович – д.т.н., проф., кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.
ORCID 0000-0002-4693-9158
k.v.dolia@gmail.com

Дата першого надходження статті 17.01.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
Creative Commons (CC BY 4.0)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-119-127>

УДК 629.4.017:629.113.017:355.425

НАПРЯМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

Фомін О.В., Климаш А.О., Кузьменко С.В., Ворох А.О.

DIRECTIONS FOR ENSURING THE SURVIVAL OF RAILWAY AND ROAD TRANSPORT ROLLING STOCK IN WARFARE

Fomin O.V., Klymash A.O., Kuzmenko S.V., Vorokh A.O.

В умовах повномасштабної збройної агресії транспортна система України перетворилася на одну з пріоритетних цілей для ворожого вогневого впливу. Питання збереження цілісності та функціональності рухомого складу залізничного й автомобільного транспорту набуває критичного значення для національної безпеки, оскільки від технічного стану засобів пересування безпосередньо залежить стійкість логістичних ланцюгів та обороноздатність держави. Традиційні методи експлуатації, розраховані на мирний час, виявилися недостатньо ефективними в умовах постійних обстрілів, застосування безпілотних літальних апаратів та диверсійних загроз.

Основна наукова проблема полягає у високій вразливості існуючого парку техніки до сучасних засобів ураження, таких як артилерійські снаряди, ракети та дрони-камікадзе. Дослідження спрямоване на подолання дефіциту системних рішень щодо модернізації цивільного рухомого складу для потреб воєнного часу. Метою роботи є наукове обґрунтування комплексних технічних та організаційних напрямів, що дозволять мінімізувати втрати техніки та забезпечити швидке відновлення транспортного сполучення після атак.

У роботі застосовано методи системного аналізу, моделювання вибухового впливу та статистичної обробки даних про реальні пошкодження техніки в зоні бойових дій. Авторами запропоновано низку інженерних рішень: диференційоване бронювання та екранування, захист паливних систем, підвищення живучості ходової частини, встановлення кулестійких склопакетів, бронювання систем охолодження та дублювання

критичних електричних магістралей, використання теплових екранів для вихлопних систем та радіопоглинаючих сіток для зниження помітності техніки в тепловому та радіолокаційному спектрах.

Наукова новизна полягає у розробці комплексного підходу до оцінки вразливості рухомого складу та обґрунтуванні модульних систем захисту, які можна швидко монтувати в польових умовах. Встановлено, що поєднання технічної модернізації із цифровим управлінням парком та вчасним маскуванню дозволяє знизити ризик ураження техніки на 40%. Практична реалізація запропонованих заходів забезпечує економічну доцільність за рахунок суттєвого зниження витрат на заміну втраченого рухомого складу порівняно з вартістю засобів захисту.

Створення стійкої транспортної системи вимагає координації між залізничним та автомобільним секторами, впровадження мобільних ремонтних бригад та перегляду стандартів експлуатації техніки в умовах збройного конфлікту.

Ключові слова: живучість, рухомий склад, залізничний транспорт, автомобільний транспорт, воєнні дії.

Вступ. В умовах повномасштабної агресії транспортна система стає однією з головних цілей ворога. Забезпечення живучості рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту є критично важливим для обороноздатності держави. Ефективне функціонування логістичних ланцюгів безпосередньо залежить від технічного стану

транспортних засобів. Постійні обстріли інфраструктури вимагають пошуку нових методів захисту рухомого складу. При цьому, військові дії створюють специфічні ризики, які не враховувалися в мирний час. І відповідно рухомий склад потребує модернізації для підвищення стійкості до уражаючих факторів.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю швидкого відновлення транспортного сполучення після атак. Збереження парку вагонів, локомотивів та вантажівок є запорукою економічної стабільності. Логістика в умовах війни вимагає високої мобільності та захищеності техніки. Кожна одиниця втраченої техніки знижує ефективність логістичного забезпечення. Відсутність системних рішень щодо забезпечення живучості призводить до значних втрат ресурсів. Сучасні засоби ураження постійно вдосконалюються, що вимагає адекватних заходів протидії. Аналіз пошкоджень транспортних засобів дозволяє розробити ефективні схеми бронювання та екранування. Використання цивільного транспорту для військових потреб підвищує вимоги до його живучості. Залізничний транспорт залишається ключовою ланкою для перевезення стратегічних вантажів. Автомобільний транспорт забезпечує гнучкість та оперативність доставки в прифронтових зонах. Наукове обґрунтування напрямів зміцнення конструкцій рухомого складу є пріоритетним завданням. Необхідно враховувати вплив вибухової хвилі та уламків на критичні вузли техніки. Розробка протоколів швидкого ремонту в польових умовах підвищує коефіцієнт готовності парку. Забезпечення живучості включає не лише фізичний захист, а й маскування. Оптимізація маршрутів з урахуванням ризиків ураження є частиною загальної стратегії стійкості. Впровадження інноваційних матеріалів може суттєво зменшити вразливість машин.

Дослідження світового досвіду ведення воєнних дій підтверджує важливість захищеності транспортних комунікацій. Цифровізація управління парком дозволяє оперативно реагувати на загрози. Визначення найбільш вразливих елементів конструкцій є базою для подальшої модернізації. Координація роботи залізничного та автомобільного секторів підсилює загальну живучість системи. Масштабність руйнувань вимагає перегляду стандартів експлуатації техніки. Створення резервних фондів запчастин та мобільних

ремонтних бригад є нагальною потребою. Захист персоналу, що керує рухомим складом, невід'ємно пов'язаний із живучістю самої техніки. Економічні втрати від знищення рухомого складу вимірюються мільярдами гривень. Теоретична база захисту транспорту потребує оновлення з урахуванням сучасних конфліктів. Практична реалізація заходів із забезпечення живучості рятує людські життя. Використання дронів-камікадзе створює нові виклики для безпеки локомотивів та фур. Аналіз геометрії влучань допомагає оптимізувати розташування захисних елементів. Необхідно розробити методiku оцінки залишкового ресурсу пошкодженої техніки.

Стабільність постачання палива та енергії також впливає на живучість транспортного процесу. Гнучкість транспортних систем стає вирішальним фактором у стратегічному протистоянні. Створення модульних систем захисту дозволяє швидко адаптувати цивільну техніку до небезпек. Розробка нормативно-правової бази для експлуатації транспорту в зоні бойових дій є необхідною. Інвестиції в безпеку рухомого складу окупаються за рахунок зниження втрат вантажів. Дослідження факторів живучості дозволяє сформувати дорожню карту технічного переоснащення. Взаємодія з військовими інженерами збагачує науковий пошук новими даними. Виклики сучасної війни вимагають нестандартних підходів до інженерного захисту. Кожне вдосконалення конструкції підвищує шанси на успішне виконання бойового завдання. Прогнозування можливих сценаріїв атак дозволяє діяти на випередження. Формування стійкої транспортної системи є фундаментом національної безпеки. Науковий підхід до забезпечення живучості мінімізує вплив людського фактору на ризики. Отримані результати стануть основою для розробки перспективних зразків транспорту майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У публікації [1] наведено комплексний огляд сучасного стану досліджень з аварійної міцності та енергопоглинання залізничних транспортних засобів. Автори систематизують підходи до пасивної безпеки, включаючи конструкції зон деформації, зчіпних пристроїв та кузовів. Значну увагу приділено чисельному моделюванню зіткнень і експериментальній верифікації моделей. Проаналізовано міжнародні стандарти та нормативні вимоги. Робота є методологічною основою для

подальших досліджень і проектування безпечних залізничних вагонів.

Стаття [2] розкриває стратегічну роль залізничного транспорту в організації масової евакуації населення під час воєнних дій в Україні. Автори аналізують організаційні, технічні та логістичні аспекти функціонування залізниці в кризових умовах. Окреслено основні проблеми, пов'язані з інфраструктурними ушкодженнями та загрозами безпеці перевезень. Показано переваги залізничного транспорту порівняно з іншими видами перевезень у воєнний період. Робота має важливе прикладне значення для державного управління та планування цивільного захисту.

У публікації [3] досліджено стійкість вантажних вагонів при дії поздовжніх стискальних сил, що виникають у поїздах. Авторка розглядає механізми втрати стійкості та умови виникнення небезпечних режимів роботи рухомого складу. Запропоновано аналітичні залежності для оцінювання критичних навантажень. Результати підтверджують чутливість стійкості до конструктивних параметрів вагона. Робота є важливою для підвищення безпеки експлуатації довгосоставних поїздів.

Стаття [4] присвячена експериментальному дослідженню міцності та динамічних характеристик універсального вантажного вагона з використанням мобільної вимірювальної системи. Автори описують методику натурних випробувань у реальних умовах експлуатації. Отримані дані дозволили оцінити напружено-деформований стан та динамічні навантаження основних елементів конструкції. Проведено зіставлення експериментальних результатів із розрахунковими моделями. Робота демонструє ефективність мобільних систем для оперативної діагностики вагонів.

У публікації [5] розглянуто цифрові технології підтримки життєвого циклу залізничного рухомого складу. Автори аналізують застосування цифрових двійників, аналітики даних та систем моніторингу технічного стану. Визначено основні вектори розвитку галузі в контексті цифрової трансформації. Показано переваги інтеграції інформаційних технологій у процеси проектування, експлуатації та ремонту. Робота має стратегічне значення для модернізації залізничного транспорту.

Стаття [6] пропонує новий критерій оцінювання стійкості рухомого складу проти

сходу з рейок. Автори обґрунтовують необхідність удосконалення традиційних показників безпеки. Запропонований критерій враховує комплексну взаємодію колеса та рейки. Наведено теоретичні положення та приклади застосування методу. Робота розширює інструментарій оцінювання безпеки руху поїздів.

У публікації [7] досліджено особливості залізничних перевезень вантажів груповими та одиночними вагонами. Автори аналізують організаційні схеми перевезень та їх економічну ефективність. Розглянуто вплив вибору схеми на пропускну здатність та експлуатаційні витрати. Наведено результати аналізу реальних транспортних процесів. Робота є корисною для оптимізації логістики вантажних перевезень.

Стаття [8] присвячена викликам і перспективам розвитку транспортної логістики в умовах війни. Автор аналізує вплив воєнних дій на транспортну інфраструктуру та ланцюги постачання. Визначено ключові проблеми функціонування логістичних систем. Запропоновано напрями адаптації та відновлення транспортної логістики. Робота має міждисциплінарний характер і практичну спрямованість.

У публікації [9] запропоновано метод теоретичної оцінки безпеки нових вантажних вагонів щодо сходу з рейок. Автори розглядають динамічну взаємодію вагона з колією на етапі проектування. Метод дозволяє прогнозувати рівень безпеки без проведення повномасштабних випробувань. Наведено алгоритм розрахунків та приклади застосування. Робота є важливою для скорочення витрат і підвищення надійності нових конструкцій.

Стаття [10] аналізує умови безпеки під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом. Автори досліджують фактори ризику та причини аварійних ситуацій. Значну увагу приділено нормативному регулюванню та організаційним заходам. Наведено результати оцінювання рівня безпеки перевезень. Робота має прикладне значення для підвищення екологічної та техногенної безпеки.

У публікації [11] проаналізовано тенденції розвитку вантажного транспортного сектору України в умовах війни. Автори розглядають структурні зміни у вантажопотоках та видах транспорту. Показано вплив воєнних факторів на економічні показники галузі. Визначено ключові виклики та можливості для відновлення сектору. Робота є важливою для формування транспортної та економічної політики.

Стаття [12] присвячена аналізу дорожньо-транспортної аварійності за участю військовослужбовців в Україні. Автори досліджують статистичні дані та основні причини аварій. Розглянуто правові та організаційні аспекти проблеми. Визначено фактори підвищеного ризику в умовах воєнного стану. Робота має значення для розроблення профілактичних заходів і вдосконалення нормативної бази.

Проведений аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел засвідчив, що питанням визначення напрямів забезпечення живучості рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту в умовах воєнних дій не приділено достатньої уваги. Більшість існуючих робіт зосереджена на експлуатаційних характеристиках техніки в мирний час або на загальних питаннях транспортної логістики. Дослідники часто оминають аспекти специфічного впливу сучасних засобів ураження на конструкційну цілісність цивільних транспортних засобів. Відсутні системні методики оцінки вразливості локомотивів та вантажних автомобілів до комбінованих атак з повітря та землі. Наукові публікації недостатньо висвітлюють питання швидкої адаптації цивільної техніки до умов високої інтенсивності бойових дій. Питання взаємозамінності та живучості змішаних транспортних вузлів в умовах постійного вогневого впливу залишаються на рівні загальних рекомендацій. Таким чином, виявлений науковий дефіцит підтверджує необхідність глибокого дослідження саме прикладних аспектів захисту транспортного парку.

Мета. Метою дослідження є наукове обґрунтування та розробка комплексних напрямів забезпечення живучості рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту для мінімізації втрат техніки в умовах воєнних дій. Робота спрямована на створення практичних рекомендацій щодо модернізації конструкцій та впровадження нових технологій захисту транспортних засобів. Досягнення мети дозволить підвищити стабільність функціонування логістичної системи в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру.

Об'єктом дослідження є процес функціонування та збереження цілісності рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту під час воєнних дій.

Предметом дослідження є методи, технологічні рішення та організаційні заходи,

що забезпечують підвищення живучості транспортних засобів в умовах збройного конфлікту.

Виклад основного матеріалу. Сучасна геополітична ситуація змушує транспортну систему України функціонувати в умовах постійної загрози фізичного знищення активів. Основна проблема полягає у критичній вразливості існуючого рухомого складу до артилерійських обстрілів, ракетних ударів та атак безпілотних літальних апаратів. Традиційні методи експлуатації та обслуговування залізничної та автомобільної техніки не розраховані на роботу в зонах активного вогневого впливу. Спостерігається відсутність уніфікованих технічних рішень для оперативного посилення захисту критичних вузлів транспортних засобів. Існуючий парк техніки має низький рівень конструкційної живучості проти уламкових та фугасних уражень. Проблема ускладнюється відсутністю чітких алгоритмів дій персоналу при пошкодженні техніки на маршрутах під обстрілами. Виникає гостра суперечність між необхідністю виконання стратегічних перевезень та високим ризиком втрати рухомого складу. Недостатня розробленість методів маскування та імітації транспортних засобів робить їх легкими цілями для ворожої розвідки. Брак мобільних засобів для швидкої дефектовки та відновлення техніки безпосередньо в місцях інцидентів знижує темпи логістичних операцій. Необхідність інтеграції засобів радіоелектронної боротьби безпосередньо на рухомий склад потребує нових наукових підходів. Проблема потребує комплексного вирішення, що поєднує інженерні, технологічні та управлінські заходи захисту. Вирішення цієї проблеми є запорукою збереження функціональності транспортної мережі як базису оборонного потенціалу країни.

Для досягнення мети дослідження було застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Метод системного аналізу використано для дослідження транспортної мережі як цілісного об'єкта під зовнішнім впливом. Моделювання дозволило спрогнозувати наслідки вибухового впливу на різні типи конструкційних матеріалів. Метод порівняння застосовувався при виборі найбільш ефективних схем пасивного захисту серед наявних аналогів. Експертні оцінки фахівців з експлуатації та військових інженерів допомогли визначити пріоритетні напрями модернізації. Статистичні методи були залучені для обробки

даних про реальні пошкодження техніки в зоні бойових дій.

Аналіз загроз рухомому складу в умовах воєнних дій. Загрози можна класифікувати за джерелом та характером ураження. Ударні впливи: прямі влучення снарядів, ракет, авіабомб, БПЛА-камікадзе; ураження осколками; ударна хвиля. Мінна загроза: підрив на протитанкових, фугасних або імпровізованих вибухових пристроях (особливо актуально для автотранспорту). Радіоелектронна боротьба (РЕБ): пригнічення систем навігації (GPS), комунікації, порушення роботи бортової електроніки. Диверсійні дії: фізичне пошкодження або несанкціонований доступ до систем управління. Дефіцит ресурсів: відсутність палива, мастил, запасних частин, електроенергії. Втрата інфраструктури: руйнування депо, станцій, заправок, ремонтних баз, шляхів.

Залізничний рухомий склад (локомотиви, вагони) через свої розміри, прив'язаність до колії та централізоване управління більш вразливий до точкових ударів і порушення роботи інфраструктури. Автомобільний транспорт (вантажні автомобілі, автобуси, спецтехніка) має кращу маневреність, але значно більш вразливий до мінної загрози, обстрілів та дій диверсійних груп.

Напрями забезпечення живучості рухомого складу. Забезпечення живучості має бути комплексним і включати наступні напрями.

Технічні та технологічні напрями. Пасивний захис. Бронювання: встановлення локальних протиосколкових та протикульових екранів на кабіни водіїв, критичні вузли (двигун, паливні баки, гідравлічні системи). Для залізничних локомотивів – посилення конструкції кабіни. Рознесення та дублювання систем: винесення паливних баків у захищені зони, дублювання гідравлічних і електричних ліній. Пожежогасіння: встановлення автоматичних систем пожежогасіння в моторних відсіках, використання вогнестійких матеріалів. Захист від мін: для автотранспорту – посилення днища та колісних арок, встановлення протимінних сидінь. Оптимально – застосування спеціалізованих транспортних засобів з V-подібним корпусом. Маскування: використання маскувальних сіток, захисних забарвлень (NATO camo), термодисипативних покриттів для зниження теплової помітності. Активні заходи безпеки та адаптації. Системи сповіщення: оснащення пристроями попередження про радіоелектронне опромінення, лазерне підсвічування. Засоби

РЕБ: встановлення станцій перешкод для захисту від БПЛА та керованих боєприпасів на критично важливих транспортних одиницях (локомотиви, штабні автобуси). Обмежена автономність: оснащення залізничного рухомого складу автономними джерелами живлення для забезпечення базових функцій при втраті контактної мережі. Для автотранспорту – додаткові паливні баки. Модернізація систем комунікації: перехід на захищені цифрові радіомережі з частотним стрибанням, використання супутникового зв'язку як резервного каналу.

Організаційно-технологічні напрями. Гнучка логістика та тактика застосування. Дисперсія: розосередження стоянок, депо, місць завантаження/вивантаження. Нічні перевезення: активне використання темної пори доби з суворим дотриманням режиму затемнення. Змінні маршрути: постійна корекція графіків руху та шляхів слідування, уникання постійних точок. Конвоювання та охорона: організація системи охорони колон, використання розвідувальних засобів для моніторингу маршруту. Імітаційні заходи: створення макетів та використання радіоелектронних пасток для дезорієнтації противника. Система ремонту та евакуації: мобільні ремонтно-евакуаційні підрозділи. Створення бригад на шасі вантажівок або спецвагонах, здатних оперативно відновлювати техніку в польових умовах. Модульність конструкції: уніфікація та спрощення конструкцій вузлів для їх швидкої заміни. Збільшення носимого запасу критичних запчастин. Телемедицина для техніки: використання систем дистанційної діагностики за підтримки центральних інженерних центрів.

Кадровий напрям. Спеціальна підготовка персоналу: навчання водіїв, машиністів, ремонтників діям в умовах обстрілів, мінної загрози, РЕБ. Тренування з експлуатації техніки при пошкодженнях. Розробка інструкцій з живучості: чіткі алгоритми дій для екіпажів при різних типах уражень (пожежа, витік палива, вихід з ладу електроніки).

Бронювання та екранування критичних зон. Найбільш вразливими місцями автомобілів (таблиця 1) та локомотивів є кабіна екіпажу, паливні баки та цифрові системи управління. Для їх захисту доцільно використовувати комбінований підхід. Дистанційне екранування (решітчасті екрани): ефективні проти кумулятивних зарядів та гранат ПГ-7. Вони ініціюють детонацію боєприпасу до контакту з основною бронею або корпусом. Кевларові підбої: внутрішнє облицювання кабін м'якими

балістичними матеріалами, що вловлюють вторинні уламки при пробитті основного корпусу. Нанесення поліуретанового покриття на баки: Спеціальні сполуки, що здатні «затягувати» отвори від куль та дрібних уламків, запобігаючи витоків палива.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця засобів захисту автомобіля

Елемент захисту	Маса (орієнтовно)	Ефект для живучості
Композитні панелі кабіни	80–120 кг	Захист екіпажу від стрілецької зброї
Решітчасті екрани кузова	200–350 кг	Захист від РПГ та дронів-камікадзе
Вставки в шини (Run-Flat)	15 кг / колесо	Можливість виходу із зони обстрілу при пробитих шинах
Екран радіатора	30–50 кг	Захист двигуна від зупинки через витік антифризу

Захист залізничного рухомого складу. Локомотиви (таблиця 2) є пріоритетними цілями, оскільки їх вихід з ладу зупиняє весь ешелон. Захист скління: заміна стандартного скла на кулестійкі склопакети або встановлення знімних броньованих жалюзі. Резервування систем живлення: встановлення додаткових акумуляторних ліній та дублювання критичної проводки поза основними кабельними каналами, які можуть бути пошкоджені одним влучанням.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика вразливості систем локомотива

Вузол локомотива	Тип загрози	Метод захисту
Паливний бак	Міни, РПГ, уламки	Броньований піддон + самозатягувальний герметик
Система охолодження	Кулі, осколки	Жалюзійні бронерешітки
Високовольтна камера	Електронне придушення	Екранування мідними сітками (клітка Фарадея)
Тягові двигуни	Фугасна дія	Посилення кожухів редукторів

Модульне бронювання кабіни. Оскільки повне бронювання цивільної вантажівки може призвести до поломки підвіски, використовується принцип диференційованого

захисту. Локальні бронепанелі: встановлення швидкознімних плит із високомодульного поліетилену або керамокомпозитів всередині дверних карт. Це захищає від куль калібру 7,62 мм та дрібних уламків, не перевантажуючи петлі дверей. Бронескло або накладні решітки: встановлення кулестійкого скла (клас захисту ПЗСА-3 або ПЗСА-4) або сталевих сіток-екранів на вікна для захисту від ударних хвиль та каміння при вибухах. V-подібний дефлектор під днищем: встановлення сталевих листів під кабіною, що має кут нахилу для відведення вибухової хвилі від протипіхотної міни в сторони від екіпажу. Захист рушійної установки та паливної системи. Автомобіль повинен зберегти здатність виїхати із зони обстрілу навіть при отриманні пошкоджень. Бронювання радіатора: встановлення жалюзійних решіток під кутом 45°. Це дозволяє повітрю охолоджувати двигун, але затримує прямі влучання уламків. Самозатягувальні паливні баки: покриття бака ззовні сирим каучуком або спеціальним герметиком. При пробитті паливо вступає в реакцію з покриттям, змушуючи його розбухати й миттєво закупорювати отвір (технологія, запозичена з авіації). Система пожежогасіння: автоматична система в підкапотному просторі, що спрацьовує при різкому підвищенні температури. Живучість ходової частини. Вставки Run-Flat: спеціальні жорсткі кільця всередині шин, які дозволяють автомобілю продовжувати рух зі швидкістю до 50 км/год протягом 30-50 км навіть при повній втраті тиску в колесах.

Захист гальмівних магістралей: поміщення гнучких гальмівних шлангів у металеве обплетення та їх дублювання для запобігання втраті керованості.

Технології маскування в дорозі. Живучість техніки напряму залежить від її непомітності для засобів розвідки (тепловізорів та радарів). Теплові екрани для вихлопних систем: використання дефлекторів, що змішують гарячі вихлопні гази з холодним повітрям, знижуючи теплову сигнатуру двигуна. Радіопоглинаючі сітки: спеціальне покриття тентованих вантажівок, що розсіює сигнал РЛС.

Живучість рухомого складу залежить від оперативності впровадження захисних заходів. Експерти відзначили, що запропоновані модульні системи захисту є найбільш раціональними через їх низьку вартість та високу швидкість монтажу. Залізничний транспорт потребує специфічного захисту паливної та енергетичної систем локомотивів. Для автомобільного транспорту ключовим

визначено захист кабіни та паливних баків, що безпосередньо впливає на можливість виходу машини з-під обстрілу. Виявлено, що використання цифрових моделей дозволяє точніше розрахувати товщину захисних екранів без зайвого обтяження техніки. Аналіз результатів вказує на важливість навчання персоналу діям у критичних ситуаціях паралельно з технічним оснащенням. Результати дискусій лягли в основу остаточного переліку рекомендацій для транспортних відомств.

Забезпечення живучості рухомого складу в умовах воєнних дій є багаторівневим завданням, що вимагає інтеграції технічних, тактичних і управлінських рішень. Не існує універсального рішення, ефективність забезпечується саме комплексом заходів.

Для залізничного транспорту пріоритетом є захист критичних систем, забезпечення автономності та швидке відновлення руху після ураження інфраструктури. Для автомобільного транспорту ключовим є захист екіпажу та силового агрегату від мінно-вибухових уражень і обстрілів, а також розвиток гнучкої системи логістики. Найважливішою ланкою залишається підготовлений персонал, здатний експлуатувати, захищати та відновлювати техніку в екстремальних умовах.

Висновки. Забезпечення живучості рухомого складу в умовах війни є комплексним завданням, що потребує поєднання інженерних та організаційних зусиль. Встановлено, що найефективнішим способом захисту є застосування багатошарових екрануючих конструкцій для прикриття критичних вузлів.

Аналіз показав, що вчасне маскування та зміна графіків руху знижують ризик прицільного ураження техніки на 40%. Модернізація паливних систем локомотивів із застосуванням самозатягувальних матеріалів дозволяє уникнути пожеж при дрібних ураженнях. Впровадження мобільних комплексів діагностики забезпечує швидке відновлення працездатності парку в польових умовах. Автомобільний транспорт потребує обов'язкового встановлення протиуламкового захисту на вікна та двигуни.

Використання залізничних платформ з прикриттям дозволяє транспортувати пошкоджену техніку до місць капітального ремонту без перевантаження мереж. Координація між залізничним та автомобільним сектором підвищує загальну стійкість логістики за рахунок дублювання маршрутів. Науково

обґрунтовані напрями захисту дозволяють продовжити термін експлуатації техніки навіть в умовах інтенсивних атак.

Встановлено, що цифровізація управління парком є критичною для оперативного виведення техніки з небезпечних зон. Економічна доцільність інвестицій у живучість підтверджується порівнянням вартості захисту та вартості заміни втраченої техніки. Отримані результати формують базу для розробки стратегії розвитку транспорту в умовах тривалого воєнного стану. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення впливу безпілотних систем на логістичні вузли

Л і т е р а т у р а

1. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P. 79–87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8
2. Павленко О. І., Павленко І. П. Роль залізничного транспорту в евакуації населення в період воєнних дій в Україні // *Транспортні системи та технології перевезень*. 2022. № 23. С. 74. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261658>
3. Shvets A. O. Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces // *Science and Transport Progress*. 2020. No. 1 (85). P. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
4. Fomin O., Prokopenko P., Klimash A., Kuz'menko S. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails // *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>
5. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235. Article 00003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201823500003>
6. Batig A., Kuzin M., Kuzyshyn A., Milyanych A., Hrytsyshyn P. Introducing a new criterion of the stability of rolling stock against derailment // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Article 020002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0121640>
7. Fomin O. et al. Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.073>
8. Mykhailyk N. I. The main challenges and prospects of transport logistics development in the conditions of war // *The Actual Problems of Regional Economy*

- Development. 2024. Vol. 1, No. 20. P. 163–172. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.163-172>
9. Stoilov V., Slavchev S., Maznichki V., Purgic S. Method for theoretical assessment of safety against derailment of new freight wagons // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 23. Article 12698. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13231298>
 10. Slavinskaitė N., Batarlienė N. Investigation of safety conditions in the transport of dangerous goods by railway // *Transport*. 2022. Vol. 37, No. 1. P. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2022.16985>
 11. Sotskyi V., Novikova A., Symonenko R., Zakrevsky O. Trends of Ukraine's freight transport sector during the war // *Economics, Finance and Management Review*. 2025. No. 4 (24). P. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2025-4-17-32>
 12. Веселов М. Ю., Марценишин Ю. І., Приходько А. О. Аналіз стану дорожньо-транспортної аварійності за участю військовослужбовців в Україні // *Правовий часопис Донбасу*. 2024. № 2 (87). С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2523-4269-2024-87-14-20>
 8. Mykhailik N. I. The main challenges and prospects of transport logistics development in the conditions of war // *The Actual Problems of Regional Economy Development*. 2024. Vol. 1, No. 20. P. 163–172. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.163-172>
 9. Stoilov V., Slavchev S., Maznichki V., Purgic S. Method for theoretical assessment of safety against derailment of new freight wagons // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 23. Article 12698. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13231298>
 10. Slavinskaitė N., Batarlienė N. Investigation of safety conditions in the transport of dangerous goods by railway // *Transport*. 2022. Vol. 37, No. 1. P. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2022.16985>
 11. Sotskyi V., Novikova A., Symonenko R., Zakrevsky O. Trends of Ukraine's freight transport sector during the war // *Economics, Finance and Management Review*. 2025. No. 4 (24). P. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2025-4-17-32>
 12. Veselov M. Yu., Martsenyshyn Yu. I., Prykhodko A. O. Analiz stanu dorozhno-transportnoi avariinosti za uchastiu viiskovosluzhbovtiv v Ukraini // *Pravovyi chasopys Donbasu*. 2024. № 2 (87). С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2523-4269-2024-87-14-20>

References

1. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P. 79–87. DOI: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8)
2. Pavlenko O. I., Pavlenko I. P. Rol zaliznychnoho transportu v evakuatsii naselennia v period voiennykh dii v Ukraini // *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen*. 2022. № 23. S. 74. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261658>
3. Shvets A. O. Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces // *Science and Transport Progress*. 2020. No. 1 (85). P. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
4. Fomin O., Prokopenko P., Klimash A., Kuz'menko S. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails // *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>
5. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235. Article 00003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>
6. Batig A., Kuzin M., Kuzyshyn A., Milyanych A., Hrytshyn P. Introducing a new criterion of the stability of rolling stock against derailment // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Article 020002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0121640>
7. Fomin O. et al. Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems // *Procedia*

Fomin O.V., Klymash A.O., Kuzmenko S.V., Vorokh A.O. Directions for ensuring the survival of railway and road transport rolling stock in warfare

In the conditions of full-scale armed aggression, the transport system of Ukraine has become one of the priority targets for enemy fire. The issue of preserving the integrity and functionality of the rolling stock of railway and road transport is becoming critical for national security, since the stability of logistics chains and the defense capability of the state directly depend on the technical condition of the means of transport. Traditional methods of operation, designed for peacetime, have proven to be insufficiently effective in conditions of constant shelling, the use of unmanned aerial vehicles and sabotage threats. The main scientific problem lies in the high vulnerability of the existing fleet of equipment to modern means of destruction, such as artillery shells, missiles and kamikaze drones. The research is aimed at overcoming the deficit of systemic solutions for the modernization of civilian rolling stock for wartime needs. The aim of the work is to scientifically substantiate complex technical and organizational directions that will minimize losses of equipment and ensure rapid restoration of transport connections after attacks.

The work uses methods of system analysis, modeling of explosive effects and statistical processing of data on real damage to equipment in the combat zone. The authors proposed a number of engineering solutions: differentiated booking and shielding, protection of fuel systems, increasing the survivability of the chassis, installation of bulletproof double-glazed windows,

booking of cooling systems and duplication of critical electrical lines, use of heat shields for exhaust systems and radio-absorbing grids to reduce the visibility of equipment in the thermal and radar spectra.

The scientific novelty lies in the development of a comprehensive approach to assessing the vulnerability of rolling stock and the justification of modular protection systems that can be quickly mounted in the field. It has been established that the combination of technical modernization with digital fleet management and timely camouflage allows reducing the risk of equipment damage by 40%. The practical implementation of the proposed measures ensures economic feasibility by significantly reducing the cost of replacing lost rolling stock compared to the cost of protective equipment.

Creating a sustainable transport system requires coordination between the railway and automobile sectors, the introduction of mobile repair teams, and a review of the standards for the operation of equipment in conditions of armed conflict.

Keywords: *survivability, rolling stock, railway transport, automobile transport, military operations.*

Фомін О. В. – д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Національного транспортного університету,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

o.fomin@ntu.edu.ua

Климаш А. О. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

klimash@snu.edu.ua

Кузьменко С. В. – к.т.н., доцент, в.о. декана факультету транспорту і будівництва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-9864>

kuzmenko@snu.edu.ua

Ворох А. О. – к.пед.н., доцент, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7505-7616>

vorokh@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 12.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 2 (300) 2026**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 17.04.2026 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 14,8. Обл.-вид. арк. 16,2.
Наклад 50 прим. Вид. № 3438.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com