

ISSN 2222-419X (Print)
ISSN 2313-8688 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Збірник наукових праць

Засновано в 2011 році

Випуск 31

Дніпро
2026

ВИДАВЕЦЬ:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Затверджено до друку рішенням вченої ради Українським державним університетом науки і технологій від 28.01.2026 р., протокол № 6

Збірник наукових праць «Транспортні системи та технології перевезень» зареєстровано в Національній раді України з питань телебачення і радіомовлення, рішення №924 від 28.09.2023 р. Ідентифікатор медіа: R30-01391 (реєстрація суб'єктів у сфері медіа).

Видання внесено до Категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020 р.

Редакційна колегія:

головний редактор – кандидат технічних наук *Р. В. Вернигора*;
заступник головного редактора – кандидат технічних наук *М. І. Березовий*.
відповідальний секретар – кандидат технічних наук *Р. Г. Коробйова*.

Члени редакційної колегії:

Р. В. Вернигора (УДУНТ, Україна), М. І. Березовий (УДУНТ, Україна), Маріанна Яцина Варшавський політехнічний університет, Польща), Матеуш Шарата (Жешувський технічний університет імені Ігнація Лукасевича, Польща), Ігор Таран (Жешувський технічний університет імені Ігнація Лукасевича, Польща), Валерій Кузнецов (Залізничний науково-дослідний інститут, Польща), Славчо Божков (Університет транспорту Тодора Каблешкова, Болгарія), Збігнєв Цекановський (Варшавський університет менеджменту, Польща), Д. М. Козаченко (УДУНТ, Україна), В. В. Малашкін (УДУНТ, Україна), О. О. Огар (УкрДУЗТ), Д. В. Ломотько (УкрДУЗТ, Україна), Г. І. Кириченко (ДУІТ, Україна), Я. В. Болжеларський (Національний університет «Львівська політехніка», Україна).

Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць. – Дніпро: Вид-во Укр. держ. ун-ту науки і технологій, 2026. – Вип. 31. – 110 с.

ISSN 2222-419X (Print)

ISSN 2313-8688 (Online)

УДК 656.224/225(066)

В статтях висвітлені результати наукових досліджень, виконаних авторами в Українському державному університеті науки і технологій та інших організаціях у сфері формування та забезпечення ефективної роботи складових елементів транспортного комплексу, розвитку його матеріально-технічної бази, удосконалення технологій експлуатаційної, вантажної та комерційної роботи транспорту.

Збірник становить інтерес для співробітників науково-дослідних організацій, наукових та науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів, студентів вищих навчальних закладів, інженерно-технічних працівників установ, організацій та підприємств транспортної галузі.

UDK 656.224/225(066)

Results of researches, which are made in Ukrainian State University of Science and Technologies and other organizations in the fields of formation and effective operation of the constituent elements of the transport sector, its material and technical base development, freight and commercial operation improvement are presented in the articles.

The collection is intended for the research organizations employees, research and educational personnel, as well as for the doctoral candidates, postgraduates and for the higher school students, engineering employees of organizations and enterprises of transport industry.

© Український державний університет
науки і технологій, 2026

ЗМІСТ

Е. К. MANAFOV

DIGITAL IMPLEMENTATION OF THE THEORY OF OPERATIONAL RELIABILITY
OF RAILWAY STATIONS 4

Д. В. ЛОМОТЬКО, Д. В. АРСЕНЕНКО, М. Д. ЛОМОТЬКО, К. Г. ВЛАСЕНКО

ЗЕЛЕНА ЛОГІСТИКА У ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: МОДЕЛЮВАННЯ
ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ТА СТІЙКІ РІШЕННЯ.....16

О. В. КЛИГА

ОБЛАСТЬ ДОПУСТИМИХ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ В
СТОХАСТИЧНИХ УМОВАХ28

А. В. ПРОХОРЧЕНКО, Д. Р. ХАРЧЕНКО, М. А. КРАВЧЕНКО, А. М. КИМАН

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАВИЛ ПРІОРИТЕТНОСТІ ПРИ РОЗПОДІЛІ ПРОПУСКНОЇ
СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....37

О. Ю. ПАПАХОВ, Р. М. КОМΠΑНИЄЦЬ, М. І. СЕРГІЄНКО

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З
МЕТОЮ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ.....49

А. М. АФАНАСОВ, А. О. СКАЧКОВ

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНИХ
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З БОРТОВИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ60

І. В. НІКОЛАЄНКО, М. В. ХАРА, Г. В. МАСЛАК

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО ДОСВІДУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГУМАНІТАРНОЇ
ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ70

В. І. ДОСКОЧ, О. Ю. БАЛІЙЧУК

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТЕНДУ
ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....78

Д. Ю. НЕСТЕРОВ, Є. В. ХОМЕНКО, В. І. ІВАНЧЕНКО, Я. Ф. МУСТАФАЄВА

ПЕРВИННІ РИЗИКИ ЄДИНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В УМОВАХ
РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ87

Н. С. ЧЕРНОВА, Р. Б. НОВІК

МІЖНАРОДНІ ПІДХОДИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ ПІСЛЯ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ96

С. В. ПЛАКСІН, А. М. МУХА, Д. В. УСТИМЕНКО, Ю. В. ШКІЛЬ, О. В. КІТАЄВ

СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ 2-Х РЕЖИМНОГО ТЯГОВО-ЛЕВІТАЦІЙНОГО МОДУЛЯ
ШЛЯХОВОЇ СТРУКТУРИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО МАГЛЕВ-ТРАНСПОРТУ104

UDC 656.212.5:519.876.5

E. K. MANAFOV

Department of Power Engineering and Automation, National Aviation Academy, Mardakan Avenue 30, Baku, Azerbaijan, AZ 1045, tel. +994 55 7417939, email: emanafov@naa.edu.az, ORCID 0000-0001-5697-577X

Department of Transport Engineering and Control Technologies, Azerbaijan Technical University, G. Javid Avenue 25, Baku, Azerbaijan, AZ 1073

DIGITAL IMPLEMENTATION OF THE THEORY OF OPERATIONAL RELIABILITY OF RAILWAY STATIONS

Purpose. This study aims to establish a theoretical relation between the classical theory of operational reliability of railway stations and the modern concept of a digital railway station, as well as to develop a methodological model for the digital implementation of this theory within the context of transportation process management digitalization. The work purposes to substantiate the fact that the digital railway station does not represent an alternative concept, but rather a logical and technological development of the classical theory of operational reliability. **Methodology.** The study used methods of system and logical-methodological analysis, probabilistic understanding of operational reliability, validation of the operational states of transport systems, as well as elements of queuing theory, simulation modeling, and data-driven analysis. The theoretical necessities of the classical theory of operational reliability are compared with the functional skills of digital twins and intelligent control systems. To describe the digital application of the theory, a multilayer representation of the station state is proposed, including the physical, technological, graphical, and management levels. **Results.** It is demonstrated that the operational reliability of a railway station can be formalized as a probabilistic function of its operational state over time. A methodological model for the digital implementation of operational reliability theory is proposed, based on the formation of a station state vector, predicting the probabilities of operational failures for each layer, and their aggregate valuation. An algorithm for digital reliability valuation has been established, enabling the transition from a retrospective normative-analytical approach to dynamic and predictive operational risk management. Integrated operational reliability indicators are introduced, allowing a quantitative assessment of station stability in a digital environment. **Scientific novelty.** The scientific novelty of this work dishonesties in the formalization of the theoretical linking between the classical theory of operational reliability of railway stations and the concept of a digital railway station. For the first time, operational reliability is taken as a probabilistic function of the digital station's state, dependent on a combination of physical, technological, scheduling, and management factors. A multilayer model is proposed that enlarges the classical classification of operational failures by incorporating an algorithmic control component. **Practical value.** The results obtained can be used in developing digital twins of railway stations, designing decision support systems, evaluating the effectiveness of digitalization measures, and training specialists in railway station operations management.

Keywords: operational reliability, railway station, digital twin, artificial intelligence, transportation process management, throughput.

Introduction

Modern rail transport is entering a phase of enhanced digitalization, with an increasing share of automated traffic control, planning, and dispatching functions, as well as the application of digital signaling and communication systems (e.g., ETCS, ATO, and advanced communication standards). Experience with digital programs at major operators demonstrates that digitalization is viewed as a key tool for improving throughput and the quality of the transportation process, including schedule stability and network manageability.

At the station level, digitalization manifests itself in a transition from «local operational» management based on rules and personnel

experience to management based on real-world operational data: station automated control system logs, signaling device telemetry, infrastructure and rolling stock condition monitoring, digital models, and predictions. This transformation leads to an increase in the difficulty of station processes for three reasons. First, structural complexity increases: the station becomes a cyber-physical system, in which the physical infrastructure is closely linked to digital control and monitoring circuits. Secondly, dynamic complexity increases: process stability is determined not only by infrastructure and technology, but also by the present state of flows, the propagation of delays, and the control system's reply to disturbances. Thirdly, information complexity increases: the quality of operation

depends on the completeness, reliability, and timeliness of data, as well as the precision of its processing algorithms.

In this environment, station operational reliability obtains the status of a systemic, integral indicator, reflecting the station's ability to maintain the required level of transport service in the presence of random disturbances, changing operating modes, and limited resources. Unlike the barely technical «failure-free» nature of individual devices, operational reliability is directly linked to the manageability of the transportation process and the economic consequences of delays.

Furthermore, the development of digital twins and intelligent control systems enhances the practical significance of this issue. Digital solutions are claimed to improve predictability and efficiency; however, their effectiveness must be theoretically evaluated through indicators of reliability and quality of the transportation process. Research in the field of AI-assisted digital twins for the railway sector highlights the role of artificial intelligence (AI) as a key «amplifier» of the digital twin, particularly in predictive maintenance and decision support tasks [1, 2, 3, 4, 5].

Thus, the significance of this study lies in the need to relate the classical theory of operational reliability of railway stations to modern digital concepts, ensuring the continuity of the conceptual framework and facilitating a rigorous assessment of the effects of digitalization.

It should be noted that the creation of the theory of operational reliability of railway stations as an independent scientific field dates back to the late 20th century and is not unintentional. Before this period, the operating conditions of railway stations were characterized by a relatively stable flow structure, reasonable traffic intensity, and the predominance of local technological solutions, which made it possible to solve reliability problems within the framework of specific disciplines - the theory of throughput, standardization, and technical reliability of devices.

A significant rise in traffic volumes, a more complex train flow structure, increased demands for schedule stability, and the increasing interconnection of rail network elements led to station failures manifesting themselves not only as technical failures but also as systemic disruptions to transport functions. Under these conditions, an objective need arose for a theory that reflects stations as holistic transport systems with limited resources, operating in a probabilistic environment. It was at this stage that a theory of station operational reliability, brief the technical,

technological, and organizational aspects of operation, became possible and in demand. A complete theory of station operational reliability was presented by P.S. Gruntov in his 1986 monograph, «Operational Reliability of Stations.» This work posed problems and proposed solutions, which are still used by academic schools to study station operational reliability in the post-Soviet space. Gruntov's key methodological influence is a shift in focus from «element reliability» to the reliability of the transport function. Within this approach, a station is viewed as a system of limited resources, operating under the effect of incoming flows and process regulations. Consequently, operational failure is determined not only by a technical failure but also by conditions under which the system cannot provide the required level of service: overloaded yards, exponential queue growth, schedule disruptions, failure to meet the formation plan, augmented downtime, and missed delivery deadlines.

The concept of «operational failure» is the central relation between the theory and the digital railway station. The digital station is focused on incessant monitoring and forecasting of conditions that lead to disruptions: increased track occupancy, increased operation times, reduced availability of technical equipment, and changes in the flow structure. In classical theory, these conditions were considered primarily analytically and retrospectively, whereas the digital environment makes them observable and predictable.

Consequently, the theory delivers the correct «functional framework» for digitalization: the digital station does not remove classical criteria (technological failure, schedule disruption, overload), but rather provides tools for measuring and managing them at a new level – through data, predictive models, and digital twins.

At the same time, the operating conditions of railway stations today differ significantly from those in which the classical creeds of operational reliability theory were formulated. Modern operations are characterized by highly variable flows, severe schedule stability requirements, deteriorating operational reserves, and the active implementation of automated and intelligent control systems.

In classical theory, operational reliability was typically evaluated based on standard parameters, averaged characteristics, and retrospective analysis. In the context of digitalization, this approach is inadequate, as a significant portion of operational failures are generated dynamically, influenced by the current state of flows, infrastructure, and

management decisions.

This condition does not reduce the value of classical theory, but it points to the need for its development and rethinking toward greater measurability, predictability, and adaptability, which is made possible by the use of digital data, digital twins, and intelligent control algorithms.

Purpose

The purpose of this study is to create a theoretical relation between the classical theory of operational reliability of railway stations and the concept of a digital railway station as a cyber-physical system driven by data and intelligent algorithms. To achieve this goal, the article addresses the following objectives:

1. To analyze key theoretical concepts, including the interpretation of a station as a transport system, the meaning of operational failure, the relationship between reliability and throughput/processing capacity, and the stability of the transportation process.

2. To define the spirit of a digital railway station, based on modern concepts of the digitalization of railway infrastructure, the implementation of digital control rings, and the use of digital twins and AI services.

3. To compare the basic concepts of «operational failure,» «station status,» «throughput reserves,» and «schedule stability» with digital objects of observation (data), digital models (twins), and forecast indicators.

4. Demonstrate the continuity and development of the theory, validating that the digital station represents a data-driven implementation of the classical concept of operational reliability, and also expands it through measurability, forecasting, and the inclusion of an algorithmic control component [6].

5. Formulate methodological conclusions for the building of digital operational reliability management systems, including the structure of indicators and principles of data integration, a digital twin, and AI models.

Theory of operational reliability of railway stations

In the theory of operational reliability, a railway station is viewed not as a collection of technical devices, but as a transportation system designed to achieve a specific function within the transportation process. This approach fundamentally distinguishes operational reliability from the classical reliability of technical systems, where the object of analysis is the operability of a separate element or unit.

In this context, a station is a system of limited resources, including:

- track development (receiving, dispatching, and sorting railway tracks);
- throats and hump devices;
- freight and passenger handling areas;
- locomotive and shunting equipment;
- technical and information control systems.

The functioning of a station is determined by the interaction of these resources with incoming and outgoing train and wagon flows, as well as the established processing technology. Consequently, the state of the station at any given time is characterized by the degree of utilization of its throughput and processing capacity, and not just the serviceability of its individual elements.

This conceptualization of the station as a transport system is key to the following transition to a digital model: it is this systemic approach that allows us to describe the station through a vector of states observed and measured by digital infrastructure [7].

The theory introduces the concept of operational reliability as the ability of a transport system to perform its envisioned functions under operating conditions without disrupting the transportation process. A crucial methodological step is to abandon the narrow understanding of failure as a technical malfunction. In an operational sense, a station failure can occur with a fully functional infrastructure if:

- the handling capacity of the yards is surpassed;
- train handling technology is disrupted;
- capacity reserves are exhausted;
- there is a disruption to the schedule;
- wagon and train downtime increases beyond permissible limits.

Thus, an operational failure is defined as a condition in which the station is powerless to provide the required level of transport service, regardless of the cause. This principle is important for a digital railway station, as digital systems are designed to identify and predict such conditions, rather than diagnose equipment failures [8].

To analyze operational reliability, the theory proposes a classification of failures that replicates the multifaceted nature of station operation. The classical interpretation differentiates the following main groups:

1. Technical failures related to malfunctions of tracks, switches, signaling devices, rolling stock, and other technical equipment.

2. Technological failures resulting from violations of established train and wagon handling

technology, failure to obey operating time standards, and indecorous shunting operations.

3. Organizational failures caused by unsuccessful planning, management errors, and resource distribution.

4. Information failures related to a lack, distortion, or delay of information necessary for management decision-making.

This classification is fundamentally important in that it spreads station reliability beyond its technical condition and emphasizes the role of control, information, and organization. It is this aspect that makes the theory theoretically compatible with digital control systems, where information and algorithmic components become dominant [9].

In a digital environment, each of the listed failure types can be formalized through data and indicators, allowing for a transition from a qualitative description to a quantitative assessment of the risks of operational failures.

Another key element of the theory is the idea of an economically optimal level of operational reliability. The author emphasizes that improving station reliability is related to additional costs, including:

- capital investments in track infrastructure development;
- acquisition and modernization of technical equipment;
- augmented operating costs;
- augmented technology complexity.

At the same time, low reliability leads to economic losses in the form of wagon downtime, schedule delays, penalties, and reduced service quality. Consequently, the task of operational reliability management is formulated as a compromise between the costs of improving reliability and the losses from its inadequate level. This approach has a direct postponement on the digital railway station, where reliability optimization can be implemented using digital twins, predictive models, and optimization algorithms. It is important to note that in classical theory, the optimal level of reliability is determined on the basis of analytical calculations and simulation modeling using standard parameters. The digital station allows for a transition to adaptive optimization, where the economically optimal level of reliability is recalculated in real time, taking into account actual data and forecasts [10].

The concept of a digital railway station

A modern digital railway station is a cyber-physical system in which physical infrastructure and rolling stock are integrated with digital

monitoring, analysis, and control tools. Unlike the traditional concept of a station as a group of technical and technological elements, a digital station operates within a single information and control system that safeguards the continuous collection, processing, and use of real-world operational data.

The physical coating of a digital station includes tracks, switches, chute systems, hump devices, locomotives and wagons, as well as signaling and power supply systems. The digital layer is formed by automated station control systems, technical condition sensors, telemetry, video surveillance, and communications equipment, as well as computing platforms for data analysis.

The key feature of a digital station is that its condition ceases to be a hidden or assessed value and becomes directly observable. Parameters such as track load, yard occupancy, traffic intensity, operation duration, and schedule deviations can be measured and analyzed in real time. This situation fundamentally changes the approach to operational reliability management, transferring it from a reactive mode to a predictive and proactive one [6, 7, 11].

The operation of a digital railway station is based on a continuous data flow reflecting both the physical condition of facilities and the progress of technological processes. Data sources include:

- Logs from automated station control systems;
- Telemetry from infrastructure devices and rolling stock;
- Data on actual train movements and shunting operations;
- Results from diagnostic and measurement systems;
- Data on the actions of dispatch and operational personnel.

In a digital environment, data ceases to be a supplementary analysis tool and becomes a primary management resource. It forms the basis for digital pictures of the current station state, identifies deviations from standard operating conditions, and assesses the risks of operational failures.

An important element of a digital station is the presence of closed digital control circles, including data collection, analysis, forecasting, and the generation of recommendations or control actions. Such loops enable adaptive control, in which technological and organizational decisions are attuned based on current and expected station operating conditions [6, 7, 12, 20].

The central element of the digital railway station concept is the digital twin, a virtual model of the station coordinated with the actual operational

facility. The digital twin syndicates the structural model of the infrastructure, a description of technological processes, and real-time data, enabling the simulation and prediction of station behavior in various operational situations (Table 1). In the context of operational reliability, the digital twin performs the following functions:

–forming an integrated view of the current station state;

–modeling the consequences of failures and overloads;
–assessing throughput and processing capacity reserves;
–analyzing flow and technology change scenarios;
–forecasting the likelihood of schedule disruptions and augmented downtime.

Table 1

Digital twin tools for a railway station in the context of operational reliability

№	Functional Task of the Digital Twin	Software Tool	Type of Model	Input Data → Output Indicators	Reliability Layer
1	Simulation of station processes	Any Logic	Discrete-event, agent-based	Train arrivals, consists, operation durations, resources → Queues, track occupancy, and idle times	Technological (P_t)
2	Marshalling yard hump simulation	Any Logic / Simio	Discrete-event	Traffic intensities consist of structure → Throughput, saturation	Technological (P_t)
3	Train movement simulation	Open Track	Dynamic, graph-based	Timetable, infrastructure, operational constraints → Delays, timetable stability	Graph-based (P_g)
4	Capacity planning	Rail Sys	Analytical + simulation	Station layout, timetable → Capacity margins	Graph-based (P_g)
5	Digital twin of infrastructure	Bentley Open Rail	Object-oriented	Track condition, switch defects → Failure probabilities	Physical (P_f)
6	Predictive maintenance	Siemens Railigent X	ML/ diagnostics	Telemetry, fault logs → Equipment failure risk	Physical (P_f)
7	Queue and flow modelling	Any Logic / FlexSim	Queueing theory	Arrival and service intensity → The probability of saturation	Technological (P_t)
8	Network-level stability analysis	Python + Network X	Graph, stochastic	Network topology, delays → Cascading effects	Graph-based (P_g)
9	Delay prediction	Python (LSTM, GNN)	Machine learning (ML)	Historical train movement data → $P(\Delta t > \Delta t_{\max})$	Graph-based (P_g)
10	Station overload prediction	Python (XG Boost)	ML classification	Track occupancy, queues, resources → $P(\rho \geq 1)$	Technological (P_t)
11	Management decision analysis	Any Logic + DSS	Scenario optimisation	Decision logs, constraints → Decision effectiveness	Managerial (P_u)
12	Dispatcher support	DSS / AI assistant	Rule-based + ML	Real-time KPIs → Recommendations	Managerial (P_u)
13	Integration of models	Azure Digital Twins	Integration platform	Multilayer data → Unified state $X(t)$	Integral
14	Scenario analysis	Any Logic + Digital Twin	What-if simulation	Alternative decisions → $R(t, \Delta T u)$	Integral
15	Calculation of reliability indicators	Python / MATLAB	Analytical	P_f, P_t, P_g, P_u → DRI, CR, GSI, ARI	Integral

It should be emphasized that a digital twin is not a separate replacement for operational reliability theory, but rather its instrumental implementation. It is exactly the theoretical principles regarding the role of flows, resource limitations, and the systemic nature of failures that define the semantic and functional limits of a station's digital twin. In the practical implementation of a digital twin for a

railway station, it is sensible to use a combined approach, in which simulation models of station processes (e.g., based on Any Logic) are supplemented by specialized tools for analyzing train schedules (Open Track, Rail Sys) and platforms for monitoring the physical condition of the infrastructure. This architecture allows the implementation of a multi-layer operational

reliability model consistent with the theory and allows the calculation of operational failure likelihoods across the physical, technological, scheduling, and management layers [13].

AI plays a key role in the development of a digital railway station, enabling the transition from evocative data analysis to interpretation and forecasting. Machine learning (ML) methods are used to identify patterns in large sets of operational data that cannot be detected by traditional analytical methods.

The main applications of AI at a digital station include:

- predicting technical failures and infrastructure degradation;
- identifying critical yard and siding loading conditions;
- predicting train delays and schedule stability;
- analyzing the effectiveness of technological and management decisions;
- supporting decision-making by dispatch personnel (Table 2).

Table 2

AI algorithms and control procedures for a digital railway station

N_o	Management procedure	Operational task	AI Algorithms	Input Data → Output of AI Model	Link to reliability
1	Infrastructure diagnostics	Early detection of degradation	Random Forest, XG Boost, CNN	Telemetry, defect logs, vibration data → P (failure)	Physical (P _f)
2	Predictive failure forecasting	Predictive maintenance	Survival models, LSTM	Historical failures, load data → P (failure ≤ ΔT)	Physical (P _f)
3	Track occupancy monitoring	Prevention of station overload	Logistic Regression, XG Boost	Track occupancy, queue length, arrival forecasts → P(ρ ≥ 1)	Technological (P _t)
4	Congestion prediction	Early warning of saturation	LSTM, Temporal CNN	Time series of station load → Station mode	Technological (P _t)
5	Delay prediction	Timetable stability forecast	LSTM, GNN	Train movement history, timetable → P(Δt > Δt _{max})	Graph/timetable (P _g)
6	Analysis of cascade effects	Propagation of delays	Graph Neural Networks	Network topology, delay propagation data → Pockets of instability	Graph/timetable (P _g)
7	Train dispatching sequence	Minimizing delays	Reinforcement Learning	Real-time station state → Optimal dispatching action	Managerial (P _u)
8	Shunting and resource planning	Reduction of idle time and conflicts	RL, Genetic Algorithms	Queues, resources → Optimal shunting plan	Managerial (P _u)
9	Dispatcher decision evaluation	Quality assessment of decisions	Supervised ML	Dispatcher logs, outcomes → Risk of suboptimal decision	Managerial (P _u)
10	“What-if” scenario analysis	Forecasting the effects of decisions	Bayesian Networks	System state + hypotheses → Probability distribution of outcomes	Integral
11	Multi-objective optimisation	Cost–risk trade-off	Multi-objective optimisation, GA	Risk indicators, costs → Pareto-optimal decisions	Integral
12	Anomaly detection	Identification of unexpected behaviour	Autoencoders, Isolation Forest	Real-time operational streams → Anomaly score/alerts	All layers
13	Decision support	Human–AI collaboration	Rule-based, XAI	Real-time KPIs → Action recommendations with explanations	Managerial (P _u)
14	Adaptive threshold learning	Adjustment to changing conditions	Online learning	Operational history → Updated reliability thresholds	All layers

In terms of operational reliability, AI enables a shift from assessing actual failures to measuring their probability, which fundamentally expands management capabilities.

Thus, AI is no longer an independent goal of digitalization, but a means of refining the

manageability and reliability of the transport process. AI algorithms in the digital twin of a railway station are primarily used to predict operational failures, assess risks, and support decision-making. ML methods allow quantitative assessment of the probabilities of overloads,

failures, and schedule disruptions, while strengthening learning and scenario analysis methods are applied within the digital twin to select management solutions while maintaining regulatory and technological constraints. This approach does not deny operational reliability theory, but rather ensures its practical implementation in the context of digitalization [4, 14, 15, 21, 22].

A comparison of the digital railway station concept with operational reliability theory demonstrates their deep methodological compatibility. The digital station is focused on measuring, predicting, and managing the same characteristics that theoretically describe operational reliability: resource utilization, technology stability, capacity reserves, and the probability of disruption to the transportation process.

Unlike the classical approach, where reliability is evaluated primarily retrospectively, the digital station allows operational reliability to be viewed as a dynamic and predictable value, changing over time and dependent on the current state of the system. This circumstance creates the preconditions for a new stage in the development of the theory, a transition from a normative-analytical to a data-driven interpretation of operational reliability.

These provisions provide the foundation for further analysis of the theoretical relationship between classical operational reliability theory and the digital railway station.

Theoretical relationship between operational reliability theory and the digital rail station concept

In operational reliability theory, a rail station is essentially viewed as a system capable of various operational states determined by resource utilization, traffic intensity, and compliance with technology. Although these states are not always openly defined in the classical formulation, they are logically present in the analysis of peak congestion periods, capacity reserves, and delay probability.

These states can be interpreted as:

- normal operating mode;
- increased load mode;
- saturation mode;
- overloaded or faulty state.

In classical theory, these states are described analytically, through average indicators and probabilistic estimates obtained based on standard parameters. The digital rail station recalls this concept but translates it into an observable and measurable form. Station states are recorded in real time based on track occupancy data, operation

durations, schedule deviations, and the technical condition of the infrastructure. Thus, the digital station practically embodies the same idea underlying the theory: a station as a system of states with limited resources and probabilistic transitions between operating modes [2, 7].

One of the central tenets of the theory is the probabilistic interpretation of operational reliability. Station reliability is defined as the probability that, under given operating conditions, the transportation process will be carried out without disruption to technology and schedule.

In the digital railway station, this concept is directly formalized. Operational reliability can be represented as the probability of maintaining a satisfactory system state over a given time horizon:

$$R(t, \Delta T) = P\{\text{the station performs its transport function within the interval } [t, t + \Delta T]\}$$

Unlike classical theory, where this probability is projected based on analytical models and historical statistics, a digital station allows for its dynamic calculation using current operating data and predictive models. This ensures the direct development of the theory's original probabilistic concept without changing its semantic content [8].

The classification of failures proposed by the theory includes technical, technological, organizational, and informational failures. This classification reflects the multi-level nature of station operation and fundamentally distinguishes operational reliability from purely technical reliability. A digital railway station not only preserves this classification but also translates it into measurable form. Each type of failure is associated with specific data sources and indicators:

- technical failures – with diagnostics and telemetry;
- technological – with operation logs;
- organizational – with analysis of management decisions and resource allocation;
- informational – with the quality and timeliness of data.

Additionally, the digital environment generates algorithmic failures associated with the improper operation of automated systems and decision-making models. These failures logically spread the organizational category of theory but reproduce the specifics of digital control. Consequently, a digital station expands the classification of failures without troubling its theoretical foundation.

In theory, the throughput and processing capacity of a station are considered key factors in operational reliability. They determine the limits of a system's stable operation and the likelihood of overloads.

In the classical interpretation, these characteristics are typically static or slightly variable quantities determined by the track structure and technology. A digital railway station transforms these parameters into a dynamic state, dependent on current load, the technical condition of components, the composition of flows, and management decisions.

Thus, a digital station does not change the concepts of throughput and processing capacity, but rather transforms them into time functions, enhancing the practical applicability of operational reliability theory.

The theory emphasizes that operational reliability should not be maximized totally, but rather maintained at an economically optimal level, determined by the balance between costs and losses from disruptions to the transportation process. The digital railway station provides tools for the practical implementation of this principle. The use of digital twins, predictive models, and optimization algorithms allows for the valuation of the consequences of management decisions and infrastructure changes in terms of both reliability and economic indicators. Thus, the classical problem of economic reliability optimization receives an algorithmic extension that fully corresponds to the original formulation of the theory.

Analysis shows that there is no gap between operational reliability theory and the concept of the digital railway station, but rather a clear theoretical continuity. The theory's key creeds:

- a systemic interpretation of the station;
- a probabilistic understanding of reliability;
- a multifactorial classification of failures;
- the relationship of reliability with flows, technology, and economics is fully preserved in the digital paradigm, but is given new means of implementation.

The digital railway station, therefore, represents not an alternative to classical theory, but its data-driven and algorithmic development, allowing the original ideas to be implemented in the context of a modern information and technological environment [15-19].

Methodology and methodological model for digital implementation of operational reliability theory

The digital implementation of operational reliability theory is based on representing a railway station as a dynamic system of states, operating under the effect of traffic flows, infrastructure constraints, and management decisions. Unlike the

classical analytical approach, the digital model is oriented toward the use of real-world operational data and predictive methods. Within the proposed methodology, operational reliability is considered as a probabilistic function of the station's state, changing over time and contingent on current and predicted operating parameters.

1. Formalization of the Digital Station State.

The state of a railway station at time t is represented as a vector:

$$X(t)=[X_f(t), X_t(t), X_g(t), X_u(t)] \quad (1)$$

where: $X_f(t)$ – is the infrastructure and rolling stock status; $X_t(t)$ – is the state of technological processes; $X_g(t)$ – is the schedule fulfillment status; $X_u(t)$ – is the control system state (organizational and algorithmic).

Each component of the vector $X(t)$ is determined based on digital station data and can take values from a finite or continuous set of states reflecting operational modes (normal, saturation, overload).

2. Operational Reliability as a Probability Function. According to theory, the operational reliability of a station is defined as the probability of performing the transport function without operational failure. In the digital model, this value is formalized as follows:

$$(t, \Delta T)=P(X(\tau) \in Q_{per}, \forall \tau \in [t, t+\Delta T]) \quad (2)$$

where Q_{per} – is the range of permissible operational states of the station.

Thus, reliability is interpreted as the probability that, over a given forecast horizon ΔT , the system will not enter the operational failure region [7].

3. Assessing the Probabilities of Operational Failures. For each state layer of the station, the probability of an operational failure is entered:

$$P_{k\ fail}(t, \Delta T)=P(X_k(t+\Delta T) \in Q_{k\ cr} / X_k(t)), \quad (3)$$

$$k \in \{f, t, g, u\}$$

where $Q_{k\ cr}$ – is the set of critical states for the corresponding layer.

These probabilities are estimated using:

- Infrastructure failure prediction models (for X_f);
- Load mode and process disruption classification models (for X_t);
- Delay and schedule stability prediction models (for X_g);
- Management and algorithmic decision analysis models (for X_u).

4. Aggregation of Operational Reliability. The integrated operational reliability of a station is defined as an aggregated function of the reliabilities of individual layers:

$$R(t, \Delta T)=A(1-P_{f\ fail}, 1-P_{t\ fail}, 1-P_{g\ fail}, 1-P_{u\ fail}) \quad (4)$$

where $A(\cdot)$ is an aggregation function reflecting the structure of the relationships between layers.

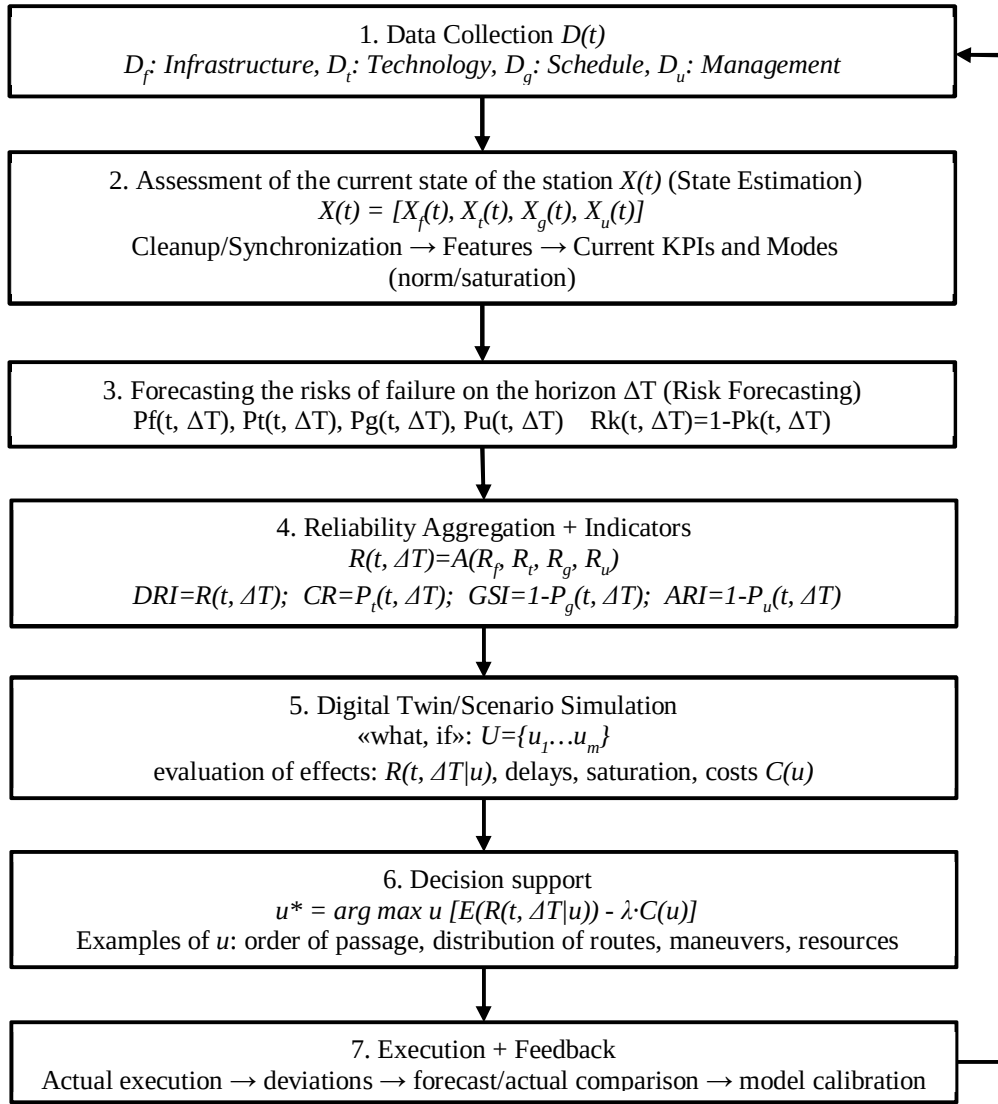


Fig. 1. Closed-loop digital control system for the operational reliability of a railway station

In practical applications, aggregation of the operational reliability of a digital railway station can be performed in various ways, depending on the system structure and the purpose of the analysis. The multiplicative form is appropriate for sequential process chains, where the failure of any layer leads to the failure of the transport function. Weighted aggregation allows for the consideration of the varying importance of factors and is used in decision support systems. Bayesian reliability networks are used to model the cause-and-effect relationships between physical, technological, and management failures and provide scenario analysis of operational risks.

5. Digital Station Operational Reliability Indicators. Based on the aggregated model, the following indicators are introduced:

1. Dynamic Reliability Index: $DRI(t) = R(t, \Delta T)$

2. Congestion Risk: $CR(t) = P_{t\text{fail}}(t, \Delta T)$

3. Graph Stability Index:
 $GSI(t) = 1 - P_{g\text{fail}}(t, \Delta T)$

4. Algorithmic Reliability Index:
 $ARI(t) = 1 - P_{u\text{fail}}(t, \Delta T)$

These indicators provide a quantitative interpretation of classical theoretical concepts in digital form [9].

6. Algorithm for the Digital Assessment of Operational Reliability. The process of assessing and managing operational reliability is implemented using the following algorithm:

1. Collecting data on the state of infrastructure, technology, schedule, and management.

2. Generating the current state vector $X(t)$.

3. Predicting the probabilities of operational failures for each layer.

4. Aggregating reliability and calculating integral indicators.
5. Assessing management decision scenarios.
6. Selecting the solution that ensures maximum expected reliability at acceptable costs (Fig. 1).

Formally, the optimal control solution u^* is defined as:

$$u^* = \arg \max_{u \in U} [E(R(t + \Delta T|u)) - \lambda C(u)] \quad (5)$$

where $C(u)$ - is the solution cost, and λ is the tradeoff coefficient between reliability and costs.

The proposed methodological model:

- maintains the interpretation of operational failure as a disruption of the transport function;
- relies on a systemic representation of the station;
- utilizes a probabilistic interpretation of reliability;
- implements the principle of economically optimal reliability.

Therefore, the digital model does not replace theory, but rather implements it in a formalized, algorithmic, and data-driven form.

Scientific novelty and practical significance

The analysis shows that the classical theory of operational reliability of railway stations has not lost its significance in the context of digitalization; on the contrary, it obtains new content and practical significance. Viewing a station as a transport system with limited resources, operating under the influence of flows and management decisions, is fully consistent with the modern interpretation of a station as a cyber-physical object. The key result of the study is the justification that the digital railway station concept is not an alternative, but a logical and technological development of operational reliability theory. All the basic elements of the theory - the systemic representation of the station, the probabilistic interpretation of reliability, the multifactorial nature of failures, and economic optimization - are retained in the digital paradigm, but they are given new means of implementation.

Unlike the classical approach, the digital station allows for:

- making station operational states observable in real time;
- moving from retrospective reliability assessment to forecasting;
- formalizing previously qualitative categories (organizational and informational failures);
- incorporating algorithmic control factors into reliability analysis.

It should be especially noted that the implementation of AI does not change the essence of operational reliability, but just expands the tools for its assessment and management. This is basically important from a methodological perspective, as it avoids the replacement of engineering or Information Technology terminology for theoretical concepts.

Unlike studies primarily focused on:

- the reliability of individual infrastructure elements (predictive maintenance);
- capacity and delay valuations independent of reliability theory;
- digital twins as engineering or visualization tools;
- the proposed approach considers the digital railway station within the framework of a holistic theory of operational reliability. This allows us to link the technical, technological, managerial, and economic aspects of station operation in a single formalized model.

Thus, the work fills a methodological gap between:

- classical transport theory,
- modern digital and intelligent solutions, which often remain unexplored in the existing literature.

The scientific novelty of this work lies in the following:

1. A theoretical connection between the classical theory of operational reliability of railway stations and the concept of a digital railway station is established and formalized.

2. It is shown that the digital railway station is a data-driven implementation of operational reliability theory, rather than a new, independent concept, ensuring the continuity of the conceptual framework.

3. Operational reliability is formalized as a probabilistic function of the digital station's state, dependent on physical, technological, graphical, and management layers.

4. A multi-layered operational reliability model is proposed, allowing for the consideration of technical, technological, organizational, and algorithmic factors within a single structure.

5. A methodological model and algorithm for digital reliability assessment are developed, enabling the transition from normative-analytical calculations to predictive management.

6. The classification of operational failures has been expanded by introducing algorithmic failures as a logical continuation of organizational disruptions in the digital environment.

The practical significance of the results lies in their potential use:

- in the development and implementation of digital twins of railway stations;
- in decision support systems for dispatch and operations personnel;
- in the design of next-generation station automated control systems;
- for assessing the effectiveness of digitalization measures;
- in the training and professional development of specialists in station operation management.

The proposed model can be adapted to various station types without changing its theoretical basis.

Conclusion

This article examines the problem of correlating the classical theory of operational reliability of railway stations with modern concepts of digitalization of rail transport. It is shown that the theory of operational reliability has a high degree of methodological maturity and conceptually meets the requirements of digital transport systems. It is established that a digital railway station represents the practical implementation and development of this theory, ensuring:

- measurability of operational conditions;
- forecasting the risks of operational failures;
- integration of technical, technological, and management factors;
- implementation of the principle of economically optimal reliability in algorithmic form.

The proposed multilayer model and algorithm for digital assessment of operational reliability provide the basis for the transition from normative management to intelligent management of railway station operations. The obtained results can serve as a theoretical basis for further research in the field of digital transport systems and the practical implementation of the digital railway station concept.

References

1. Osintsev, N. A., Sladkowski, A. Sustainability and reliability of railway transport systems under operational uncertainty. *Transport Systems and Transportation Technologies*, No. 19, pp. 66–74, 2021.
2. Chen, H., Zhang, Y., Li, D., et al. Comprehensive Survey of the Landscape of Digital Twin. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 92783–92801, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3092438>
3. Anu, T. E., Rao, S., Kumar, R. Revolutionizing railway systems: A systematic review of Digital Twin technologies. *Transportation Engineering*, Vol. 15, 100210, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100210>
4. De Donato, L., Dirnfeld, R., Somma, A., et al. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture. *Journal*

- of Reliable Intelligent Environments*, Vol. 9, pp. 303–317, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6>
5. Kaewunruen, S., Xu, N. Digital Twin for Sustainability Evaluation of Railway Station Buildings. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 4, 77, 2018. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00077>
6. Shaltout, R. E. Key Challenges of Smart Railway Station. In: *Design and Construction of Smart Cities*. JIC Smart Cities 2019. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64217-4_33
7. Bychkov, I. V., Rakhmangulov, A. N., et al. Modeling of railway stations based on queuing networks. *Automation and Remote Control*, Vol. 79(12), pp. 2251–2264, 2018. <https://doi.org/10.1134/S0005117918120117>
8. Zhou, Y., He, X., Wang, S. Capacity consumption and stability of railway station operations under disturbance. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 125, pp. 1–18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.04.006>
9. Padovano, A., Longo, F., Nicoletti, L., et al. Improving safety management in railway stations through a simulation-based digital twin. *Safety Science*, Vol. 139, 105251, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105251>
10. Jensen, L. W., Nielsen, L. K., Landex, A. Railway timetable robustness indicators: a literature review. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 7(3), pp. 187–199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.10.001>
11. Zhang, Z. Y., Shang, D., Su, S. Digital twin in railway industry: a bibliometric analysis and systematic review. *Digital Twin*, 2025. <https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2533858>
12. Barricelli, B. R., Casiraghi, E., Fogli, D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 167653–167671, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
13. Rakhmangulov, A., Osintsev, N., Sladkowski, A. Digital twins of railway junctions based on AnyLogic simulation modelling. *Transport Problems*, Vol. 15(2), pp. 41–52, 2020. <https://doi.org/10.21307/tp-2020-020>
14. Zhang, D., Wang, J., Lin, Y., et al. Prediction of train station delays using machine learning methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 18, 100240, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100240>
15. Huang, P., Wen, C., Li, Z., et al. Solving the railway timetable rescheduling problem with graph neural networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 148, 104013, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104013>
16. Dewilde, T., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P. Defining robustness of a railway timetable. *European Journal of Operational Research*, Vol. 234(3), pp. 755–764, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.015>
17. Sarp, S., Kuzlu, M., Jovanovic, V., et al. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains. *European Transport*

Research Review, Vol. 16, 58, 2024.
<https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5>

18. Tan, Z., Nie, N., Wang, K., Cai, W., Li, X. Conceptual architecture design and implementation of a digital twin-based high-speed railway station: a case study of Guangzhou Baiyun station. Proceedings of the Third International Conference on Algorithms, Network, and Communication Technology (ICANCT 2024), Paper 1354512, 2024. <https://doi.org/10.1117/12.3060246>

19. Thompson, E. A., Lu, P., Alimo, P. K., Atuobi, H. B., Akoto, E. T., Abbew, C. K. Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. High-speed Railway, Vol. 3, pp. 238–250, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.05.005>

20. Rakhmangulov, A. N., Osintsev, N. A., Sladkowski, A. Simulation modeling of railway stations and junctions under conditions of flow variability.

Transport Systems and Transportation Technologies, No. 17, pp. 45–53, 2019.

21. Ahmadov, H., Manafov, E., Karimov, B. & Mustafayeva, A. Application of Artificial Intelligence-Based Digital Technologies in Transport Logistics. International Journal of Transportation Research and Technology, Vol 2 (2), 2025, pp. 23-37. DOI:10.71108/transporttech.vm02is02.02

22. Manafov, E. Application of artificial intelligence techniques to reduce the loading of the marshalling yard. Transport systems and transportation technologies, Collection of scientific works of Dnipro National University of Railway University, Vol. 23, 2022, p. 5-10. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261643>

Received 04.09.2025

Accepted 12.11.2025

Е. К. МАНАФОВ

ЦИФРОВА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕОРІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Мета. Метою цього дослідження є встановлення теоретичного зв'язку між класичною теорією експлуатаційної надійності залізничних станцій та сучасною концепцією цифрової залізничної станції, а також розробка методологічної моделі цифрової реалізації цієї теорії в контексті цифровізації управління транспортними процесами. Метою роботи є обґрунтування того факту, що цифрова залізнична станція не є альтернативною концепцією, а радше логічним та технологічним розвитком класичної теорії експлуатаційної надійності. **Методологія.** У дослідженні використовувалися методи системного та логіко-методологічного аналізу, ймовірного розуміння експлуатаційної надійності, валідації експлуатаційних станів транспортних систем, а також елементи теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання та аналізу на основі даних. Теоретичні потреби класичної теорії експлуатаційної надійності порівнюються з функціональними можливостями цифрових двійників та інтелектуальних систем управління. Для опису цифрового застосування теорії запропоновано багатопланове представлення стану станції, що включає фізичний, технологічний, графічний та управлінський рівні. **Результати.** Показано, що експлуатаційну надійність залізничної станції можна формалізувати як ймовірнісну функцію її експлуатаційного стану з полином часу. Запропоновано методологічну модель цифрової реалізації теорії експлуатаційної надійності, що базується на формуванні вектора стану станції, прогнозуванні ймовірностей експлуатаційних відмов для кожного шару та їх сукупній оцінці. Розроблено алгоритм цифрової оцінки надійності, що дозволяє перейти від ретроспективного нормативно-аналітичного підходу до динамічного та прогнозного управління операційними ризиками. Введено інтегровані показники експлуатаційної надійності, що дозволяють кількісно оцінити стійкість станції в цифровому середовищі. **Наукова новизна.** Наукова новизна цієї роботи полягає у формалізації теоретичного зв'язку між класичною теорією експлуатаційної надійності залізничних станцій та концепцією цифрової залізничної станції. Вперше експлуатаційна надійність розглядається як ймовірнісна функція стану цифрової станції, що залежить від комбінації фізичних, технологічних, диспетчерських та управлінських факторів. Запропоновано багатопланову модель, яка розширює класичну класифікацію експлуатаційних відмов шляхом включення алгоритмічного компонента керування. **Практична цінність.** Отримані результати можуть бути використані при розробці цифрових двійників залізничних станцій, проектуванні систем підтримки рішень, оцінці ефективності заходів цифровізації та навчанні фахівців з управління операціями залізничних станцій.

Ключові слова: експлуатаційна надійність, залізнична станція, цифровий двійник, штучний інтелект, управління транспортним процесом, пропускна здатність.

УДК 656.2:504.06

Д. В. ЛОМОТЬКО^{1*}, Д. В. АРСЕНЕНКО^{2*}, М. Д. ЛОМОТЬКО^{3*}, К. Г. ВЛАСЕНКО^{4*}

^{1*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (067) 576 06 61, ел. пошта den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925

^{2*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта arsenenko.danil@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7757-8706

^{3*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта kolyanl890@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-0294-2686

^{4*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (095) 334 74 45, ел. пошта kirillvlasenko715@gmail.com, ORCID 0009-0001-7700-9172

ЗЕЛЕНА ЛОГІСТИКА У ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ТА СТІЙКІ РІШЕННЯ

Мета дослідження полягає у розробці математичних моделей для оцінки зелених аспектів залізничної логістики та визначенні оптимальних стійких рішень для мінімізації вуглецевого сліду та підвищення ресурсоефективності у контексті циркулярної економіки. **Методика.** У статті досліджено концепцію зеленої логістики у залізничному транспорті через призму екологічних, економічних та соціальних аспектів сталого розвитку. Розрахунок вуглецевого сліду (Carbon Footprint) залізничної логістики базується на стандарті ISO 14083:2023 та концепції зеленої логістики. **Результати.** Згідно з методологією зеленої логістики, повний вуглецевий слід включає не тільки прямі викиди від експлуатації, але й непрямі викиди від виробництва енергії, будівництва інфраструктури та управління відходами. Розроблено математичні моделі для розрахунку вуглецевого сліду залізничних перевезень та оптимізації енергоспоживання з урахуванням принципів циркулярної економіки. Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics), який інтегрує показники декарбонізації, ресурсоефективності та соціальної відповідальності. Результати моделювання демонструють, що впровадження принципів зеленої логістики через електрифікацію з відновлюваними джерелами енергії може знизити викиди CO₂ на 90%, а використання водневих локомотивів забезпечує повну декарбонізацію перевезень. Проведено порівняльний аналіз шести сценаріїв розвитку зеленої залізничної логістики для України, який виявив, що найвища інтегральна стійкість досягається при змішаній стратегії, що включає мультимодальну інтеграцію, зелені вантажні коридори та цифрову трансформацію. **Наукова новизна.** Розроблено удосконалену математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних типів залізничної тяги, побудовано та досліджено модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту. Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність запропонованих підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії (Нідерланди), масове впровадження водневих технологій (Німеччина, Франція), інтеграція сонячної енергії (Індія, Велика Британія), цифровізація управління (Швейцарія, Японія). Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки. **Практична значимість.** Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, досягнення 75% електрифікації до 2030 року, інтеграція 30% відновлюваних джерел енергії до 2030 року, запуск водневих локомотивів та повна декарбонізація до 2040 року. Доведено можливість використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України та оцінки екологічного ефекту від впровадження різних технологічних рішень.

Ключові слова: зелена логістика, залізничний транспорт, декарбонізація, циркулярна економіка, зелені вантажні коридори, мультимодальні перевезення, вуглецевий слід, цифрова трансформація логістики.

Вступ

Зелена логістика (Green Logistics) є екологічно орієнтованою та стійкою логістичною системою, яка охоплює діяльність, що впливає на

логістичні функції та процеси, сприяючи захисту довкілля та розвитку циркулярної економіки. У контексті глобальних кліматичних викликів залізничний транспорт розглядається як ключовий елемент зеленої логістики завдяки

своїй енергоефективності та потенціалу інтеграції з відновлюваними джерелами енергії [1, 2].

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), залізничні вантажні перевезення генерують на 75% менше викидів CO₂ на тонну вантажу порівняно з автомобільним транспортом та на 90% менше порівняно з авіаційним [3]. Європейський Союз у межах стратегії Sustainable and Smart Mobility Strategy та European Green Deal встановив амбітну мету збільшити частку залізничних вантажних перевезень: до 2030 року 30% вантажів на відстані понад 300 км має перевозитися залізницею або внутрішніми водними шляхами, а до 2050 року – понад 50% [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях транспортна індустрія відіграє важливу роль у розвитку світової економіки, оскільки зокрема створює значне екологічне навантаження на навколишнє середовище. В умовах глобальних екологічних проблем залізничний транспорт вважається одним із найбільш екологічно безпечних видів перевезень. Завдяки низькому рівню викидів парникових газів, енергоефективності та можливості інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, залізниця є основою для сталого розвитку транспортної системи [2].

Останні дослідження свідчать, що залізничний транспорт має значно менший вплив на довкілля порівняно з автомобільним або авіатранспортом [1, 6]. Проте існують певні проблеми, такі як забруднення ґрунтів та водних ресурсів, шумове навантаження, викиди дизельних локомотивів. Актуальним завданням є пошук стійких транспортних рішень, які мінімізують негативний вплив залізничної логістики на довкілля.

Дослідження для умов литовських залізниць показали, що зелена логістика передбачає не просто зниження викидів, а комплексний підхід до екологізації всього ланцюга поставок. Вони виявили, що основною перешкодою для впровадження принципів зеленої логістики залишається використання дизельних локомотивів на неелектрифікованих лініях, тоді як електрифікація створює значні можливості для декарбонізації та інтеграції у циркулярну економіку [7].

У [8] запропоновано комплексну методологію для ідентифікації індикаторів оцінки зелених залізничних операцій у Китаї. Їхнє дослідження, яке базувалося на аналізі 123 наукових статей та інтерв'ю з експертами, виділило 17 ключових індикаторів у трьох категоріях зеленої

логістики: екологічні (шумове забруднення, викиди, споживання ресурсів), економічні (ефективність інвестицій, логістичні витрати) та соціальні (доступність, безпека, якість послуг).

Всесвітній банк у своєму звіті [9] підкреслює, що зелена залізнична логістика є ключем до вирішення подвійного виклику: декарбонізації транспорту та інклюзивного економічного зростання. Проєкти Всесвітнього банку у Індії (Eastern Dedicated Freight Corridor) та Єгипті (Cairo Alexandria Logistics Development) демонструють, що інвестиції у зелену залізничну логістику не тільки знижують викиди, але й створюють робочі місця та підвищують конкурентоспроможність економіки.

Європейська Комісія запропонувала комплекс заходів для підвищення ефективності та екологічності вантажних перевезень, включаючи покращення управління залізничною інфраструктурою, стимули для використання вантажівок з нульовими викидами та вдосконалену систему звітності про викиди згідно з новим стандартом ISO 14083:2023. Концепція зелених вантажних коридорів (Green Freight Corridors) передбачає безшовну інтеграцію різних видів транспорту з пріоритетом залізничних перевезень для дальніх відстаней [4, 10].

В [11] проаналізовано просторово-часову еволюцію ефективності зеленої логістики в китайських містах та виявлено, що інфраструктурні інвестиції, технологічні інновації та політична підтримка є ключовими драйверами розвитку. Зростання ефективності зелених технологічних інновацій (GTIE) є важливим шляхом захисту міського екологічного середовища, тому побудовано систему показників міської GTIE за допомогою показника на основі суперефективності (S-SBM).

Цікавою є удосконалена модель для оцінки вуглецевого сліду електричного залізничного транспорту, яка враховує структуру енергетичного балансу країни та весь життєвий цикл логістичного ланцюга [12].

Сучасні дослідження концепції Logistics 5.0 підкреслюють роль штучного інтелекту та фундаментальних моделей у оптимізації зелених ланцюгів поставок, для зменшення споживання палива та покращення зворотної логістики. Зокрема, залізничний транспорт США (Burlington Northern Santa Fe Railway, BNSF) демонструє, що перехід на залізницю дозволяє клієнтам уникнути 24.6 млн тонн CO₂-еквіваленту викидів щорічно, що еквівалентно вилученню 5.7 млн автомобілів з доріг [13].

Попри значний прогрес у дослідженнях, перспективним залишається питання комплексної оцінки ефективності зеленої залізничної логістики через математичне моделювання з урахуванням принципів циркулярної економіки, мультимодальної інтеграції та повного життєвого циклу логістичних процесів для умов України.

Визначення мети та завдання дослідження

Мета дослідження полягає у розробці математичних моделей для оцінки зелених аспектів залізничної логістики та визначенні оптимальних стійких рішень для мінімізації вуглецевого сліду та підвищення ресурсоефективності у контексті циркулярної економіки. Завданнями дослідження наступні:

- розробити математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних типів залізничної тяги;
- побудувати та дослідити модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту;
- запропонувати комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки;
- провести порівняльний аналіз екологічної ефективності різних технологічних сценаріїв зеленої логістики для України на основі вітчизняного та закордонного досвіду.

Основна частина дослідження

Для досягнення поставленої мети застосовано комплекс методів, що відповідають принципам зеленої логістики. Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) використано для оцінки повного вуглецевого сліду залізничного транспорту від видобутку ресурсів до утилізації у контексті циркулярної економіки. Математичне моделювання дозволило розрахувати викиди парникових газів та оптимізувати ресурсоефективність для різних сценаріїв зеленої логістики. Порівняльний аналіз застосовано для оцінки ефективності зелених вантажних коридорів та мультимодальних рішень. SWOT-аналіз використано для виявлення сильних та слабких сторін впровадження зеленої логістики в українських залізницях. Статистичний аналіз міжнародних даних надав можливість верифікувати розроблені моделі та визначити найкращі практики. Системний підхід забезпечив інтеграцію екологічних, економічних та соціальних аспектів зеленої логістики у єдину оціночну систему згідно з принципами ISO 14083:2023 [10].

1. Математична модель вуглецевого сліду зеленої залізничної логістики.

Розрахунок вуглецевого сліду (Carbon Footprint) залізничної логістики базується на стандарті ISO 14083:2023 та концепції зеленої логістики, що враховує весь ланцюг поставок. Згідно з методологією зеленої логістики, повний вуглецевий слід включає не тільки прямі викиди від експлуатації, але й непрямі викиди від виробництва енергії, будівництва інфраструктури та управління відходами [7, 14].

$$E_{total} = E_{operation} + E_{infrastructure} + E_{manufacturing} \quad (1)$$

де E_{total} – повні викиди CO₂e (кілограм еквіваленту вуглекислого газу);

$E_{operation}$ – викиди від експлуатації;

$E_{infrastructure}$ – викиди від будівництва та обслуговування інфраструктури;

$E_{manufacturing}$ – викиди від виробництва рухомого складу.

Для операційної фази, яка становить найбільшу частку викидів протягом здійснення перевезення, обсяг викидів усіх видів поїздів розраховуються за формулою:

$$E_{operation} = \frac{D \cdot P \cdot EF}{LF \cdot N} \quad (2)$$

де D – відстань перевезення (км);

P – споживання енергії на одиницю відстані (кВт·год/км для електротяги або л/км для дизельної тяги);

EF – коефіцієнт викидів (кг CO₂e/кВт·год або кг CO₂e/л палива);

LF – коефіцієнт завантаження (від 0 до 1, що відображає ступінь використання пасажирської або вантажної місткості);

N – кількість пасажирів (т. вантажу).

Проведений порівняльний аналіз різних типів тяги показує істотні відмінності в екологічних показниках (табл. 1). Електрична тяга при використанні середнього європейського енергетичного значення генерує 14...35 г CO₂/пас-км [7, 12], а при живленні від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) цей показник знижується до 2...5 г CO₂/пас-км [15]. Дизельна тяга характеризується викидами на рівні 41...44 г CO₂/пас-км [16], що майже втричі перевищує показники електротяги. Водневі локомотиви з паливними елементами практично не виробляють викидів у місці експлуатації (0...8 г CO₂/пас-км), хоча слід враховувати викиди при виробництві водню [17]. Високошвидкісні електричні поїзди завдяки високому завантаженню та сучасним аеродинамічним рішенням демонструють найкращі показники – 3.2...11.6 г CO₂/пас-км [12, 26].

Для української залізничної мережі розрахунки мають враховувати специфіку енергетичного балансу країни. Коефіцієнт викидів для електроенергії в Україні становить приблизно 450...550 г CO₂/кВт год через значну частку теплових електростанцій. При середньому споживанні електричного поїзда 0,04 кВт год/пас-км

отримуємо викиди на рівні 20 г CO₂/пас-км. У разі переходу на відновлювані джерела енергії з коефіцієнтом викидів 50 г CO₂/кВт год викиди знижуються до 2 г CO₂/пас-км, що дає потенціал скорочення викидів на 90%.

Таблиця 1

Порівняльні екологічні характеристики різних типів тяги залізничного транспорту

Тип тяги	Викиди CO ₂ (г/ пас-км)	Споживання енергії	Викиди NO _x (г/ пас-км)	Шумове забруднення, дБ	Джерела
Електрична (ЕС, середній мікс)	14...35	0,04 кВт год/пас- км	0,05...0,12	75...82	[7, 12]
Електрична (ВДЕ 100%)	2...5	0,04 кВт год/пас- км	0,02...0,04	75...82	[15]
Дизельна	41...44	0,22 л/пас-км	0,35...0,48	80...88	[1, 1616]
Водневі паливні елементи	0...8	0,33 кг H ₂ /100 км	0	72...78	[17]
Високошвидкісні електричні	3,2...11.6	0,033 кВт год/ пас-км	0,03...0,08	75...80	[16]

Приклад розрахунку 1. Викиди CO₂ для електричного поїзда на маршруті Київ-Харків.

Вихідні дані:

- відстань $D = 480$ км
- кількість пасажирів $N = 450$ осіб
- коефіцієнт завантаження $LF = 0.75$
- споживання енергії $P = 0,04$ кВт·год/пас-км
- коефіцієнт викидів для української електроенергії $EF = 500$ г CO₂/кВт·год

Розрахунок обсягу викидів для електропоїзда:

$$E_{operation} = \frac{480 \cdot 0,04 \cdot 500}{0,75 \cdot 450} = 28,4 \text{ г CO}_2/\text{пас-км.}$$

Загальні викиди на маршрут з урахуванням $E_{operation}^{ep}$:

$$28,4 \cdot 480 / 1000 = 13,6 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

При переході на відновлювані джерела енергії ($EF = 50$ г CO₂/кВт·год) обсяг викидів, розрахований за формулою (2) становить:

$$E_{renewable} = \frac{480 \cdot 0,04 \cdot 50}{0,75 \cdot 450} = 2,8 \text{ г CO}_2/\text{пас-км.}$$

Загальні викиди на маршрут:

$$28,4 \cdot 480 / 1000 = 1,36 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

Потенціал скорочення викидів становить:

$$\frac{13,6 - 1,36}{13,6} \cdot 100 = 90,4 \text{ \%}.$$

Розрахунок обсягу викидів для дизель-поїзда: (обсяг викидів $E_{operation}^{dp} = 42$ г CO₂/пас-км):

$$E_{diesel} = 42 \cdot 480 / 1000 = 20,2 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

Таким чином, навіть електричний поїзд на традиційній електроенергії виробляє на 32.6% менше викидів, ніж дизель-поїзд, а при використанні ВДЕ – на 93.6% менше. На підставі аналізу даних [18] у табл. 2 представлено структуру енергетичного балансу України та потенціал декарбонізації залізниць у післявоєнний період.

Таблиця 2

Структура енергетичного балансу України та потенціал декарбонізації залізниць

Джерело енергії	Поточна частка (%)	Коефіцієнт викидів (г CO ₂ /кВт·год)	Цільова частка 2030 (%)	Цільова частка 2040 (%)
Теплові електростанції (вугілля, газ)	55	820...950	35	15
Атомні електростанції	25	12	30	25
Гідроелектростанції	8	24	10	12
Вітрова енергетика	5	11	15	25
Сонячна енергетика	7	45	10	23
Середній коефіцієнт викидів	100	500	300	150

2. Модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту.

Оптимізація енергоспоживання залізничного транспорту сформульовано як задачу багатокритеріальної оптимізації з мінімізацією цільової функції:

$$\min Z = \sum_i (E_i \cdot C_i + P_i \cdot \lambda) \quad (3)$$

де E_i – енергоспоживання на i -му сегменті маршруту;

C_i – вартість енергії;

P_i – кількість викидів забруднювачів;

λ – ваговий коефіцієнт екологічного критерію (чим вище значення λ , тим більший пріоритет надається екологічним показникам порівняно з економічними).

Оптимізація проводиться за умови дотримання наступних обмежень:

- $T_i \leq T_{max}$ (час руху не перевищує максимально допустимий);

- $V_i \geq V_{min}$ (швидкість руху не нижче мінімальної);

- $\sum_i E_i \leq E_{capacity}$ (сумарне енергоспоживання не перевищує енергетичну ємність системи).

Енергоспоживання залежить від маси поїзда, швидкості руху, профілю колії, опору руху та ефективності тягової системи. Залежність від швидкості має нелінійний характер і описується поліноміальною функцією третього ступеня

$$E(V) = E_0 + k_1 V + k_2 V^2 + k_3 V^3,$$

де коефіцієнти k_1, k_2, k_3 визначаються аеродинамічними характеристиками рухомого складу.

Аналіз показує, що оптимальна швидкість для мінімізації питомого енергоспоживання при збереженні конкурентоспроможності становить: для приміських сполучень – 80...100 км/год (споживання 0,035 кВт·год/пас-км), для регіональних сполучень – 120...140 км/год (0,038 кВт·год/пас-км), для міжміських сполучень – 160...200 км/год (0,042 кВт·год/пас-км).

Високошвидкісні поїзди при швидкості 250...300 км/год за умови високого завантаження та сучасних аеродинамічних рішень досягають споживання 0,033 кВт·год/пас-км [16].

Приклад розрахунку 2. Оптимізація швидкості для маршруту Київ-Львів

Вихідні дані:

- відстань $D = 540$ км;

- можливі швидкості: 100, 140, 180, 200 км/год;

- маса поїзда $M = 450$ тонн;

- кількість пасажирів $N = 380$;

- коефіцієнт завантаження $LF = 0.70$;

- вартість електроенергії $C = 2,5$ грн/кВт·год;

- коефіцієнт викидів $EF = 500$ г CO_2 /кВт·год;

- ваговий коефіцієнт екологічного критерію, прийнято $\lambda = 0,6$.

Залежність енергоспоживання від швидкості (емпірична модель для умов України):

$$E(V) = 0.025 + 0.00008V + 0.0000003V^2 + 0.0000000015V^3, \text{ кВт·год/пас-км}$$

Розрахунок викидів для різних швидкостей для маршруту Київ-Львів наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахунок рівня екологічних показників для різних швидкостей для маршруту Київ-Львів

Швидкість (км/год)	Час руху (год)	Е (кВт·год/пас-км)	Загальне споживання (кВт·год)	Викиди (кг CO_2)	Вартість (грн)	Z (цільова функція)
100	5,40	0,036	5184	2592	12 960	14 515
140	3,86	0,038	5472	2736	13 680	15 322
180	3,00	0,042	6048	3024	15 120	16 934
200	2,70	0,046	6624	3312	16 560	18 547

Таким чином, оптимальна швидкість з точки зору екологічних показників 100 км/год (мінімальне значення цільової функції Z).

Узагальнюючи результат, побудовано залежність енергоспоживання від швидкості для різних типів залізничних пасажирських сполучень (табл. 4 та рис. 1).

Встановлено, що високошвидкісні поїзди досягають найкращої енергоефективності завдяки

високому завантаженню ($LF > 0.85$) та аеродинамічним рішенням. Однак при врахуванні часового обмеження ($T_{max} = 4$ години) оптимум зміщується до швидкості 140 км/год, що забезпечує баланс між енергоефективністю та конкурентоспроможністю за часом.

Залежність енергоспоживання від швидкості для різних типів сполучень

Тип сполучення	Оптимальна швидкість (км/год)	Споживання (кВт·год/пас-км)	Викиди при EF=500 (г CO ₂ /пас-км)	Викиди при ВДЕ (г CO ₂ /пас-км)	Економія енергії порівняно з максимальною швидкістю
Приміські	80...100	0,035	17,5	1,8	25%
Регіональні	120...140	0,038	19,0	1,9	19%
Міжміські	160...200	0,042	21,0	2,1	10%
Високошвидкісні	250...300	0,033	16,5	1,7	–

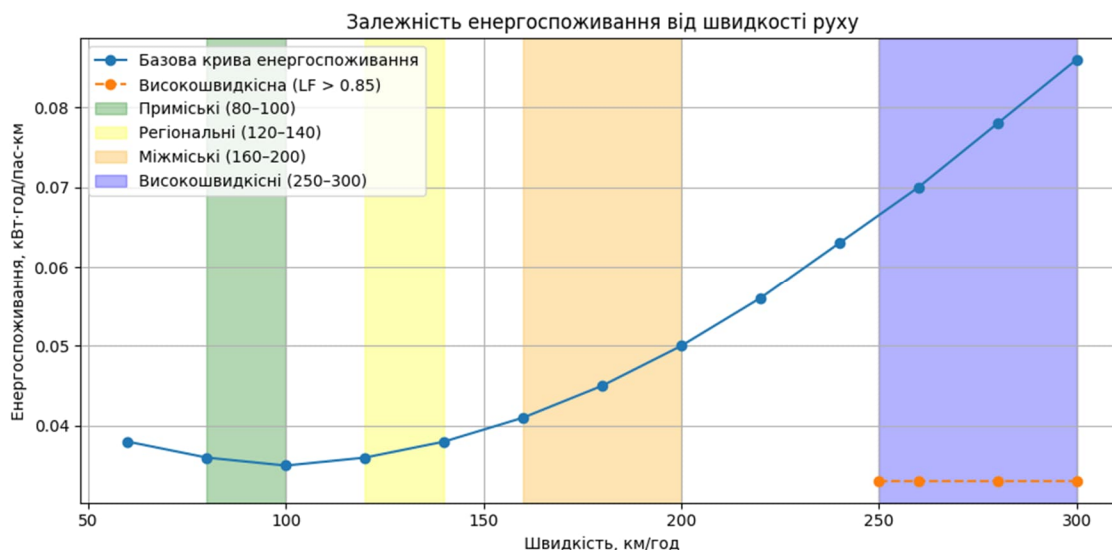


Рис. 1. Побудова залежності енергоспоживання від швидкості руху

На основі вище зазначених даних побудовано залежність енергоспоживання від швидкості руху (див. рис. 1). На графіку зазначено:

- приміські (80...100 км/год) – зелена зона
- Регіональні (120...140 км/год) – жовта зона;
- міжміські (160...200 км/год) – помаранчева зона;
- високошвидкісні (250...300 км/год, при LF>0,85) – синя зона (окрема крива з показником 0,033).

3. Комплексний індекс стійкості залізничної логістики GMSL.

Для інтегральної оцінки зеленої стійкості залізничної логістики запропоновано індекс GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics Index), який об'єднує екологічні, економічні та соціальні показники у єдиній системі оцінювання відповідно до концепції зеленої логістики [7, 10]. Індекс розраховується за формулою:

$$S = w_1 \cdot E_{index} + w_2 \cdot Ec_{index} + w_3 \cdot So_{index} \quad (4)$$

де S – інтегральний індекс зеленої стійкості (від 0 до 100 балів, де 100 означає найвищий рівень відповідності принципам зеленої логістики);

E_{index} – екологічний індекс (декарбонізація,

ресурсоефективність, циркулярна економіка);

Ec_{index} – економічний індекс (зелені інвестиції, логістична ефективність);

So_{index} – соціальний індекс (доступність, безпека, якість життя);

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети зеленого розвитку ($\sum w_i = 1$).

Екологічний індекс (E_{index}) вимірює рівень зниження екологічного впливу порівняно з базовим сценарієм (дизельна тяга) за формулою:

$$E_{index} = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{E_{actual}}{E_{baseline}} \right) \right] \quad (5)$$

де E_{actual} – фактичний вуглецевий слід досліджуваного сценарію;

$E_{baseline}$ – вуглецевий слід базового сценарію.

Індекс включає п'ять компонентів зеленої логістики: викиди CO₂ та парникових газів (вага 0,4), викиди оксидів азоту NO_x та твердих частинок РМ (вага 0,2), рівень шумового забруднення та вплив на біорізноманіття (вага 0,15), споживання невідновлюваних ресурсів та водний слід (вага 0,15), інтеграція у циркулярну економіку та управління відходами (вага 0,1).

Економічний індекс (Ec_{index}) відображає фі-

нансову ефективність зелених логістичних рішень з урахуванням капітальних витрат на зелені технології, операційних витрат, вартості відновлюваних енергоносіїв, економічного ефекту від зниження зовнішніх витрат зелених інвестицій.

Соціальний індекс (So_{index}) оцінює соціальний вплив зеленої логістики, включаючи доступність екологічно чистих транспортних послуг, безпеку перевезень, вплив на здоров'я населення через зниження забруднення повітря та шуму, створення «зелених» робочих місць у секторі

відновлюваної енергетики та обслуговування сучасного рухомого складу.

Для визначення вагових коефіцієнтів використано експертний метод з урахуванням стратегічних пріоритетів України у контексті європейської інтеграції та декарбонізації економіки. Прийнято наступні значення: $w_1 = 0,45$ (екологічний критерій), $w_2 = 0,30$ (економічний критерій), $w_3 = 0,25$ (соціальний критерій).

На основі моделі GMSL проведено порівняльний аналіз шести сценаріїв розвитку залізничної мережі України, наведений у табл. 5.

Таблиця 5

Результати моделювання сценаріїв розвитку залізничної мережі України за індексом GMSL

Сценарій	E_{index} (екологічний)	Ec_{index} (економічний)	So_{index} (соціальний)	S_{total} (інтегральний)	Капітальні інвестиції, млрд грн
1. Базовий (45% електрифікації)	42	55	60	52.3	0 (базовий)
2. Електрифікація 75%	68	62	72	67.2	85...95
3. Електрифікація 75% + ВДЕ 50%	82	58	78	72.6	110...125
4. Повна електрифікація + ВДЕ 100%	91	54	85	76.6	145...165
5. Водневі локомотиви (55% мережі)	95	48	82	74.8	95...110
6. Змішана стратегія*	87	67	80	78.0	115...130

*Змішана стратегія включає: електрифікація 75% магістралей, ВДЕ 50% на інфраструктурі, водневі локомотиви на 25% неелектрифікованих ліній, цифрові системи управління.

Базовий сценарій (з поточним рівнем електрифікації близько 45%) характеризується індексом стійкості 52,3 бали. Сценарій електрифікації 75% мережі підвищує індекс до 67,2 балів завдяки істотному зниженню викидів, але потребує значних капітальних інвестицій. Комбінація електрифікації 75% та інтеграції 50% відновлюваних джерел енергії дає 72,6 балів. Найбільш амбітний сценарій повної електрифікації з 100% ВДЕ досягає 76,6 балів, однак характеризується найнижчим економічним індексом (54 бали) через високі капітальні витрати. Сценарій з водневими локомотивами демонструє найвищий екологічний індекс (95 балів), але низький економічний індекс (48 балів) через високу вартість водневих технологій.

Змішана стратегія, що передбачає електрифікацію магістральних напрямків, впровадження ВДЕ на інфраструктурних об'єктах та використання водневих локомотивів на неелектрифікованих гілках, показує найвищий інтегральний індекс стійкості 78.0 балів завдяки оптимальному балансу між екологічною ефективністю, економічною доцільністю та соціальними вигодами. На основі зазначених даних побудовано динаміку зниження викидів CO_2 при впрова-

дженні різних сценаріїв (рис. 2). Ці дані показують ефективність сценаріїв при їх реалізації. Найменша кількість CO_2 в змішаному сценарії, найбільша в базовому сценарії.

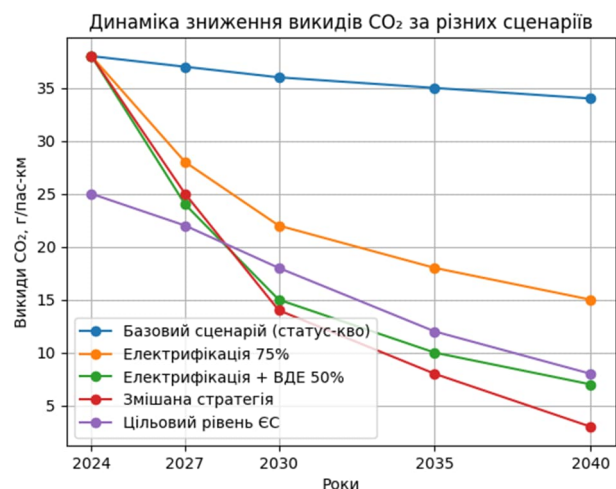


Рис. 2. Динаміка зниження викидів CO_2 при впровадженні різних сценаріїв

Для демонстрації зазначених вище результатів табл. 5 побудовано рис. 3. Даний рисунок показує порівняння індексу GMSL для різних сценаріїв, що показує ефективність сценаріїв при різних індексах.

На рисунку зображені гістограми, де E_{index} (синій); Ec_{index} (зелений); So_{index} (помаранчевий); S_{total} (червона лінія).

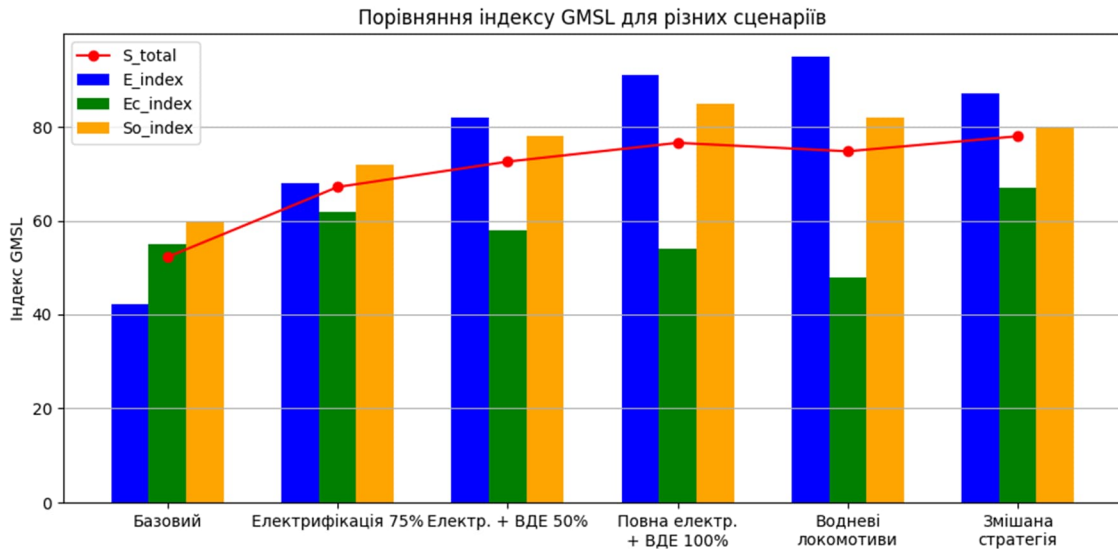


Рис. 3. Порівняння індексу GMSL для різних сценаріїв

4. Аналіз екологічної ефективності різних технологічних сценаріїв зеленої логістики для України на основі вітчизняного та закордонного досвіду.

Попри загальну екологічну перевагу залізниці над іншими видами транспорту, її діяльність справляє певний вплив на довкілля. Дизельні локомотиви виробляють значну кількість викидів CO_2 , оксидів азоту та твердих частинок. Дослідження показують, що в Україні рівень забруднення атмосфери від залізничного транспорту є відносно низьким порівняно з автомобільним транспортом [5], проте існує значний потенціал для його подальшого зниження. Перехід на електричну тягу дозволяє скоротити викиди на 60...75% порівняно з дизельною тягою, що узгоджується з європейськими тенденціями розвитку залізничної галузі [4, 11, 12].

Шумове та вібраційне забруднення є ще одним важливим аспектом екологічного впливу залізниці. Підвищений рівень шуму негативно впливає на здоров'я людей, спричиняючи стрес, порушення сну та серцево-судинні захворювання [6]. Ефективними заходами зниження шумового забруднення є будівництво шумозахисних бар'єрів, використання сучасних безшумних рейок та вдосконалення конструкції вагонів. Міжнародний досвід демонструє, що комплексний підхід, який поєднує технологічні інновації з міським плануванням, дає найкращі результати.

Впровадження відновлюваних джерел енергії для живлення залізничної інфраструктури до-

зволяє зменшити залежність від викопного палива. Водневі локомотиви, акумуляторні поїзди та біопаливо розглядаються як перспективні технології для декарбонізації галузі. Використання цифрових технологій та штучного інтелекту для оптимізації графіків руху потягів забезпечує зниження споживання енергії на 10...15% без погіршення якості транспортних послуг [13, 17].

Будівництво та експлуатація залізничних колій призводять до змін у природних екосистемах: фрагментації природних середовищ існування тварин, зміни водних потоків, вирубки лісів. Обслуговування залізничної галузі супроводжується утворенням відходів: використаних мастильних матеріалів, зношених шпал, старих рейок. Перехід на екологічні матеріали та впровадження принципів циркулярної економіки дозволяє значно зменшити цей вплив [2, 6].

Європейський Союз реалізує стратегію зеленої логістики в межах European Green Deal та програми Fit for 55. Основна мета полягає у зменшенні викидів від транспорту на 90% до 2050 року через розвиток зелених вантажних коридорів та мультимодальної інтеграції. Для досягнення цієї мети передбачається збільшення частки залізничних вантажних перевезень: до 2030 року 30% вантажів на відстані понад 300 км має перевозитися залізницею, а до 2050 року – понад 50%. Концепція зелених вантажних коридорів (Green Freight Corridors) забезпечує безшовну мультимодальну інтеграцію з пріоритетом залізничного транспорту для дальніх відстаней, ви-

користанням відновлюваних джерел енергії, цифровим моніторингом вуглецевого сліду та оптимізацією логістичних процесів через штучний інтелект [4, 9].

Франція та Німеччина є піонерами у впровадженні водневих поїздів як елементу зеленої логістики. Компанія Alstom виробляє водневі поїзди Coradia iLint, які працюють на паливних елементах і не виробляють CO₂ у місці експлуатації [17]. У Нідерландах вся національна залізнична мережа країни працює на енергії вітрових електростанцій. Це стало можливим завдяки державній підтримці розвитку відновлюваної енергетики та укладенню довгострокових зелених контрактів між залізничною компанією NS та виробниками вітрової енергії, що є прикладом успішної інтеграції залізниці у циркулярну економіку. Індія впроваджує масштабну програму зеленої залізничної логістики через встановлення сонячних панелей на дахах потягів та залізничних станцій. Велика Британія реалізує проєкт Riding Sunbeams, у межах якого електропоїзди живляться безпосередньо від сонячних панелей, розташованих уздовж залізничних колій.

Швейцарія застосовує систему Smartrail 4.0, яка використовує штучний інтелект для оптимізації зелених логістичних потоків у режимі ре-

ального часу. Система аналізує дані про завантаження мережі, споживання енергії, вуглецевий слід кожного рейсу та автоматично коригує графіки руху для досягнення максимальної ресурсоефективності. Японія впроваджує автоматизовані системи контролю енергоспоживання у швидкісних поїздах Shinkansen, що дозволило зменшити витрати електроенергії на 10...15% та викиди CO₂ на 12%. Китай активно розвиває високошвидкісну залізничну мережу як основу зеленої логістики, яка є найбільшою у світі. До 2035 року країна планує електрифікувати 95% залізничної мережі та інтегрувати її у систему зелених вантажних коридорів [7, 8].

У США залізнична компанія Amtrak запустила програму Net-Zero Emissions 2045, яка є частиною національної стратегії зеленої логістики. Програма передбачає перехід на повністю електричні пасажирські потяги, використання 100% відновлюваної енергії для живлення станцій та інфраструктури, створення зелених логістичних хабів [9, 16].

На основі проведеного моделювання та аналізу міжнародного досвіду сформульовано рекомендації для розвитку української залізничної мережі у короткостроковій, середньостроковій та довгостроковій перспективі (табл. 6).

Таблиця 6

Дорожня карта впровадження зелених технологій для залізниць України

Період	Ключові заходи	Цільові показники	Очікуваний ефект	Інвестиції (млрд грн)
1	2	3	4	5
2026-2027 (Короткостроковий)	Електрифікація коридорів Київ-Львів, Київ-Одеса	Електрифікація +15% (до 60%)	Зниження викидів на 18%	35-40
	Встановлення сонячних панелей на 50 великих станціях	ВДЕ для 15% станційної інфраструктури	Економія 8-10 млн кВт·год/рік	2.5-3.0
	Впровадження IoT-систем моніторингу енергії	100% магістральних ліній	Зниження споживання на 8%	1.2-1.5
2027-2030 (Середньостроковий)	Завершення електрифікації до 75% мережі	Електрифікація 75%	Зниження викидів на 45%	50-55
	Запуск 25 водневих локомотивів	10% тяги на неелектрифікованих лініях	Декарбонізація 10% дизельної тяги	8-10
	Інтеграція ВДЕ 30% в енергобаланс	ВДЕ 30%	Зниження викидів на 15%	18-22
	Системи AI для оптимізації руху	80% пасажирських сполучень	Економія енергії 12%	2.8-3.5
2030-2035 (Довгостроковий)	Повна електрифікація магістралей	Електрифікація 85%	Зниження викидів на 62%	38-45
	Водневий транспорт на всіх неелектрифікованих лініях	100% заміна дизельної тяги	Декарбонізація 15% перевезень	22-28
	ВДЕ 50% в енергобалансі	ВДЕ 50%	Зниження викидів на 25%	32-38

1	2	3	4	5
2035-2040 (Довгостроковий, 2035-2040)	Високошвидкісні зелені коридори	З ВШМ з нульовими викидами	Зниження викидів на 8%	180-220
	Повна декарбонізація	ВДЕ 85%, водень 15%	Досягнення нульових викидів	45-55
	Інтеграція в європейську зелену логістику	Сертифікація ISO 14083	Міжнародна конкурентність	8-12

У короткостроковій перспективі (2024...2027) пріоритетними є завершення електрифікації основних вантажних коридорів, впровадження систем моніторингу енергоспоживання на базі технологій Інтернету речей (IoT), реалізація пілотних проєктів з встановлення сонячних панелей на великих станціях.

У середньостроковій перспективі (2027-2030) необхідно досягти 75% електрифікації залізничної мережі, запустити перші водневі локомотиви на неелектрифікованих гілках, інтегрувати 30% відновлюваних джерел енергії у загальний енергобаланс залізниць, впровадити сис-

теми штучного інтелекту для оптимізації графіків руху.

У довгостроковій перспективі (2030-2040) стратегічною метою є повна декарбонізація залізничного транспорту, створення високошвидкісних зелених коридорів, досягнення європейських стандартів щодо викидів CO₂, інтеграція залізничної мережі України до європейської системи зеленої логістики.

Як результат впровадження цих заходів розроблено прогнозне порівняння екологічних показників залізничного транспорту України з міжнародними стандартами (табл. 7).

Таблиця 7

Порівняння екологічних показників залізничного транспорту України з міжнародними стандартами

Показник	Україна (2024)	Україна (цільовий 2030)	Україна (цільовий 2040)	ЄС (середній)	Нідерланди	Німеччина	Японія
Рівень електрифікації (%)	45	75	95	56	76	61	100
Викиди CO ₂ (г/пас-км)	38	18	3	25	4	18	8
Частка ВДЕ в енергобалансі (%)	12	30	85	42	100	52	28
Енергоспоживання (кВт·год/пас-км)	0,048	0,041	0,035	0,039	0,036	0,038	0,033
Водневі локомотиви (од.)	0	25	180	45	8	95	12
Індекс стійкості GMSL	52	72	82	68	86	74	79

Для реалізації цих рекомендацій необхідна комплексна стратегія, яка включатиме законодавчі ініціативи, зокрема гармонізацію національних стандартів з ISO 14083:2023 та вимогами European Green Deal, встановлення екологічних стандартів для залізничного транспорту, створення фінансових стимулів для впровадження зелених технологій, залучення міжнародних інвестицій та технологічної експертизи.

Наукова новизна і практична значимість

Розроблено удосконалену математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних

типів залізничної тяги, побудовано та досліджено модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту. Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність запропонованих підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії, масове впровадження водневих технологій, інтеграція сонячної енергії, цифровізація управління. Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки. Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, запуск водневих локомоти-

вів та повна декарбонізація до 2040 року. Доведено можливість використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України.

Висновки

Залізничний транспорт має значний екологічний потенціал завдяки своїй енергоефективності та можливості інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. Проте певний вплив на довкілля залишається, зокрема через викиди дизельних локомотивів, шумове забруднення та вплив на екосистеми.

Розроблена математична модель розрахунку викидів CO₂ показує, що електрифікація залізниць з використанням відновлюваних джерел енергії може знизити викиди на 90%, а впровадження водневих локомотивів забезпечує повну декарбонізацію перевезень.

Модель оптимізації енергоспоживання демонструє, що застосування систем штучного інтелекту та цифрового управління дозволяє зменшити споживання енергії на 10-15% без зниження якості транспортних послуг.

Запропонований комплексний індекс стійкості GMSL дозволяє здійснювати інтегральну оцінку екологічних, економічних та соціальних аспектів розвитку залізничної логістики. Порівняльний аналіз шести сценаріїв виявив, що найвища інтегральна стійкість (78.0 балів) досягається при змішаній стратегії, що на 49% вище за базовий сценарій.

Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність таких підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії (Нідерланди), масове впровадження водневих технологій (Німеччина, Франція), інтеграція сонячної енергії (Індія, Велика Британія), цифровізація управління (Швейцарія, Японія).

Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, досягнення 75% електрифікації до 2030 року, інтеграція 30% відновлюваних джерел енергії до 2030 року, запуск водневих локомотивів та повна декарбонізація до 2040 року.

Практична значущість результатів полягає у можливості використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України та оцінки екологічного ефекту від впровадження різних технологічних рішень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ломотько Д. В. «Зелена» логістика, як основа

покращення екологічних показників вантажних мультимодальних перевезень / Ломотько Д. В., Огар О. М., Козодой Д. С., Ломотько М. Д. // Залізничний транспорт України. – 2021. – № 3. – С. 16-28. DOI: 10/34029/2311-4061-2021-140-3-16-28.

2. Бельченко К. С. Екологічна безпека транспортних систем у контексті сталого розвитку. / Бельченко К. С. // Екологія та охорона довкілля. – 2023. – №4. – С. 45-52. URL: https://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/12430/1/BelchenkoKS_KRM_KEOD_w2023.

3. International Energy Agency (IEA). Rail transport and CO₂ emissions. – Paris : IEA, 2022. – URL: <https://www.iea.org>.

4. European Commission. Greening Freight Transport. – Strasbourg : EC, 2023. – COM(2023) 440 final. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0440>.

5. Lomotko, D. et al. Efficiency of “Green” Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. / Lomotko, D., Ohar, O., Kozodoi, D., Barbashyn, V., Lomotko, M. // In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_74.

6. Екологічна безпека залізничного транспорту України // Науковий вісник ЛьвДУВС. – 2020. – № 2. – С. 112-119. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/2945/1/Екологічна%20безпека%20залізничного%20транспорту>.

7. Čižiūnienė K. et al. Assessment of Implementing Green Logistics Principles in Railway Transport: / Čižiūnienė K, Matijošius J, Sokolovskij E, Balevičiūtė J. // The Case of Lithuania. Sustainability. 2024; 16(7):2716. <https://doi.org/10.3390/su16072716>.

8. Chen W. et al. Using Mixed Methods to Identify Evaluation Indicators for Green Railway Transportation Operations in China. / Chen W, Yu Y, Fang X, Yuan Z, Tong S. // Sustainability. 2023; 15(24):16957. <https://doi.org/10.3390/su152416957>.

9. Lawrence, Martha; Bullock, Richard; Moody, Joanna. Unlocking Green Logistics for Development // Mobility and Transport Connectivity Series. World Bank. 2023. <http://hdl.handle.net/10986/40529> License: CC BY 3.0 IGO. <https://doi.org/10.1596/40529>.

10. ISO 14083:2023 – Greenhouse gases // Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14083:ed-1:v1:en>.

11. Deng Shicheng, Wu Yuming. Spatiotemporal evolution and driving factors of urban green technology innovation efficiency in the Chengdu-Chongqing Economic Circle of China // Frontiers in Ecology and Evolution. Volume 11 – 2023. DOI:10.3389/fevo.2023.1234374.

12. Brzeziński M., Pyza D. A Refined Model for Carbon Footprint Estimation in Electric Railway

Transport. Energies. // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – Article 6567. DOI: 10.3390/en16186567.

13. Nicoletti Bernardo, Appolloni Andrea. Green Logistics 5.0: a review of sustainability-oriented innovation with foundation models in logistics // European Journal of Innovation Management. 2024. 27. DOI: 10.1108/EJIM-07-2024-0787.

14. Lomotko Denis. Prospects for the use “green” logistics as a safety factor in multimodal transportation of dangerous goods / Denis Lomotko, Oleksandr Ohar, Dmytro Kozodoi, Vitalii Barbashyn, Mykola Lomotko // AIP Conference Proceedings 31 May 2023; 2684 (1): 020008. <https://doi.org/10.1063/5.0120066>.

15. International Energy Agency (IEA). Renewable Energy Integration in Railway Systems. – 2024 <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.

16. International Union of Railways (UIC). Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Railway Transport.

https://uic.org/IMG/pdf/carbon_footprint_of_railway_in_frastructure.pdf.

17. Alstom Transport. Alstom Coradia iLint: World's First Hydrogen Passenger Train. – 2023 <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>.

18. Декарбонізація української енергетики (економіки): вплив російської агресії, амбітні цілі та потенційні можливості для України в післявоєнний період. // Інформаційно-аналітична доповідь. Київ, 2022. <https://razumkov.org.ua/images/2022/10/26/2022-Decarbonisation.pdf>.

Надійшла в редколегію 09.09.2025

Прийнята до друку 06.11.2025

D. LOMOTKO, D. ARSENENKO, M. LOMOTKO, K. VLASENKO

GREEN LOGISTICS IN RAILWAY TRANSPORT: MODELING ENVIRONMENTAL ASPECTS AND SUSTAINABLE SOLUTIONS

The purpose of the research is to develop mathematical models for assessing the green aspects of railway logistics and identifying optimal sustainable solutions to minimize the carbon footprint and increase resource efficiency in the context of a circular economy. **Methodology.** The article examines the concept of green logistics in railway transport through the prism of environmental, economic and social aspects of sustainable development. The calculation of the carbon footprint of rail logistics is based on the ISO 14083:2023 standard and the concept of green logistics. **The results.** According to the green logistics methodology, the full carbon footprint includes not only direct emissions from operation, but also indirect emissions from energy production, infrastructure construction and waste management. Mathematical models have been developed to calculate the carbon footprint of rail transport and optimize energy consumption taking into account the principles of the circular economy. A comprehensive green sustainability index for rail logistics, GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics), which integrates indicators of decarbonization, resource efficiency and social responsibility, has been proposed. The modeling results demonstrate that the implementation of green logistics principles through electrification with renewable energy sources can reduce CO₂ emissions by 90%, and the use of hydrogen locomotives ensures complete decarbonization of transportation. A comparative analysis of six scenarios for the development of green railway logistics for Ukraine was conducted, which revealed that the highest integrated sustainability is achieved with a mixed strategy that includes multimodal integration, green freight corridors and digital transformation. **Scientific novelty.** An improved mathematical model for calculating the carbon footprint for different types of railway traction was developed, a model for optimizing rail transport energy consumption was built and studied. An analysis of international experience showed the effectiveness of the proposed approaches as a complete transition to renewable energy sources (Netherlands), mass implementation of hydrogen technologies (Germany, France), integration of solar energy (India, Great Britain), digitalization of management (Switzerland, Japan). A comprehensive index of green sustainability of railway logistics with the integration of circular economy principles was proposed. **Practical significance.** A phased strategy is recommended for Ukraine: completion of electrification of main corridors by 2027, achievement of 75% electrification by 2030, integration of 30% renewable energy sources by 2030, launch of hydrogen locomotives and full decarbonization by 2040. The possibility of using the developed models to justify investment decisions on the modernization of the railway network of Ukraine and to assess the environmental effect of the implementation of various technological solutions is proven.

Keywords: green logistics, rail transport, decarbonization, circular economy, green freight corridors, multimodal transportation, carbon footprint, digital transformation of logistics.

УДК 656.212.5

О. В. КЛИГА^{1*}

¹Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта: aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X

ОБЛАСТЬ ДОПУСТИМИХ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ В СТОХАСТИЧНИХ УМОВАХ

Мета. Метою цього дослідження є встановлення зв'язків між режимами гальмування відчепів на сортувальних гірках та параметрами випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів. **Методика.** Дослідження у цій роботі виконані на підставі використання методів теорії експлуатації залізниць, математичної статистики та імітаційного моделювання. **Результати.** Незважаючи на тривалу історію досліджень гіркових процесів та наявність значного обсягу даних натурних спостережень та експериментів по визначенню параметрів розподілу випадкових величин характеристик вагонів існує прогалина в наукових методах оцінки впливу режимів гальмування відчепів на параметри розподілу випадкових величин швидкості та скочування відчепів. Розробка таких методів суттєво спростить вирішення прикладної задачі пошуку безпечних режимів розформування составів в залежності від технічного оснащення гірок. Визначення випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів у дослідженні виконується на підставі результатів серії імітаційних експериментів, що обробляються методами математичної статистики. Допустимі режими гальмування відчепів формують замкнену область. Встановлено, що залежності математичного очікування швидкості та часу скочування на межах області допустимих режимів представляються s-подібними кривими. Така форма залежностей пов'язана з обмеженими можливостями гальмових позицій керувати швидкістю скочування відчепів. Залежності середнього квадратичного відхилення швидкості та часу скочування від режимів гальмування мають складну немонотонну форму. Така форма залежності є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа. В роботі представлено алгоритми пошуку вершин області допустимих режимів гальмування на підставі даних обчислювальних експериментів. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у тому, що в ній удосконалено метод побудови областей допустимих режимів скочування відчепів. На відміну від попередніх методів у цій роботі оцінка виконання вимог регулювання скочування відчепів здійснюється із заданою статистичною надійністю. **Практична значимість.** Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

Ключові слова: залізничний транспорт, вантажні перевезення, сортувальна станція, сортувальна гірка, математичне моделювання

Вступ

Сортувальні гірки є ключовим елементом сортувальних станцій. Вони відіграють критичну роль в ефективному функціонуванні залізничного транспорту, забезпечуючи формування та розформування вантажних поїздів. Від продуктивності, безпеки та надійності роботи гіркових комплексів безпосередньо залежить загальна пропускна спроможність залізничної мережі та швидкість доставки вантажів.

Незважаючи на значний технологічний прогрес, функціонування сортувальних гірок в Україні та багатьох країнах світу стикається з низкою системних проблем. Сучасні умови характеризуються значним зменшенням обсягів їх роботи на мережі в цілому та водночас необхідністю інтенсифікації роботи на опорних станціях. Застарілі технічні системи автоматизації та

механізації сортування вагонів, а також використання башмачного гальмування підвищує ризики пошкодження вантажів та вагонів, а також травмування персоналу. В таких умовах на перший план виходять питання безпеки сортувального процесу.

Процес керованого скочування відчепів на сортувальних гірках є ключовим елементом розформування поїздів. Він пов'язаний з рухом великих за масою груп вагонів під дією сили тяжіння. На гірках традиційної конструкції можливість керування цим рухом обмежена гальмовими позиціями. Складність процесу керованого скочування пов'язана з відсутністю повної інформації про ходові характеристики відчепів та умови їх скочування. Незважаючи на тривалу історію досліджень гіркових процесів та наявність значного обсягу даних натурних спостережень та експериментів по визначенню параметрів

розподілу випадкових величин характеристик вагонів існує прогалина в наукових методах оцінки впливу режимів гальмування відцепів на параметри розподілу випадкових величин швидкості та скочування відцепів. Розробка таких методів суттєво спростить вирішення прикладної задачі пошуку безпечних режимів розформування составів в залежності від технічного оснащення гірок. Тому тема наукової статті є актуальною.

Мета

Метою цього дослідження є встановлення зв'язків між режимами гальмування відцепів на сортувальних гірках та параметрами випадкових величин швидкості та часу скочування відцепів.

Методика

Розформування-формування составів поїздів та маневрових передач є однією з основних маневрових операцій на залізничному транспорті. Для її інтенсифікації з кінця 19-го сторіччя використовують сортувальні гірки. Протягом 20-го сторіччя наукові дослідження були переважно спрямовані на розвиток методів проектування сортувальних гірок. Значний обсяг спостережень та експериментів, проведених для визначення опорів руху, був покладений в основу галузевих будівельних норм, що встановлюють вимоги до проектування сортувальних пристроїв залізниць [1].

Основним методом оцінки проектних рішень при цьому є математичне моделювання гіркових процесів. При вирішенні задач проектування параметри, що характеризують ходові характеристики розрахункових відцепів, їх сполучень та умови навколишнього середовища обираються несприятливими і вважаються точно відомими. Таким чином, вирішення задачі моделювання керуемого скочування відцепів при проектуванні здійснюється у детермінованій постановці.

В рамках вирішення задач проектування сортувальних гірок було розроблено методи моделювання скочування відцепів, що ґрунтуються на вирішенні диференціального рівняння руху [2] у яких незалежною змінною є шлях

$$ds = \frac{v dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{ск}(v) - w_{св}(v) - b_r(s)) \cdot 10^{-3}} \quad (1)$$

w_0 – основний питомий опір руху вагона;

$w_{ск}$ – питомий опір руху вагона від стрілок і кривих;

$w_{св}$ – питомий опір руху вагона від середовища та вітру;

b_r – питомий опір гальмових засобів;

i – ухил колії.

Також були розроблені та перевірені на адекватність методи визначення опорів руху вагонів.

В цілому такий підхід відзначається високою надійністю прийнятих проектних рішень та відносною простотою їх отримання, що забезпечує його широке застосування у всьому світі.

На сьогодні відомі методи аналітичного вирішення рівняння руху відчепа [3]. Однак вони мають виключно теоретичне значення і їх використання суттєво обмежено. В практичних задачах вирішення рівняння (1) виконується чисельними методами в ході комп'ютерного моделювання скочування відцепів [4-8]. У порівнянні з аналітичним методом такий підхід вимагає виконання значно більшого обсягу обчислень і є досить витратним за часом отримання рішення.

Задачі, що вирішуються під час експлуатації сортувальних гірок, суттєво відрізняються від задач проектування. При їх вирішенні основна увага приділяється питанням безпеки та економічності процесу розформування поїздів [9-11]. Тому урахування стохастичного характеру процесу скочування відцепів стає критично важливим.

Вирішення проблеми моделювання скочування відцепів в умовах відсутності точної інформації про ходові характеристики відцепів та неточної реалізації уповільнювачами заданих режимів гальмування ґрунтується на декількох підходах.

Перший підхід ґрунтується на обладнанні гіркових комплексів системами, що забезпечують уточнення інформації у реальному часі [12-14] та системами автоматичного управління уповільнювачами. Перевага такого підходу полягає у тому, що уточнена інформація дозволяє приймати рішення, які за своєю якістю наближаються до рішень, що можуть бути отримані при вирішенні задачі у детермінованій постановці. Недоліки пов'язані з високою вартістю впровадження та експлуатації подібних систем, а також обмежені можливості уточнення інформації до початку скочування відцепів.

Другий підхід ґрунтується на приведенні стохастичної задачі керуемого скочування відцепів до детермінованої постановки шляхом заміни випадкових величин їх розрахунковими значеннями. Для урахування відхилень процесу від очікуваного рішення воно передбачає резерви, що нівелюють вплив випадкових факторів [15]. Перевагою цього підходу є відносна

простота отримання рішень, однак вони можуть суттєво відрізнятись від оптимальних.

Третій підхід ґрунтується на вирішенні задачі керуемого скочування відчепів у стохастичній постановці [16, 17]. Такий підхід дозволяє отримувати оптимальні рішення відповідно до якості наявної інформації про ходові характеристики відчепів і умови їх скочування. Однак він ґрунтується на методах прямого пошуку та виконанні багаточисельних обчислювальних експериментів для визначення параметрів розподілу випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів. Через це такий підхід залишається громіздким та мало придатним для вирішення задач управління реального часу.

На сортувальних гірках крупних станцій з балковими уповільнювачами гальмування відчепів здійснюється на трьох гальмових позиціях. Будемо називати вектор $\mathbf{V}=\{v_1, v_2, v_3\}$ (тут v_1, v_2, v_3 – швидкості виходу відчепа з першої (ГП1), другої (ГП2) та третьої (ГП3) гальмівних позицій) режимом гальмування відчепа.

Позначимо комплекс показників, що характеризують результати керованого скочування відчепів

$$\mathbf{P} = \{\bar{v}(x), \bar{t}(x), \sigma_v(x), \sigma_t(x), P_v, P_d, \Delta_l\}, \quad (2)$$

де x – відстань скочування відчепа від вершини гірки;

$\bar{v}(x), \bar{t}(x)$ – залежності математичного очікування швидкості у м/с та часу у секундах скочування відчепів від відстані скочування у м;

$\sigma_v(x), \sigma_t(x)$ – залежності середнього квадратичного відхилення швидкості у м/с та часу у секундах скочування відчепів від відстані скочування у м;

P_v – імовірність перевищення встановленої швидкості підходу відчепа до вагонів на сортувальній колії;

P_d – імовірність зупинки вагона на стрілочній горловині;

Δ_l – математичне очікування відстані між точною зупинки відчепа і точкою прицілювання, м.

Виходячи з необхідності подолання обчислювальної громіздкості стохастичного підходу, у цьому дослідженні висунуто гіпотезу про те, що показники сортувального процесу можуть бути описані гладкими неперервними функціями від режимів гальмування

$$\mathbf{P}=\mathbf{F}(\mathbf{V}). \quad (3)$$

Це дозволяє обмежити кількість моделювань скочувань відчепів та встановлювати значення

показників сортувального процесу методами функціональної апроксимації.

Для побудови ефективних оптимізаційних алгоритмів необхідно скоротити обсяги затратних за часом обчислювальних експериментів по скочуванню відчепів. Цим пояснюється важливість досліджень, спрямованих на зменшення розмірності задачі. Дослідження, представлені у роботі [18], показують, що, при детермінованому підході, допустимі режими скочування відчепів можуть бути представлені у вигляді області допустимих режимів

$$\mathbf{V}=\{v_1, v_2\}$$

графічним зображенням якої є багатокутник $\mathbf{D}_{det}$ на площині (v_3 не враховується через залежність від v_1 та v_2). При цьому встановлено, що оптимальні режими можуть знаходитись лише на межі області допустимих режимів. Тому у детермінованій постановці задача вибору режиму гальмування може бути зведена до одномірної задачі оптимізації режиму, що знаходиться на межі області $\mathbf{D}_{det}$.

Дослідження області допустимих режимів скочування відчепів для стохастичних умов $\mathbf{D}_{st}$ виконано в [16]. Встановлено особливості області $\mathbf{D}_{st}$ у порівнянні з $\mathbf{D}_{det}$, що полягає у наявності двох підобластей $\mathbf{D}_{st1}$ та $\mathbf{D}_{st2}$. В підобласті $\mathbf{D}_{st1}$ величина Δ_l не залежить від режиму $\mathbf{V}$, а $\mathbf{D}_{st2}$ залежить від нього. Як наслідок в [16] запропоновано використовувати різні критерії оптимальності для режимів підобластей $\mathbf{D}_{st1}$ та $\mathbf{D}_{st2}$. Виходячи із результатів досліджень [18] в цій роботі увага буде сконцентрована на вивченні межі вказаних підобластей.

Слід зазначити, що як у випадку детермінованого так і у випадку стохастичного підходу до вирішення задачі керуемого скочування відчепів область допустимих режимів гальмування використовується лише для ідентифікації ділянки межі, вздовж якої встановлюються режими гальмування для моделювання скочування відчепів при вирішенні оптимізаційних задач. Такий процес є затратним у часі. Враховуючи, що одні і ті ж режими гальмування викликають однакову зміну показників, що характеризують процес скочування, то можливим підходом до удосконалення методики моделювання скочування відчепів є попереднє встановлення аналітичних залежностей цих показників від режимів гальмування.

В цілому виконаний огляд еволюції існуючих методів моделювання скочування відчепів від детермінованих задач проєктування до стохастичних задач експлуатації, виявив що

головним обмеженням для розробки ефективних алгоритмів вибору режимів гальмування є обчислювальна громіздкість існуючих методів оцінки показників регульованого скочування відцепів. Це обґрунтовує необхідність розробки нової, менш витратної, методики на основі функціональної апроксимації.

Результати

За відсутності точної інформації про ходові характеристики відцепів та умови їх скочування, а також при неточній реалізації гальмовими уповільнювачами заданих режимів гальмування показники процесу скочування відцепів, що формують вектор $\mathbf{P}$ є випадковими величинами. Оцінка параметрів цих випадкових величин здійснюється на підставі серій імітаційних експериментів. Прийнято, що імовірність появи подій, що призводять до появи економічних збитків не повинна перевищувати 0,005, інших небажаних подій - 0,1. За таких умов кількість експериментів, які необхідно виконати для того, щоб стверджувати, що якщо під їх час подія не трапилася жодного разу, її імовірність з надійністю 0,95 не перевищує 0,005 визначається за виразом

$$N \geq \frac{\ln(1 - 0,95)}{\ln(1 - 0,005)}$$

і складає 598 експериментів.

Межа, яка дозволяє стверджувати що, якщо у N експериментах подія трапилася $k_{кр}$ разів, то її імовірність не буде перевищувати 0,1 встановлюється із виразу

$$0,1 \geq \frac{k_{кр}}{N} + Z_{0,95} \sqrt{\frac{k_{кр}(N - k_{кр})}{N^3}}$$

Для $N=598$ експериментів $k_{кр}=46$.

Обмеження швидкості руху відцепів по маршруту пов'язані із обмеженнями допустимої швидкості входу відцепів на гальмові позиції, з забезпеченням прицільного регулювання швидкості підходу відцепів до вагонів на сортувальних коліях $v_{прц}$, з необхідністю звільнення відцепом гірки. Перевищення відцепом встановленої швидкості входу на гальмові позиції є небажаною подією так як може призводити до прискореного зносу вагонів та уповільнювачів. Прийнято, що імовірність появи такої події не повинна перевищувати 0,1, а кількість сценаріїв із порушеннями цієї вимоги не повинна перевищувати $k_{кр,1}=46$. Перевищення відцепом встановленої ПТЕ швидкості підходу по вагонів 5 км/год (1,39 м/с) викликає прискорений знос вагонів і є

небажаною подією. Прийнято, що імовірність появи такої події не повинна перевищувати 0,1. Розрахунок розміщення та кріплення вантажів, конструкції поглинаючих апаратів здійснюється з умови, що швидкість зіткнення не перевищує 10 км/год (2,78 м/с). Прийнято, що імовірність порушення цієї вимоги повинна бути не більше 0,005. Умови прицільного регулювання швидкості скочування відцепів вважаються виконаними, якщо у жодному із сценаріїв не спостерігалась $v_{прц} > 2,78$ м/с ($k_{кр,2}=0$), а кількість сценаріїв із $v_{прц} > 1,39$ м/с не перевищує $k_{кр,3}=46$. Зупинка вагонів у зоні скочування до виходу з паркової гальмової позиції викликає економічні втрати, пов'язані з зупинкою розпуску і виконанням додаткової маневрової роботи. Прийнято, що імовірність появи таких подій повинна бути не більше 0,005, а сценаріїв з такими зупинками не повинно бути ($k_{кр,4}=0$).

В результаті обмеження режимів гальмування відцепів приймають вигляд:

$$\sum_{i=1}^{598} 1_{(v_{сп}(x)_i > v_{доп}(x))} (v_{рг}) = k_{кр,b}, v_{рг} \rightarrow \max, \text{ або } \sum_{i=1}^{598} 1_{(l_{сп,i} < l_{доп})} (v_{рг}) = k_{кр,b}, v_{рг} \rightarrow \min,$$

де $v_{сп}(x)_i$ - швидкість скочування відчепа у точці x_b , що спостерігається у i -му досліді;

$v_{доп}(x_b)$ - максимально допустима швидкість скочування відчепа у точці x_b ;

$l_{сп,i}$ - відстань скочування відчепа, що спостерігається у i -му досліді;

$l_{доп}$ - мінімально допустима відстань скочування відчепа;

$v_{рг}$ - швидкість виходу відчепа із регулюємої гальмової позиції.

Кожен обчислювальний експеримент реалізує окремий сценарій руху відчепа з встановленими значеннями випадкових характеристик. Такий відцеп будемо називати реплікою. Оцінки показників вектора $\mathbf{P}$ визначаються на підставі статистичної обробки даних сценаріїв. Принципи моделювання скочування відцепів в умовах дії випадкових факторів представлено в роботі [17].

Факторами, що формують обмеження області допустимих режимів, є потужності гальмових позицій по маршруту скочування, допустима швидкість входу відчепа на гальмові позиції, максимально можлива та мінімально допустима швидкість руху відчепа. Детальні дослідження обмежень області $\mathbf{D}_{det}$ виконані в роботі Бобровського на ін. [19]. Згідно з ними детермінована область допустимих режимів скочування відцепів $\mathbf{D}_{det}$ являє собою криволінійний

багатокутник з максимальною кількістю вершин 6. В залежності від параметрів відчепа і умов скокування кількість вершин у багатокутнику може зменшуватись аж до виродження у точку. Область D_{st} має таку ж конфігурацію [16]. Для порівняння режимів гальмування V та V^* будемо використовувати принцип лексикографічного упорядкування так, що вважається

$$V > V^*, \quad (4)$$

якщо виконуються умови

$$v_1 > v_1^*, \text{ або } v_1 = v_1^* \text{ та } v_2 > v_2^*, \\ \text{або } v_1 = v_1^* \text{ та } v_2 = v_2^* \text{ та } v_3 > v_3^*.$$

Для аналізу впливу режимів гальмування відчепів на показники вектору P встановленні залежності швидкості та часу його скокування від швидкості виходу з ГП1. ГП1 не впливає на умови руху на частині маршруту від точки відриву до входу відчепа на цю позицію. Максимальна та мінімальна можлива швидкість руху по маршруту після ГП1 досягається відповідно при скокуванні відчепа через неї без гальмування та з повним використанням її гальмової потужності. Для прикладу на рис. 1 наведено залежності математичного очікування та середнього квадратичного відхилення швидкості входу відчепа на ГП2 від заданої швидкості виходу відчепа з ГП1:

$$\bar{v}_{ГП2п} = f_1(v_{ГП1к}), \quad (5)$$

$$\sigma_{v,ГП2п} = f_2(v_{ГП1к}). \quad (6)$$

Залежність (5) являє собою гладку функцію і має чітку s-подібну форму. Вона складається із трьох ділянок. Така форма пояснюється можливістю ГП1 керувати швидкістю скокування відчепів.

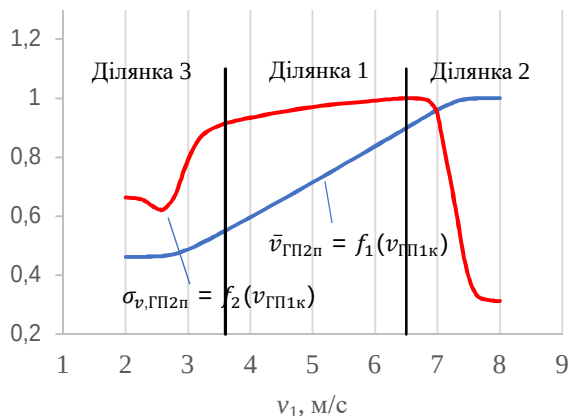


Рис. 1. Залежність математичного очікування та середнього квадратичного відхилення

швидкості входу відчепа на ГП2 від заданої швидкості його виходу з ГП1

Для пояснення форми залежності (5) на рис. 2 наведено зміну частки керованих реплік в залежності від $v_{ГП1к}$. При цьому некерованими вважаються репліки, що скокуються без гальмування, або з гальмуванням повною потужністю ГП1. В межах першої ділянки $\bar{v}_{ГП2п}$ змінюється пропорційно $v_{ГП1к}$. Ця ділянка відповідає робочому діапазону, де усі репліки є керованими і ГП1 може гнучко змінювати режими гальмування в умовах впливу випадкових факторів. В межах ділянки 2 із збільшенням $v_{ГП1к}$ величина $\bar{v}_{ГП2п}$ досягає свого максимуму формуючи верхнє плато. Така форма залежності пояснюється обмеженими фізичними можливостями набору швидкості відчепом.

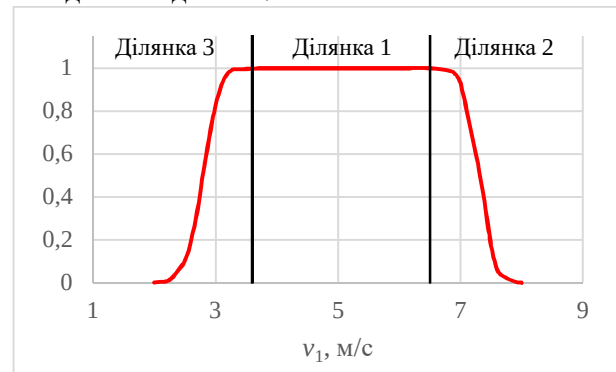


Рис. 2. Залежність частки керованих реплік від заданої швидкості виходу відчепа з ГП1

Як наслідок, при збільшенні величини $v_{ГП1к}$ все менша частина реплік відчепа потребує гальмування, що призводить до втрати керованості процесом. Максимум $\bar{v}_{ГП2п}$ відповідає скокуванню усіх реплік без гальмування. В межах ділянки 3 із зменшенням $v_{ГП1к}$ величина $\bar{v}_{ГП2п}$ досягає свого мінімуму формуючи нижнє плато. Це пояснюється обмеженням гальмової потужності ГП1. В результаті, при зменшенні величини $v_{ГП1к}$ все більша частина реплік відчепа потребує повного гальмування, що також призводить до втрати керованості процесу скокування відчепа. Мінімум $\bar{v}_{ГП2п}$ відповідає скокуванню усіх реплік з гальмуванням повною потужністю ГП1.

Середнє квадратичне відхилення швидкості входу відчепа на ГП2 в межах ділянки 1 змінюється монотонно і має тенденцію до зростання при збільшенні $v_{ГП1к}$. Це пояснюється сполученням випадкових відхилень опору гальмових уповільнювачів та погано прогнозованого опору середовища та вітру у загальній величині опору руху. При цьому величина останнього пропорційна квадрату відносної швидкості відчепа та

вітру. Для ділянок 2 та ділянок 3 характерна складна, немонотонна та змінна поведінка залежності (6). Така форма залежності пов'язана є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа.

Зміна математичного очікування $\bar{t}_{\text{ГП2п}}$ та середнього квадратичного відхилення $\sigma_{t, \text{ГП2п}}$ часу скочування відчепів описується залежностями, що є оберненими до (5) та (6) як показано на рис. 3.

В таких умовах, встановлення єдиної функціональної залежності, що описує зміну параметрів вектору **P**, незважаючи на їх гладкість і неперервність, є недоцільним і може призвести до значної похибки в розрахунках при оцінці області **D_{st}**.

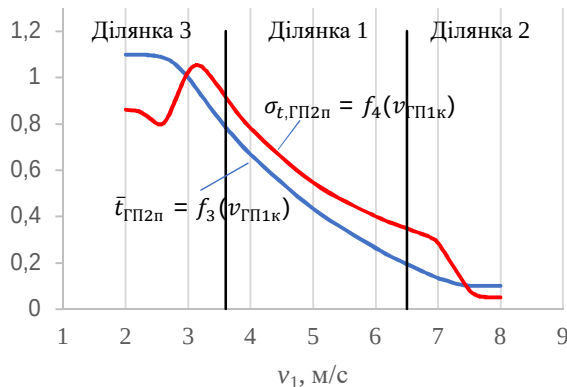


Рис. 3. Залежність математичного очікування та середнього квадратичного відхилення часу скочування відчепів до другої гальмової позиції від заданої швидкості його виходу з першої гальмової позиції

Тому задання функцій (3) буде виконуватись табличним способом з подальшим застосуванням інтерполяції для встановлення значень, які відповідають проміжним точкам області **D_{st}**. Такий опис області **D_{st}** робить недоцільним попереднє встановлення усіх її меж. Зменшення витрат обчислювальних ресурсів може бути досягнуто за рахунок доповнення обмежень області **D_{st}** в міру необхідності.

Побудова області **D_{st}** здійснюється покроково. В процесі побудови виконується ряд формальних процедур.

По-перше, виконується перевірка існування області **D_{st}**. Цей крок є неов'язковим так як існування області **D_{st}** перевіряється на етапі проєктування. Однак, область допустимих режимів **D_{st}** може не існувати у випадку несправності технічних засобів та при невідповідності відчепів, або умов скочування умовам проєктування

сортувальної гірки. Для перевірки існування області **D_{st}** виконується моделювання скочування відчепів без гальмування та при максимальному гальмуванні на ГП1 та ГП2. Умовами існування області **D_{st}** є

- відсутність випадків зупинки реплік відчепа у зоні скочування при русі без гальмування;

- відсутність випадків, коли застосування повної гальмової потужності ГП1 та ГП2 було недостатньо для зупинки реплік відчепа на ГП2;

- кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП2 при використанні повної гальмової потужності ГП1 не перевищує $k_{\text{кр},1}$.

Характерними режимами скочування відчепів, оцінка параметрів яких є необхідною для визначення існування можливості розформування состава без перерв у розпуску є швидкий (Ш) та повільний (П) режими скочування.

Швидкий режим є максимально можливим відповідно до визначення (4). Він забезпечує найшвидше звільнення відчепом стрілочної зони за рахунок найбільш пізнього гальмування. Алгоритм ідентифікації швидкого режиму скочування побудований на послідовному каскадному принципі, коли кожен наступний етап враховує обмеження попереднього.

Максимальна швидкість виходу відчепа з ГП1 відповідає скочуванню відчепа без гальмування. Ця швидкість обмежена допустимою швидкістю входу відчепа на ГП2 та потужністю ГП2 та ГП3. Якщо при скочуванні відчепа без гальмування на ГП1 кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП2 не перевищує $k_{\text{кр},1}$, то приймається режим без гальмування. Інакше методом Брента [20] здійснюється пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП1, при якому кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП2 складає рівно $k_{\text{кр},1}$. Позначимо максимальну швидкість виходу відчепа з ГП1, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП2 як $v_{\text{ГП1-ГП2}}$.

ГП1 спільно з ГП2 повинні забезпечувати допустиму швидкість входу на ГП3. Якщо при встановленій швидкості $v_1 = v_{\text{ГП1-ГП2}}$ і при скочуванні відчепа без гальмування на ГП2 кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП3 не перевищує $k_{\text{кр},1}$, то обирається цей режим. В іншому разі виконується скочування при $v_1 = v_{\text{ГП1-ГП2}}$ та гальмуванні відчепа на ГП2 повною потужністю уповільнювача. Якщо при такому режимі кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 перевищує $k_{\text{кр},1}$, то необхідно знайти таку швидкість

виходу відчепа з ГП1, за якої при повному гальмуванні на ГП2 кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 становитиме рівно $k_{кр}$. Інакше при $v_1 = v_{ГП1-ГП2}$ здійснюється пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 становить рівно $k_{кр,1}$. Позначимо максимальну швидкість виходу відчепа з ГП1, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП2 та ГП3 як $v_{ГП1-ГП3}$, а максимальну швидкість виходу відчепа з ГП2, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП3 як $v_{ГП2-ГП3}$.

ГП1, ГП2 та ГП3 спільно повинні забезпечувати підхід відчепа до вагонів на сортувальних коліях із допустимою швидкістю. При цьому перевищення встановленої ПТЕ швидкості $v_{прц}=1,39$ м/с не повинна перевищувати $k_{кр,3}$, а швидкості $2v_{прц}=2,78$ м/с не повинна перевищувати $k_{кр,2}$. Пошук необхідного режиму полягає у встановленні максимально допустимих швидкостей виходу відчепа із гальмових позицій, які задовольняють цим вимогам. Якщо при скочуванні відчепа при встановлених швидкостях $v_{ГП1-ГП3}$ та $v_{ГП2-ГП3}$ та використанні повної гальмової потужності ГП3 кількість випадків порушення умов прицільного гальмування не перевищує допустимих значень, то приймається режим $v_{ГП1-ГП3}$ та $v_{ГП2-ГП3}$. Інакше, якщо при скочуванні відчепа при встановленій швидкості $v_{ГП1-ГП3}$ та при гальмування відчепа повною гальмовою потужністю на ГП2 та ГП3 кількість випадків порушення умов прицільного гальмування не перевищує допустимих значень, то виконується пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП2 при $v_{ГП1-ГП3}$ та при використанні повної гальмової потужності ГП3, коли кількість порушень умов прицільного гальмування становить рівно $k_{кр}$. Інакше, виконується пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП1 та при використанні повної гальмової потужності ГП2 та ГП3, коли кількість порушень умов прицільного гальмування становить рівно $k_{кр,2}$ та $k_{кр,3}$.

Повільний режим скочування (П) є мінімально можливим відповідно до визначення (4). Він забезпечує найбільші інтервали з попередніми відчепами за рахунок найбільш раннього гальмування. Алгоритм ідентифікації повільного режиму скочування також побудований на послідовному каскадному принципі.

Мінімальні швидкості виходу відцепів з гальмових позицій обмежені умовою звільнення ними зони скочування. Мінімально можлива швидкість виходу відчепа з ГП1 відповідає скочуванню відчепа з гальмуванням повною

потужністю цієї позиції. Виходячи з умови існування області D_{st} , потужності другої гальмової позиції достатньо для зупинки на ній відчепа. Тому методом Брента здійснюється пошук такої найменшої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій у серії розрахункових експериментів не спостерігається жодного випадку зупинки відцепів у зоні скочування ($k_{кр,4}=0$).

Недоліком повільного режиму є різке погіршення показників прицільного регулювання швидкості скочування відцепів. Через це більш привабливим є використання найбільш повільного режиму підобласті D_{st1} (ПР). При цьому методом Брента здійснюється пошук такої найменшої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій у серії розрахункових експериментів кількість перевищення встановлених швидкостей підходу відцепів до вагонів на сортувальних коліях становить $k_{кр,2}=0$, $k_{кр,3}=46$.

Ідентифікація інших вершин області D_{st} здійснюється аналогічним чином за необхідності. Межі області допустимих режимів гальмування відцепів встановлюються шляхом поєднання суміжних вершин. Для урахування можливої нелінійності меж області D_{st} застосовується метод Брента. Приклад області D_{st} наведено на рис. 4.

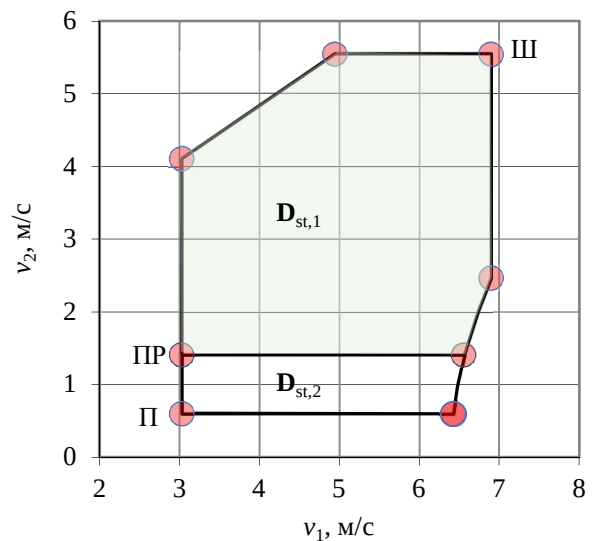


Рис. 4. Область допустимих режимів скочування відчепа для стохастичних умов

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у тому, що в ній удосконалено метод побудови областей допустимих режимів скочування відцепів. На відміну від попередніх методів у цій роботі оцінка виконання вимог регулювання скочування відцепів здійснюється із заданою статистичною

надійністію.

Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

Висновки

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Сучасні умови експлуатації залізничної мережі вимагають інтенсифікації процесів розформування-формування поїздів на опорних станціях на тлі загального скорочення обсягів роботи. Попри значний масив емпіричних даних, досі бракувало науково обґрунтованих методів, які б кількісно оцінювали вплив режимів гальмування на статистичні параметри руху відчепів, що робить розробку методів оцінки стохастичних процесів на гірках критично важливою для безпеки та ефективності.

2. За відсутності точної інформації про ходові властивості відчепів та умови їх скочування оцінку виконання вимог, що накладаються на режими гальмування відчепів запропоновано виконувати на підставі серії із 598 експериментів, що дозволяє забезпечувати надійність висновків 0,95. Якщо порушення вимог регулювання швидкості скочування відчепів є лише небажаними подіями, то їх поява допускається із імовірністю не більше ніж 0,1, що відповідає 46 випадкам появи у серії обчислювальних експериментів. Якщо негативні наслідки порушення вимог регулювання швидкості скочування відчепів викликають економічні збитки, то їх поява допускається із імовірністю не більше ніж 0,005. Такі випадки не повинні спостерігатись у жодному обчислювальному експерименті в серії.

3. На основі імітаційного моделювання встановлено, що залежності математичного очікування швидкості та часу скочування від режимів гальмування на межах області D_{st} мають s-подібну форму. Така форма залежностей пов'язана з обмеженими можливостями гальмових позицій керувати швидкістю скочування відчепів. Залежності середнього квадратичного відхилення швидкості та часу скочування від режимів гальмування мають складну немонотонну форму. Така форма залежності є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа.

4. Розроблено алгоритм ідентифікації вершин та обмежень області допустимих режимів скочування відчепів. Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють

підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сортивальні пристрої залізниць. Норми проектування. ГБН В.2.3-37472062-1:2012: Схвалено: рішенням Мінрегіонбуду України 11.09.2012 р. № 140. – Київ, 2012.
2. Бобровський В. І., Дорош А. С., Демченко Є. Б. Імітаційна модель процесу розпуску составів на сортувальних гірках. *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2015. , № 49(1158). С. 94–98.
3. Жуковичський І.В. Розв'язання диференціального рівняння вільного скочування відчепа з гірки. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 1997. № 4. С. 14–17..
4. Meng L. J., Zhang C. Computer Implementation of Hump Checking. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 584-586. P. 1913–1916. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1913>
5. Mathematical model for defining rational constructional technological parameters of marshalling equipment used during gravitational target braking of retarders / M. Mezitis et al. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 288–296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.137>.
6. Moczariski J. Modeling and Simulation in the Research of Automatic Wagon Shunting Control Systems. *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means 2020, Part 1*, Kaunas, 30 September – 2 October 2020. Kaunas, 2020. P. 81–84.
7. A method of complex calculation of rational structural parameters of railway humps / S. Panchenko et al. *Acta Polytechnica*. 2018. Vol. 58, no. 6. P. 370–377. URL: <https://doi.org/10.14311/ap.2018.58.0370>
8. Zhang H., Yang J., Yang T. Multiobjective Optimization Model for Profile Design of Hump Distributing Zone. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/9318025>
9. Козаченко, Д. М. Моделювання скочування відчепа як динамічної системи взаємопов'язаних вагонів. *Зб. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. т-ту*. 2009. № 20. С. 5–15.
10. Using the New Car Braking Systems in Marshalling Yards / O. Ohar et al. *ICTE in Transportation and Logistics 2019*. Cham, 2020. P. 203–210. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_27
11. Evaluation of the railway traffic safety level using the additive resultant indicator / O. Ohar et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, №. 3 (90). P. 48–57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119237>
12. Sasor, M., Wydrych, J. Using fuzzy logic in order to determinate cut's out speed from wagon retarder-practical experiments. *Transport System Telematics*, Katowice-Ustron, 4–6 November 2004. Zeszyty Naukowe. Transport, 2004. P. 375–380.

13. Zarecky, S., Grun, J., Zilka, J. The newest trends in marshalling yards automation. *Transport Problems*, 2008, №3(4), 87–95.

14. Analysis of hump automation in China. / C. Zhang et al. *Proceedings of the Second International Conference on Transportation and Traffic Studies*, Beijing, 31 July – 2 August 2000. 2000. P. 285–290. URL: [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)45](https://doi.org/10.1061/40503(277)45)

15. Бобровський В. І., Кудряшов А. В. Оптимізація режимів розформування составів на сортувальних гірках. *Наука та прогрес транспорту*. 2010. №. 32. P.224–229. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13436>

16. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the gravity humps / V. Bobrovskyi et al. *Transport Problems*. 2016. №. 11 (1). P. 147–155. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>

17. Kozachenko D., Hermaniuk Y., Grevtsov S. The influence of random factors on the estimation of the speed and time of rolling cuts from sorting

humps. *MATEC Web Conf. Volume 390, 2024*, Lviv, 9–10 November 2023. 04001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004001>.

18. Kozachenko D., Bobrovskyi V., Demchenko Y. A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26, no. 3. P. 189–199. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0161-2>.

19. Оптимізація режимів гальмування відцепів на сортувальних гірках : монографія / В. І. Бобровський та ін. Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький, 2010. 260 с.

20. Computer methods for mathematical computations / ed. by Malcolm, Michael A., 1945- joint author., Moler, Cleve B., joint author. Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, 1977. 259 p.

Надійшла в редколегію 12.09.2025

Прийнята до друку 19.11.2025

O. KLYGA

DOMAIN OF ADMISSIBLE HUMP BRAKING MODES UNDER STOCHASTIC CONDITIONS

Purpose. The purpose of this study is to establish relationships between the braking modes of cuts on sorting humps and the parameters of random variables of cut speed and rolling time. **Methodology.** The research in this work is performed based on the methods of the theory of railway operation, mathematical statistics, and simulation modeling. **Results.** Despite the long history of research on humping processes and the availability of a significant volume of field observation data and experiments to determine the distribution parameters of random variables of wagon characteristics, there is a gap in scientific methods for assessing the influence of cut braking modes on the distribution parameters of random variables of speed and rolling. The development of such methods will significantly simplify the solution of the applied problem of searching for safe humping modes depending on the technical equipment of the humps. The determination of random variables of speed and rolling time in the study is performed based on the results of a series of simulation experiments processed by methods of mathematical statistics. Admissible cut braking modes form a closed domain. It was established that the dependencies of the mathematical expectation of speed and rolling time at the boundaries of the domain of admissible modes are represented by s-shaped curves. This form of dependencies is associated with the limited capabilities of braking positions to control the rolling speed of cuts. The dependencies of the standard deviation of speed and rolling time on braking modes have a complex non-monotonic form. This form of dependency is a consequence of the non-linear relationship between speed and motion resistances under conditions of simultaneous changes in speed and the proportion of controlled cut replicas. The paper presents algorithms for searching for the vertices of the domain of admissible braking modes based on computational experiment data. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the improvement of the method for constructing domains of admissible cut rolling modes. Unlike previous methods, in this work, the assessment of compliance with the requirements for regulating the rolling of cuts is carried out with a given statistical reliability. **Practical value.** The practical significance of the results is that they allow increasing the efficiency of control algorithms for the train sorting process.

Keywords: railway transport, freight transportation, marshalling yard, sorting hump, mathematical modeling.

УДК 656.222.4-048.43:656.2.07-045.52

А. В. ПРОХОРЧЕНКО^{1*}, Д. Р. ХАРЧЕНКО^{2*}, М. А. КРАВЧЕНКО^{3*}, А. М. КИМАН^{4*}

1* Український державний університет залізничного транспорту, 7, майдан Фейєрбаха, м. Харків, Україна, тел. +380577301088, ел. пошта prokhorchenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

2* Український державний університет залізничного транспорту, 7, майдан Фейєрбаха, м. Харків, Україна, тел. +380965053057, ел. пошта harchenko95@kart.edu.ua, ORCID 0009-0006-0065-6781

3* Український державний університет залізничного транспорту, 7, майдан Фейєрбаха, м. Харків, Україна, тел. +380577301088, ел. пошта kravchenko.ma@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7445-8952

4* Український державний університет залізничного транспорту, 7, майдан Фейєрбаха, м. Харків, Україна, тел. +380577301075, ел. пошта kuman.am@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-4000-3287

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАВИЛ ПРІОРИТЕТНОСТІ ПРИ РОЗПОДІЛІ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Метою дослідження є формування вимог до механізму пропускної спроможності для АТ «Укрзалізниця» шляхом використання та адаптації критеріїв пріоритетності, які використовуються при розподілі пропускної спроможності в умовах відкритої конкуренції за залізничну інфраструктуру у країнах ЄС. **Методика.** Дослідження виконано на основі аналізу чинного нормативно-правового забезпечення країн ЄС. **Результати.** За результатами дослідження нормативно-правового забезпечення в Україні виявлено відсутність вимог щодо порядку розподілу пропускної спроможності та узгодження ниток графіка руху у випадку наявності конфлікту між перевізниками. Аналіз законодавства ЄС показав, що одним із критеріїв пріоритетності є показник пріоритету К, який використовується під час узгодження рівнозначних заявок від перевізників. Моделювання розподілу пропускної спроможності з використанням пріоритету К виявило відсутність повної нейтральності до всіх перевізників та потребує подальшого удосконалення. У розглянутому прикладі перевізник В, який має меншу довжину нитки (556 км), але значно більшу кількість діб курсування (182 доби), отримав перевагу за критерієм пріоритетності у 3,6 разів порівняно з перевізником А з довшою ниткою (616 км), але меншою тривалістю роботи (46 діб). Отримані результати свідчать про ключову роль інтенсивності використання інфраструктури у визначенні пріоритету доступу. **Наукова новизна.** Вперше змодельовані ситуації конфлікту між двома залізничними перевізниками які є антагоністами на перевантаженій дільниці з використанням критерію пріоритету К, відповідно до регламенту ЄС 2024/1679 [15] в умовах функціонування залізничної системи України. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють сформулювати вимоги до національного механізму розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури та здатні забезпечувати поетапний розподіл пропускної спроможності із застосуванням регламентованих критеріїв пріоритетності та прийняття недискримінаційних рішень. **Висновки.** За результатами проведеного дослідження сформульовані ключові вимоги до механізму розподілу пропускної спроможності, який буде впроваджений на мережі залізниць України. За допомогою проведеного сценарного аналізу виявлено, що критерій пріоритету К є високочутливим до тривалості використання нитки графіка руху і не забезпечує повну нейтральність для кожного перевізника під час узгодження ниток графіка руху. В умовах функціонування залізничного транспорту України та впровадження механізму розподілу пропускної спроможності, показник К потребує подальшої роботи з його удосконалення.

Ключові слова: залізничний транспорт, дерегуляція, механізм розподілу, пропускна спроможність, поїздопотік, пріоритетність, конфлікт.

Вступ

Реформування залізничного транспорту України, зумовлене зобов'язаннями за Угодою про асоціацію з Європейським Союзом [1], передбачає лібералізацію ринку перевезень, запровадження відкритого доступу до інфраструктури (англ., open access) та розмежування функцій управління інфраструктурою і надання транспортних послуг (модель вертикального розділення).

В результаті таких змін в інституційну архітектуру залізничної системи впроваджується нова модель взаємодії між оператором інфраструктури (Infrastructure Manager, IM) та залізничними перевізниками (Railway Undertaking, RU). Це, у свою чергу, висуває нові вимоги до організації руху поїздопотоків, зокрема до механізму розподілу пропускної спроможності та визначення пріоритетів руху поїздопотоків.

В умовах функціонування декількох незалежних перевізників на спільній інфраструктурі виникає об'єктивна потреба у розробці формалізованих правил пріоритетності, які дозволяють ефективно вирішувати конфліктні ситуації при одночасному запиті на використання однакових ресурсів залізничної інфраструктури. Це особливо актуально в умовах обмеженої пропускної спроможності, зношеної чи перевантаженої інфраструктури та зростаючих обсягів перевезень. Наявність чітких, прозорих і недискримінаційних правил пріоритетності є передумовою забезпечення справедливості доступу до інфраструктури та досягнення балансу інтересів між учасниками ринку.

Основною метою цього дослідження є формування підходів до визначення пріоритетності руху поїздопотоків в межах механізму розподілу пропускної спроможності у залізничній системі з урахуванням європейських залізничних Директив та Регламентів [12, 15, 18], принципів справедливості доступу, а також специфіки функціонування української залізничної системи. Для досягнення цієї мети передбачено аналіз нормативно-правової бази ЄС, вивчення практичного досвіду країн із розвинутими моделями розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури, а також моделювання типових конфліктних ситуацій із метою розробки критеріїв прийняття рішень щодо пріоритетності для виходу з конфлікту.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є формування вимог до процедури розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури в Україні. Досягнення сформованої мети потребує у вирішенні наступних завдань дослідження: проведення дослідження нормативно-правового забезпечення умов функціонування залізничної системи України та ЄС; на основі проведеного аналізу сформулювати фундаментальні вимоги до законопроекту, який спрямований на регламентацію процесу розподілу пропускної спроможності в Україні; проведення сценарного аналізу критерію пріоритету К на предмет нейтральності для кожного залізничного перевізника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню розподілу пропускної спроможності в умовах функціонування ринку дерегульованого ринку перевезень розглядалися різними вченими в Україні та закордоном. Зокрема робота [3] присвячена питанню виникнення конф-

ліктів та їх регуляції під час розподілу пропускної спроможності у різних країнах ЄС. Авторами наводиться огляд функціонування після дерегуляції ринку перевезень та проводиться аналіз особливостей їх роботи, зокрема механізму розподілу пропускної спроможності у країнах з розвинутою залізничною інфраструктурою. Однак у статті поверхнево досліджується процес узгодження конфліктної нитки графіка руху, а також критерії, які застосовуються при цьому.

У статтях [4, 5] проводиться аналіз виникнення, структури та функціонування дерегульованого ринку перевезень та механізму розподілу пропускної спроможності на залізничній мережі Європейського Союзу. У роботі [4] окрема увага приділяється умовам функціонування ринку залізничних перевезень Швеції, яка першою провела реформи з дерегуляції залізничного ринку. На основі проведеного аналізу автор зазначає про наявність низки проблем, які пов'язані з прозорістю та ефективністю розподілу пропускної спроможності у країнах ЄС. За результатами проведеного аналізу існуючих процесів розподілу пропускної спроможності у [5] автори зазначають про недосконалість існуючих методів та вони потребують подальшого удосконалення.

У статті [6] досліджувались умови функціонування та правове регулювання правил пріоритетності, які використовуються на перевантажених залізничних ділянках. Авторами було проаналізовані підходи до визначення правил пріоритетності у країнах ЄС та Америки з подальшим аналізом показника пунктуальності руху пасажирських поїздів від вантажообігу та пасажирообігу залізничних систем. Результати дослідження показали неефективність існуючих правил пріоритетності та відсутність балансу між надання пріоритету пасажирським та вантажним поїздам. Однак у даній статті не було досліджене питання розподілу пропускної спроможності під час планування щорічного графіку руху.

У [7] аналізуються практичні методи розподілу пропускної спроможності та їх переваги та недоліки. Авторами було визначено три основних групи методів розподілу, які використовуються на практиці (адміністративний, на основі аналізу витрат на нагород та на основі готовності платити). Однак у статті недостатня увага уділяється нормативно-правовому регулюванню розподілу пропускної спроможності.

Комплексним дослідженням процесу реформації залізничної системи за європейськими принципами функціонування є книга [1]. У книзі

детально описуються основи функціонування залізничної системи за вертикальним розділенням, нормативно-правові акти ЄС, які регламентують діяльність залізничних перевезень, умови функціонування залізничного ринку перевезень на національному рівні країн-учасниць ЄС та під час міжнародних залізничних перевезень, а також окремо увагу приділено процесу тарифікації перевезень.

Паралельно з аналітичними дослідженнями, вченими проводилась робота з підвищення ефективності розподілу пропускної спроможності на основі впровадження математичних моделей, які застосовувались під час прийняття рішень щодо розподілу пропускної спроможності. Зокрема у статті [8] визначені критерії пріоритетності під час надання ниток графіка руху поїздів в умовах функціонування залізничного транспорту України. Авторами запропоновано формування механізму розподілу на основі використання нейромережі ANFIS. Однак у статті не підіймалось питання узгодження нитки графіка руху в умовах конфлікту між двома рівнозначними заявками.

Стаття [9] присвячена визначенні черговості відправлення вантажних поїздів зі залізничної станції. Автором запропоновано використання цільової функції на основі показника обігу вантажного вагону для визначення пріоритетності у відправленні поїздів зі залізничної станції. Однак використання запропонованої функції робить її застосування можливим лише у випадку розподілу пропускної спроможності для вантажних поїздів в оперативному порядку, що унеможливорює використання її під час щорічного планування графіку руху.

Результати дослідження

Сучасне тлумачення терміну «розподіл пропускної спроможності» (англ. capacity allocation) визначає процес розподілу інфраструктурних активів (колій) залізничної мережі оператором залізничної інфраструктури між перевізниками. В умовах функціонування залізничного транспорту України засади процесу розподілу пропускної спроможності та умов функціонування залізничної мережі були встановлені ще у часи існування 60-80 роках минулого століття. Законом України «Про залізничний транспорт» [10] встановлено, що управління інфраструктурою, процесами перевезень та формування тарифів на перевезення здійснюється централізовано та виключно державною монополією АТ «Укрзалізниця». Крім того, сучасна редакція Закону Укра-

їни «Про залізничний транспорт» не містить положень про впровадження недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури тягового рухомого складу приватних перевізників, а також про процес розподілу пропускної спроможності (формування графіку руху поїздів). Відсутність положень щодо доступу приватних перевізників до залізничної інфраструктури призвело до фактичного одноосібного (монопольного) здійснення послуг з перевезення з боку Укрзалізниці на коліях загального користування, а відсутність положень щодо функціонування механізму розподілу пропускної спроможності створює передумови до дискримінаційних рішень: надання преференцій окремим вантажовідправникам (груп вагонів) або визначення маршруту перевезень, який є завідомо неприйнятним для вантажовідправника під час розробки плану формування поїздів (ПФП). Крім того, фактична відсутність конкуренції на ринку надання послуг з перевезення залізницею, створюють передумови до формування непрозорого, необґрунтованого та незбалансованого тарифу на перевезення вантажів. Як наслідок, відсутність конкуренції на ринку перевезень призводить до різкого зменшення ефективності та якості перевезень на залізничному транспорті.

Тому, з метою підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту України та імплементації нормативно-правових актів ЄС щодо діяльності залізничного транспорту в умовах залізничної мережі України, 21 жовтня 2024 року у парламенті був зареєстрований проєкт Закону України №12142 [11], «Про систему та особливості функціонування ринку залізничного транспорту України» який розпочинає процес реформування залізничного транспорту України у відповідності до стандартів ЄС та створює передумови до формування відкритого ринку послуг з перевезення пасажирів і вантажів на залізниці.

Даний законопроект впроваджує основні засади функціонування залізничного транспорту України за моделлю відкритого доступу, закріплює на законодавчому рівні необхідність у проведенні реформування організаційної структури національного монопольного залізничного перевізника АТ «Укрзалізниця», відокремлення експлуатації інфраструктури від безпосереднього надання послуг з перевезення та відкриття доступу до мережі залізниць України приватним перевізникам. Однак, у законопроекті відсутні положення, що регламентують процес розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури між перевізниками. Регламентація

роботи механізму розподілу пропускної спроможності є особливо важливою у контексті ефективного функціонування концепції відкритого

ринку перевезень на залізничному транспорті (рис. 1).

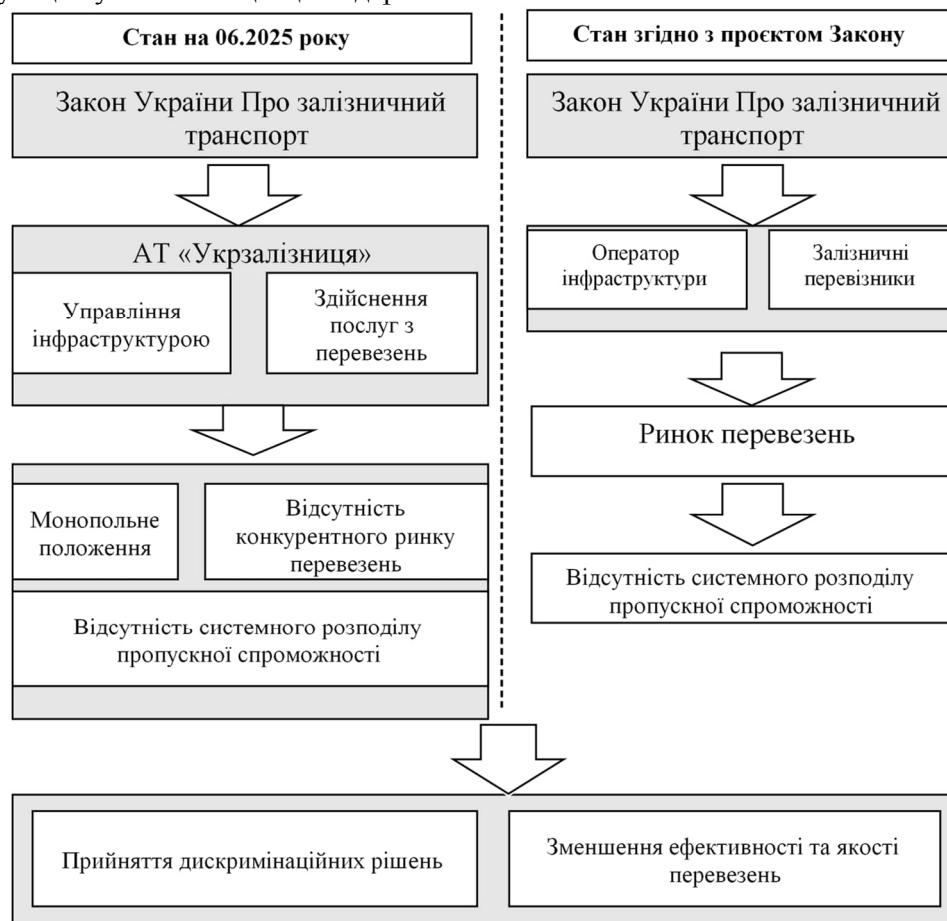


Рис. 1. Умови функціонування залізничного транспорту України у сучасному стані та згідно з проєктом Закону «Про систему та особливості функціонування ринку залізничного транспорту України» [10]

Одним зі способів формування ефективного механізму розподілу пропускної спроможності є дослідження та впровадження в роботу нормативно-правового забезпечення та практичних підходів, що застосовуються під час розподілу пропускної спроможності у залізничних системах ЄС з розвинутою інфраструктурою. Основні вимоги до розподілу пропускної спроможності встановлені у Директиві ЄС 2012/34/EU [12]. У відповідності до Директиви, на оператора інфраструктури покладається виключне право на розподіл існуючої пропускної спроможності та стягування зборів за її використання. Умови та критерії розподілу пропускної спроможності встановлюються країнами-учасниками ЄС самостійно, однак вони повинні забезпечувати справедливий і недискримінаційний розподіл пропускної спроможності серед всіх зацікавлених стейкхолдерів.

У випадку наявності суперечливої нитки графіка руху, кожен національний оператор інфра-

структури повинен ініціювати процес узгодження конфлікту за неї на етапі уточнення запитів (не пізніше 8 місяців до моменту вводу графіка руху в дію) [13]. Початок процесу узгодження заявок на пропуску спроможність (англ. Dispute Resolution Process) відбувається шляхом координації запитів серед всіх перевізників. Узгодження конфліктів повинно відбуватися на основі принципової схеми, яка розробляється оператором інфраструктури самостійно у відповідності до національного законодавства країни, з подальшим обов'язковим викладанням її до Положення про мережу (англ. Network Statement).

Ілюстрацією впровадження комплексного механізму розподілу пропускної спроможності в межах національної залізничної мережі у ЄС є Німеччина. Організаційна структура залізничної галузі в Німеччині має частково-вертикальний поділ, де керування інфраструктурою здійснює оператор інфраструктури DB InfraGO AG (до 27 грудня 2023 р. - DB Netz AG), який входить до

складу національної компанії Deutsche Bahn AG. У відповідності до Директиви ЄС ЄС 2012/34/EU та Законом про регулювання залізниць (нім. Eisenbahnregulierungsgesetz) [13], на DB InfraGO AG покладається право щодо прийняття рішень які стосуються розподілу наявних інфраструктурних ресурсів між залізничними перевізниками та подальше стягнення плати за її користування.

Механізм розподілу пропускну спроможності регламентується у національному Законі [13] та Network Statement оператора інфраструктури [14]. У випадку виникнення конфлікту Законом встановлено, що IM DB InfraGO AG повинен розкривати інформацію про нитки графіка руху для заявників з метою пошуку альтернативних маршрутів або часових періодів відправлення. Інформація, що надається перевізникам, повинна містити дані про запитовані залізничні маршрути, а також про існуючі альтернативні маршрути і повну та вичерпну інформацію про критерії, які використовуються під час розподілення залізничної інфраструктури. Після надання всієї необхідної інформації, DB InfraGO AG повинен розпочати процес узгодження попередньо організованих ниток графіка руху (англ. Pre-arranged Paths, PaP) та запропонувати рішення вирішення конфлікту дотримуючись принципу недискримінаційності до кожного учаснику конфлікту.

Якщо процес консультації не призводить до згоди між учасниками конфлікту, IM розпочинає наступний етап узгодження конфліктуючих ниток в графіку руху. На цьому етапі в цілому процес узгодження конфліктуючих ниток в графіку руху можливо розділити на два варіанти: без укладання рамкової угоди та з її укладанням. Для узгодження заявок від перевізників, що здійснюють нерегулярні перевезення (без укладання рамкової угоди) механізму узгодження конфліктів відбувається за наступними правилами пріоритетності:

Першочерговий пріоритет на пропуску спроможність мають регулярні інтервальні перевезення (критерій частоти) або інтегровані залізничні послуги (англ. Integrated Transport Service). Регулярність перевезень визначається критерієм, який встановлює частоту відправлень поїздів (мінімум 4 раз за добу) та мають послідовний інтервал між двома поїздами не більше 120 хвилин. Додатковою умовою для забезпечення достатньої якості перевезень, а також стабільності розробленого PaP-нитки, є перевірка можливості дотримання перевізником запропо-

нованого розкладу для поїзду в межах допустимих часових проміжків. Слід зауважити, що регулярність перевезень враховується лише на залізничних ділянках з наявним конфліктом за нитку графіка (станції відправлення та призначення суперечливих заявок на пропуску спроможність повинні співпадати).

Інтегрованість залізничних послуг визначається шляхом дотримання відповідності критеріям інтегрованості для кожної категорії поїзду. Для пасажирських перевізників, які запитують нитку графіка руху, повинна дотримуватись умова можливості пересаджування пасажирів з одного поїзда на інший, при цьому часовий інтервал між прибуттям одного поїзду та відправлення іншого повинен не перевищувати 30 хвилин. У випадку курсування пасажирського поїзду за моделлю «оборотного циклу» (англ. turnaround cycle), тобто здійснення двох маршрутів «туди та назад» одним і тим же рухомим складом (без зміни схеми поїзду), необхідне обов'язкове дотримання інтервалу між часом прибуття та відправлення у зворотному напрямку з кінцевої (оборотної) станції, який повинен не перевищувати 60 хвилин.

В сегменті вантажних перевезень до інтегрованих залізничних перевезень відносяться запити від перевізників, які передбачають наявність не менш двох зупинок на шляху прямування вантажного поїзду для причеплення (або відчеплення) не менше 8 вагонів або поданий запит на пропуску спроможність передбачає курсування вантажного поїзду за моделлю оборотного циклу (час між прибуттям та відправленням повинен не перевищувати 480 хвилин). У випадку здійснення комбінованих вантажних перевезень в межах контейнерного залізничного терміналу, інтервал між прибуттям та відправленням зменшується до 240 хвилин.

Другий пріоритет надається заявкам, які забезпечують перевезення в міжнародному сполученні. У випадку здійснення міжнародних перевезень коридорами, які входять в склад функціонування Транс'європейської транспортної мережі (англ. Trans-European Transport Network, TEN-T) розподіл пропускну спроможності відбувається за особливими правилами. Процес розподілу регламентується Регламентом ЄС 2024/1679 [15], а також Інформацією про коридор (англ. Corridor Information Document, CID) [16], який регламентує роботу кожного міжнародного вантажного коридору. Координація розподілу пропускну спроможності в рамках TEN-T передбачає взаємодію між національними IM та єдиним координаційним центром

(C-OSS). У випадку наявності конфліктних запитів C-OSS разом з національним ІМ повинен розпочати процес узгодження, шляхом консультації між оператором інфраструктури та перевізниками за умови відсутності можливості прокладання альтернативного маршруту. Процес узгодження можливий лише у випадку наявності конфлікту лише в умовах функціонування одного міжнародного коридору. У випадку неможливості узгодження ниток графіка руху шляхом консультацій, оператор інфраструктури використовує правила пріоритету з застосуванням «показника пріоритету» K , який визначає значення пріоритету заявки. Визначення даного критерію відбувається у декількох етапах [1, 17]:

На першому етапі показник пріоритету K визначається шляхом помноження загальної запитаної довжини попередньо організованої нитки графіка руху (L^{PaP}) на загальну кількість запи-

туваних робочих днів (періодичність курсування, Y^{RD}) для кожного конфлікту. У випадку неможливості узгодження нитки графіка на цьому етапі, на другому етапі додатково обчислюється запитана загальна довжина повних маршрутів, що запитана в рамках курсування вантажними коридорами ($L^{F/O}$):

$$K = (L^{PaP} + L^{F/O})Y_{RD} \quad (1)$$

У випадках, коли узгодити РаР-нитку через міжнародний коридор неможливо за допомогою зазначених критеріїв пріоритетності, оператор інфраструктури застосовує випадковий вибір [14].

Третій пріоритет надається маршрутам для внутрішніх вантажних перевезень.

Якщо були подані рівнозначні заявки, оператором інфраструктури додатково використовується перелік критеріїв для узгодження нитки графіка руху між залізничними перевізниками у відповідності до рис. 2.

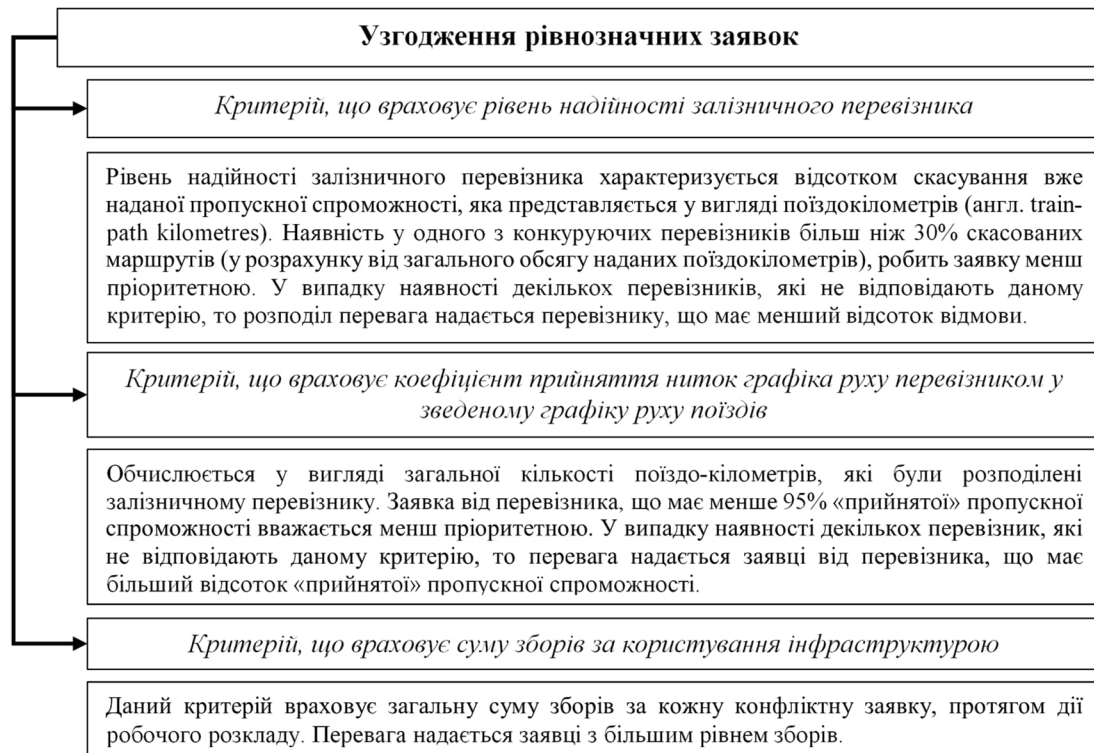


Рис 2. Критерії для узгодження рівнозначних заявок

У випадку неможливості узгодження РаР-нитки за допомогою зазначених вище критеріїв пріоритетності, оператор інфраструктури проводить аукціон між залізничними перевізниками, що подали заявки. Залізничні перевізники, протягом 5 днів, мають подати свої пропозиції щодо плати за нитку графіка руху. РаР-нитка надається перевізникові, який запропонував найвищу плату за її користування.

Укладання рамкової угоди (англ. Framework Agreement) між оператором інфраструктури та залізничним перевізником у відповідності до вимог Директиви ЄС 2001/14/EU [18] регламентує права та обов'язки ІМ та залізничного перевізника щодо розподілення пропускної спроможності [2]. У рамковій угоді зазначаються характеристики наданої пропускної спроможності

(часові інтервали відправлення, полігон курсування тощо). Укладання рамкової угоди зобов'язує ІМ у пошуку альтернативних маршрутів які відповідають характеристикам пропускної спроможності, що гарантуються угодою. Заявки від перевізників з укладеною рамковою угодою мають більший пріоритет, ніж заявки, які здійснюють нерегулярні перевезення.

Слід зауважити, що у випадку конфлікту між заявками, що забезпечують місцеві залізничні пасажирські перевезення та іншими типами перевезень, оператор інфраструктури може надати пріоритет пасажирським перевезенням незалежності від рівня пріоритету заявки. Узагальнена схема узгодження ниток графіка руху наведена на рис. 3.

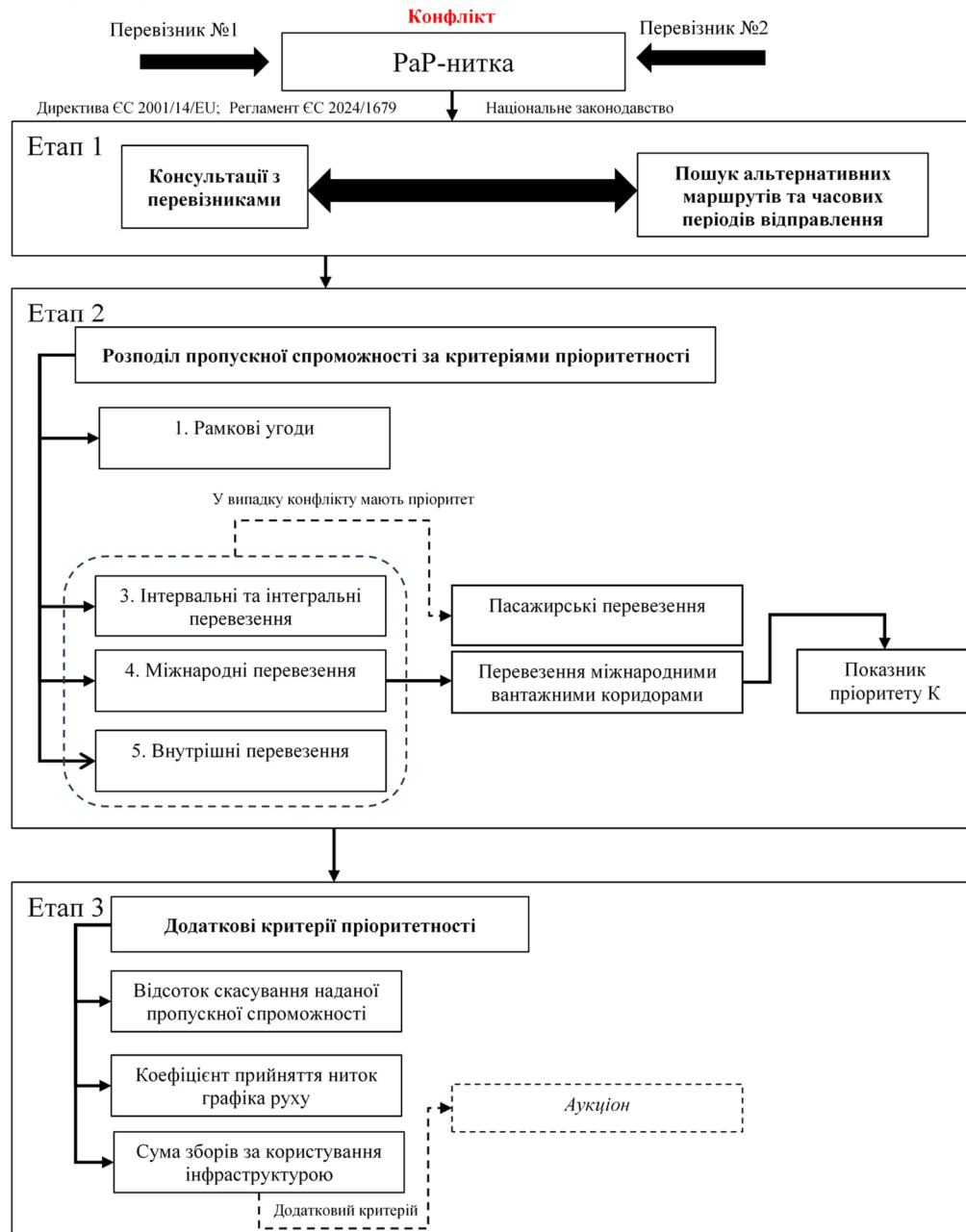


Рис. 3. Схема ієрархічна пріоритетності поїздопотоків в межах механізму розподілу пропускної спроможності на залізничній мережі оператора інфраструктури

Крім реалізації функції вирішення конфліктів, механізм розподілу пропускної спроможності повинен враховувати особливості функціонування перевантажених залізничних дільниць. Сучасне тлумачення поняття перевантаженої інфраструктури (англ. congested infrastructure)

означає залізничний полігон, де попит на пропускну спроможність не може бути задовільним оператором інфраструктури протягом певного часового періоду, навіть після узгодження ниток графіка руху [18]. У випадку оголошення дільниці перевантаженою, оператор інфраструктури

використовує додаткові правила пріоритетності для управління рухом на перевантаженій інфраструктурі.

У відповідності до національного законодавства [13], у Німеччині під час управління рухом на перевантаженій дільниці, оператор інфраструктури може надавати пріоритет соціальним перевезенням з метою забезпечення у безперебійному перевезенні пасажирів за допомогою залізничного транспорту.

В контексті залізничного транспорту України процес управління рухом на перевантажених дільницях регулюється централізовано з боку держави та викладені у правилах технічної ек-

плуатації залізничного транспорту. Чинні правила пріоритетності мають соціальну орієнтованість та надають перевагу пасажирським поїздам [6].

Враховуючи проведений вище аналіз нормативно-правового забезпечення та практичних підходів до розподілу пропускної спроможності, для побудови в Україні ефективного механізму розподілу пропускної спроможності та вирішення конфліктів, у законопроекті «Про систему та особливості функціонування ринку залізничного транспорту України» [11] повинні обов'язково закріплені положення, що наведені на рис. 4.

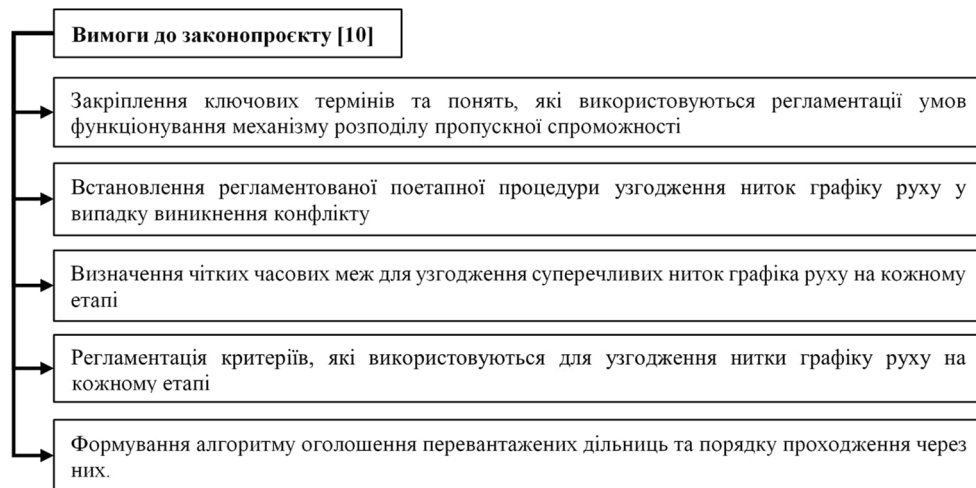


Рис 4. Вимоги до законопроекту «Про систему та особливості функціонування ринку залізничного транспорту України» [11]

В межах дослідження додатково було змодельована конфліктна ситуація між двома перевізниками з різною частотою курсування, що претендують на одну й ту саму інфраструктуру (дільниця Помічна – Колосівка, регіональної філії «Одеська залізниця» АТ Укрзалізниця). Вихідні дані для моделювання наведені у табл. 1.

Для узгодження нитки графіку руху запропоновано застосовувати показник пріоритету K ,

який розраховується у відповідності до формули (1). Використання показника пріоритету K , для внутрішніх перевезень є досить простим та ефективним узгодження конфліктуючих заявок.

Розрахунок показника пріоритету:

- $K_{RU_a} = 616 \cdot 46 = 28336$ – для перевізника А;

- $K_{RU_b} = 556 \cdot 182 = 101192$ – для перевізника Б.

Таблиця 1

Вихідні дані для моделювання

	Перевізник А (RU A)	Перевізник В (RU B)
Тип вагонів (вантаж для перевезення)	Зерновози (зерно)	Напіввагон (залізорудна сировина)
Кількість вагонів у складі поїзду	45 ум. ваг	45 ум. ваг
Періодичність курсування	46 днів протягом сезону літ- них перевезень	182 днів протягом року
Станція відправлення (код єдиної мережевої розмітки)	Полтава-Південна (448709)	Кривий Ріг-Сортувальний (467108)
Станція призначення (код єдиної мережевої розмітки)	400409 Одеса-Порт (Експ.)	400606 Берегова (Експ.)
Тарифна відстань	616 км	556 км
Інфраструктура (залізнична дільниця) з конфліктом на нитку графіку руху	Помічна – Колосівка	

Для побудови теплової карти та визначення областей переваги кожного перевізника у просторі параметрів (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) використано дискретизовану квадратну сітку. Кількість точок у цій сітці обчислюється за формулою:

$$N = \left(\frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{h} + 1 \right)^2, \quad (2)$$

де $Y_{\max}, Y_{\min}$ – мінімальна та максимальна кількість діб експлуатації нитки в робочому розкладі руху, діб;

h – крок дискретизації, діб. Вибране значення кроку дискретизації означає, що зміна інтенсивності роботи кожного перевізника розглядається кратними приростами п'яти діб. Це відповідає реальним умовам залізничної експлуатації, де планування курсування поїздів не здійснюється поодинокими днями, а формує тижневі або наближені до тижневих цикли роботи.

Формула (2) визначає точну кількість комбінацій пар (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) , які аналізуються під час моделювання, та забезпечує коректне нормування площі переваги у відсотках у подальших розрахунках. Приймемо, що $Y_{RU_a}, Y_{RU_b} \in [Y_{\min}, Y_{\max}] \in N$ – кількість днів експлуатації нитки відповідного перевізника. Тоді, згідно до (1) різниця пріоритетів визначаються як:

$$\Delta K = K_{RU_a} - K_{RU_b}, \quad (3)$$

де показники пріоритетів перевізників визначаються як:

$$K_{RU_a} = L_{RU_a} \cdot Y_{RU_a}, K_{RU_b} = L_{RU_b} \cdot Y_{RU_b}, \quad (4)$$

де L_{RU_a} – довжина нитки (маршруту) перевізника А;

L_{RU_b} – довжина нитки (маршруту) перевізника В, км.

Приймемо, що для кожної точки різниці пріоритетів задаються множини, зокрема:

- множина переваги перевізника А:

$$\Omega_{RU_a} = \{(Y_{RU_a}, Y_{RU_b})\} : \Delta K > \varepsilon;$$

- множина переваги перевізника В:

$$\Omega_{RU_b} = \{(Y_{RU_a}, Y_{RU_b})\} : \Delta K < -\varepsilon;$$

- множина переваги рівноваги:

$$\Omega_{eq} = \{(Y_{RU_a}, Y_{RU_b})\} : |\Delta K| \leq \varepsilon$$

Параметр ε є допуск на незначну похибку (параметр «толерантності»).

За таких умов, можна визначити відносні площі випадків, що показують у якій частці сценаріїв зміни періодичності курсування перевізників, що конфліктують отримують пріоритет

доступу до інфраструктури та знайти сценарії рівноваги. Отже, площа, де частка точок, у яких перевізник А має перевагу визначається за виразом:

$$S_{RU_a} = \frac{|\Omega_{RU_a}|}{N}, \quad (5)$$

а площа переваги перевізника В:

$$S_{RU_b} = \frac{|\Omega_{RU_b}|}{N}, \quad (6)$$

та площа рівноваги:

$$S_{eq} = \frac{|\Omega_{eq}|}{N}. \quad (7)$$

Таким чином, відносні площі $S_{RU_a}, S_{RU_b}, S_{eq}$ однозначно відображають частку простору рішень, у якій відповідний перевізник має перевагу за формулою (4). Для проведення розрахунків приймемо, що $Y_{\min} = 10$ діб, $Y_{\max} = 360$ діб, $h = 5$ діб. Згідно виразу (2) загальна кількість точок у дискретизованій квадратній сітці буде: $N = 71^2 = 5041$.

Для сценарію переваги перевізника А знайдено площу:

$$\Omega_{RU_a} = 2776.$$

Для сценарію переваги перевізника В знайдено площу:

$$\Omega_{RU_b} = 2265.$$

Зоною рівноваги є дискретна лінія у якій площа $\Omega_{eq} = 0$ при $\varepsilon < 10^{-6}$.

Площа переваги перевізника А у відсотках:

$$S_{RU_a} = \frac{|\Omega_{RU_a}|}{N} \cdot 100\% = \frac{2776}{5041} \cdot 100\% \approx 0,5507 \cdot 100\% \approx 55,1\%$$

$$S_{RU_b} = \frac{|\Omega_{RU_b}|}{N} \cdot 100\% = \frac{2265}{5041} \cdot 100\% \approx 0,4493 \cdot 100\% \approx 44,9\%$$

$$S_{eq} = 0$$

Згідно з наведеними вище математичними формулами та прийнятими параметрами дискретизації простору рішень (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) , у середовищі Python було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання конфліктної ситуації між перевізниками. Розрахунок показника пріоритету К для кожної точки сітки, класифікація областей переваги $\Omega_{RU_a}, \Omega_{RU_b}, \Omega_{eq}$, а також побудова теплової карти виконані автоматизовано. Отримані результати подано у вигляді діаграми на рис. 5, що наочно відображає поділ простору рішень на зони

переваги кожного перевізника та лінію рівноваги $\Delta K = 0$. На рис. 5 наведено дискретну квадратну сітку з позначенням світло червоним площу переваги перевізника А, світло синім площу переваги перевізника В та чорну лінію, що візуалізує рівновагу.

На основі проведеного моделювання встановлено, що за заданих параметрів перевізник А отримує перевагу у більшій частині простору можливих сценаріїв експлуатації нитки. Числові результати свідчать, що перевізник А домінує у приблизно 55,1 % всіх комбінацій значень (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) тоді як перевізник В має перевагу у 44,9% сценаріїв. Така перевага перевізника А зумовлена більшою тарифною відстанню перевезення, яка становить 616 км порівняно з 556 км для перевізника В. Саме це призводить до більшого значення пріоритету K за однакових умов експлуатації нитки.

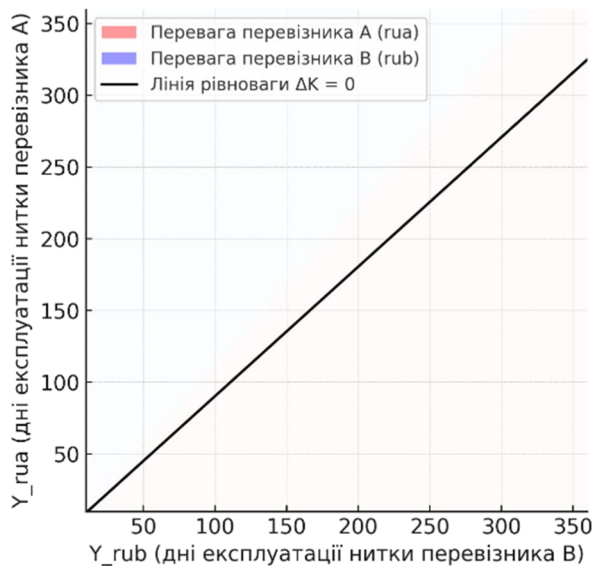


Рис 5. Поділ простору параметрів (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) на області переваги перевізників А та перевізника В за показником пріоритету K

Перевізник В отримує перевагу лише у тих ситуаціях коли тривалість його курсування значно перевищує тривалість роботи перевізника А. За таких умов більша кількість днів курсування компенсує меншу протяжність маршруту і забезпечує вищий результат показника пріоритету. Визначити умову переваги можна за розрахунком:

$$K_{RU_b} > K_{RU_a}, \quad (8)$$

тобто:

$$556 \cdot Y_{RU_b} > 616 \cdot Y_{RU_a},$$

звідси мінімальна кількість днів курсування перевізника В для переваги:

$$Y_{RU_b} > \frac{616}{556} \cdot Y_{RU_a} \approx 1,108 \cdot Y_{RU_a}$$

Отже, перевізник В має курсувати приблизно на 10,8 % більше днів ніж перевізник А. Для прикладу, якщо перевізник А працює 46 днів, то перевізнику В для отримання пріоритету необхідно працювати щонайменше $46 \cdot 1,108 \approx 51$ добу.

Відповідно до вихідних умов, що наведені у табл. 1, перевізник А програє перевізнику В. Таку ситуацію переваги можна визначити за виразом:

$$K_{RU_a} > K_{RU_b}, \quad (9)$$

де $616 \cdot Y_{RU_a} > 556 \cdot 182$.

Мінімальну кількість днів Y_{RU_a} , необхідну для переваги перевізника А можна розрахувати як:

$$Y_{RU_a} > \frac{556}{616} \cdot Y_{RU_b} \approx 0,902 \cdot Y_{RU_b} \approx 165 \text{ днів}.$$

За заданих умов перевізник А може отримати перевагу тільки за умови майже чотирикратного збільшення кількості днів курсування, тобто збільшити періодичність з 46 днів на сезон до принаймні 165 днів (різниця 119 днів). Для отримання переваги потрібно збільшити свою присутність на дільниці приблизно на чотири місяці роботи від поточних 46 днів (за умови $h = 5$).

Результати моделювання показали наявність чіткої межі рівноваги, що визначається умовою рівності пріоритетів і відображається як монотонна лінія на площині значень (Y_{RU_a}, Y_{RU_b}) . Сценарії, що розташовані вище цієї лінії належать до зони переваги А і сценарії нижче межі належать до зони переваги перевізника В (див. рис. 5). Теоретична рівновага за безперервної змінної настає при:

$$Y_{eqRU_a} = \frac{556}{616} \cdot Y_{RU_b} \approx 0,902 \cdot Y_{RU_b} \approx 164,2 \text{ доби}.$$

Слід зазначити, що округлення показника в більшу чи меншу сторону надає перевагу одному окремому перевізнику.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше змодельовані ситуації конфлікту між двома залізничними перевізниками які є антагоністами на перевантаженій дільниці з використанням критерію пріоритету K , відповідно до регламенту ЄС 2024/1679 [15] в умовах функціонування залізничної системи України.

Результати досліджень дозволяють сформулювати вимоги до національного механізму розподілу пропускнуої спроможності залізничної ін-

фраструктури які здатні забезпечувати поетапний розподіл пропускної спроможності із застосуванням регламентованих критеріїв пріоритетності та прийняття недискримінаційних рішень.

Висновки

Результат проведеного дослідження нормативно-правового забезпечення щодо умов функціонування залізничної системи України після проведення дерегуляції ринку перевезень показав відсутність положень та вимог, що стосуються умов розподілу пропускної спроможності та узгодження ниток графіку руху у випадку конфлікту між стейкхолдерами. Відсутність єдиних вимог та регламентації роботи механізму розподілу значно знижують ефективність використання залізничної інфраструктури та створюють передумови до неефективних та дискримінаційних рішень до залізничних перевізників. За результатами аналізу нормативно-правових документів в ЄС та практичних підходів на залізничній системі Німеччині сформовані фундаментальні вимоги до механізму розподілу пропускної спроможності в Україні. Сформовані вимоги повинні забезпечити функціонування механізму розподілу та узгодження ниток графіку руху на основі поетапної механізму та з застосуванням регламентованих критеріїв пріоритетності заявки.

Проведений сценарний аналіз показав, що критерій пріоритету K демонструє високу чутливість саме до тривалості використання нитки графіку руху. У розглянутому прикладі перевізник В, який має меншу довжину нитки (556 км), але значно більшу кількість діб курсування (182 діб), отримав перевагу за критерієм пріоритету у понад 72 тис. км-діб над перевізником А з довшою ниткою (616 км), але меншою тривалістю роботи (46 діб). Зміна інтенсивності використання нитки на кілька операційних циклів (наприклад, на 5-10%) призводить до пропорційної зміни значення критерію K , що підтверджує його лінійний характер. Водночас навіть незначне збільшення кількості днів курсування у перевізника з коротшою ниткою може компенсувати меншу протяжність маршруту і забезпечити перевагу за критерієм пріоритету. Отримані результати свідчать про ключову роль параметра Y_{RD} (інтенсивність використання інфраструктури) у визначенні пріоритету доступу. Це означає, що критерій K не може забезпечити повної нейтральності щодо перевізників із різною операційною моделлю. Його застосування потребує обережності для уникнення надмірної переваги перевізників із високою інтенсивністю

курсуювання або, навпаки, із наддовгими нитками. За таких умов виникає потреба у нормуванні показника, або переході до багатокритеріальної математичної моделі, яка враховує додаткові чинники, такі як регулярність, тип вантажу, що формує дохідність перевезення, завантаження дільниці, критерій економічно-соціальної важливості, тощо. Функціонування розподілу пропускної спроможності в умовах дерегульованого ринку залізничних перевезень повинно забезпечуватись автоматизованим розрахунком узгодження конфліктуючих заявок. Для досягнення цієї мети доцільно запровадити автоматизовану систему розподілу та вирішення конфліктів на основі математичної моделі з формалізацією алгоритму узгодження суперечливих заявок на пропускну спроможність на підставі визначених критеріїв пріоритетності з подальшим впровадженням її в рамках комплексної системи з управлінням рухом (наприклад, АСК ВП УЗ-Є).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : Угода Україна від 27.06.2014 : станом на 30 листоп. 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.
2. Прохорченко А. В. Залізничні системи з вертикальним розділенням. Європейська модель : підручник. Дніпро : Ліра, 2022. 316 с.
3. Abderrahman A.-A, Jonas Eliasson. Railway capacity allocation: A survey of market organizations, allocation processes and track access charges. *VTI Working Paper* 2019:1. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/340769445_Railway_Capacity_Allocation_A_Survey_of_Market_ORganizations_Allocation_Processes_and_Track_Access_Charges
4. Abderrahman A.-A. Methods for capacity allocation in deregulated railway markets. Norrköping : Linköping University, 2020. 78 с. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1472247/FULLTEXT01.pdf>
5. Ait Ali A., Eliasson J. European railway deregulation: an overview of market organization and capacity allocation. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2021. С. 1–25. DOI: 10.1080/23249935.2021.1885521
6. Дослідження правил пріоритетності руху поїздів у залізничних системах А. В. Прохорченко, Д. Р. Харченко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 4. С. 71–82. DOI: 10.18664/ikszt.v29i4.320376
7. Efficient capacity allocation on deregulated railway markets. E. Broman, J. Eliasson, M. Aronsson. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2021.100294

8. Формалізація процедури розподілу пропускної спроможності залізничної мережі в умовах недискримінаційного доступу до інфраструктури. Т.В. Бутко, С.В. Харланова, М.В. Коваленко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27, №2. С. 3-10. DOI: 10.18664/ikszt.v27i2.259688

9. Лаврухін О.В. Визначення цільової функції пріоритетного відправлення вантажних поїздів зі станції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2011. Т. 2, № 50. С. 20–22. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/14201/1/Lavrukhin.pdf>

10. Про залізничний транспорт : Закон України від 04.07.1996 № 273/96-ВР : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-вр#Text>

11. Верховна Рада України. Картка законопроекту про систему та особливості функціонування ринку залізничного транспорту України. *Сайт Верховної Ради України*. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/45100>

12. Establishing a single European railway area: Директива ЄС від 12.12.2012 № 2012/34/EU. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj>

13. ERegG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis. *Gesetze im Internet*. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/eregg/index.html#BJNR208210016BJNE005201119>

14. Network Statement 2025. *DB InfraGO: Eisenbahninfrastruktur der Zukunft in Deutschland*. URL: https://www.dbinfra.go.com/web-en/rail-network/network_statement/Network-Statement-2025-12612778

15. Union guidelines for the development of the trans-European transport network : Регламент ЄС 13.06.2024 №2024/167. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1679/oj/eng>

16. CID. *Main Page: North Sea – Baltic Rail Freight Corridor*. URL: <https://rfc8.eu/cid>

17. RFC North Sea – Med. Decision of the Executive Board of the Rail Freight Corridor North Sea-Mediterranean. 18 с. URL: https://www.rfc-northsea-med.eu/sites/rfc2.eu/files/telechargements/exbonsm_decision_181212_fca_en.pdf

18. The allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification: Директива ЄС 15.03.2001 № 2001/14/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2001/14/oj/eng>

Надійшла в редколегію 19.09.2025

Прийнята до друку 24.11.2025

A. PROKHORCHENKO, D. KHARCHENKO, M. KRAVCHENKO, A. KYMAN

RESEARCH ON PRIORITY RULES FOR THE ALLOCATION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE CAPACITY

The aim of the study is to develop requirements for the capacity allocation mechanism for JSC Ukrzaliznytsia by using and adapting the priority criteria used in the allocation of capacity in conditions of open competition for railway infrastructure in EU countries. **Methodology.** The study was conducted based on an analysis of the current regulatory framework in EU countries. **Results.** The study of the regulatory framework in Ukraine revealed the absence of requirements for the procedure for allocating capacity and coordinating timetables in the event of a conflict between carriers. An analysis of EU legislation showed that one of the priority criteria is the priority indicator K, which is used when coordinating equivalent applications from carriers. Modelling the allocation of capacity using priority K revealed a lack of complete neutrality towards all carriers and the need for further improvement. In the example considered, carrier B, which has a shorter route length (556 km) but a significantly higher number of days of operation (182 days), received an advantage of more than 72,000 km·days over carrier A, which has a longer route (616 km) but a shorter duration of operation (46 days). The results obtained indicate the key role of infrastructure utilisation intensity in determining access priority. Scientific novelty. **The scientific novelty of the work** lies in the fact that it is the first to model situations of conflict between two railway carriers that are antagonists on an overloaded section using the priority indicator K in the conditions of the Ukrainian railway system. **Practical significance.** The practical significance of the research results lies in the fact that they allow the formation of requirements for the national mechanism for the distribution of railway infrastructure capacity and are capable of ensuring the phased distribution of capacity using regulated priority criteria and non-discriminatory decision-making. **Conclusions.** Based on the results of the study, key requirements for the capacity allocation mechanism to be implemented on the Ukrainian railway network have been formulated. Scenario analysis has revealed that the priority criterion K is highly sensitive to the duration of use of the timetable thread and does not ensure complete neutrality for each carrier when coordinating timetable threads. In the context of the functioning of Ukraine's railway transport and the implementation of the capacity allocation mechanism, indicator K needs further work to improve it.

Keywords: rail transport, deregulation, allocation mechanism, capacity, train flow, priority, conflict.

УДК [656.073.235:519.87]-048.34

О. Ю. ПАПАХОВ^{1*}, Р. М. КОМПАНИЄЦЬ^{2*}, М. І. СЕРГІЄНКО^{3*}

^{1*} Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 564 65 65, ел. пошта: paraanova0362@gmail.com, ORCID 0000-0003-2357-8158

^{2*} Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 050 64 52, ел. пошта: rkompaniets@gmail.com, ORCID 0009-0001-7036-4227

^{3*} Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 506 56 89, ел. пошта: maria14032012@gmail.com, ORCID 0009-0001-7983-1119

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З МЕТОЮ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ

Контейнерні перевезення становлять ключовий елемент сучасних інтермодальних транспортних схем у глобальній торгівлі. Задачі, пов'язані з моделюванням контейнерних перевезень, стають дедалі актуальнішими. **Метою** проведеного моделювання є дослідження змін ключових показників логістики контейнерних перевезень: часу перебування вантажів у дорозі; тривалості очікування навантаження та розвантаження; а також інших пов'язаних параметри, задіяних при переході від швидкості традиційних перевезень до прискорених. Таким чином, вибір оптимального варіанту перевезення залежить від пріоритетного критерію, який встановлюється виходячи з конкретних задач логістики чи економіки підприємства. Залежно від мети та конкретних умов розв'язання оптимізаційної задачі, склад елементів витрат, які враховуються в цих показниках, а також характер їх використання можуть суттєво відрізнятися між собою. Запропонована **методика** базується на системі масового обслуговування, яка моделює процеси, в яких виникає випадковий потік заявок на обслуговування, а час їх обробки також має випадковий характер. Головна мета застосування такої моделі полягає в оцінці та прогнозуванні пропускну здатності системи, визначенні оптимальних способів організації процесу обслуговування, підвищенні його якості та розрахунку економічних витрат на основі відомостей про інтенсивність і характер вхідного потоку заявок. У якості **наукової новизни** у статті представлено новий підхід до визначення розподілення швидкостей руху контейнерних поїздів між собою при інтермодальних перевезеннях. **Результати.** У ході дослідження вирішені наступні основні задачі: проведено порівняльний аналіз змін основних показників обслуговування вантажних перевезень при переході від традиційних до прискорених вантажних перевезень; досліджено залежність кількості вантажних поїздів та відсотка простою засобів обслуговування від швидкості руху поїздів, а також визначено необхідну кількість вантажних поїздів для забезпечення заданого середнього часу доставки вантажів; проаналізовано, яка швидкість руху поїздів потрібна для досягнення наперед встановленого допустимого рівня простою вантажних поїздів. **Практична значимість.** У межах запропонованої математичної моделі з'являється можливість формулювати й розв'язувати значно ширші класи задач. Йдеться не лише про аналіз того, як змінюються ключові характеристики системи зі зростанням швидкості руху контейнерних поїздів, а й про зворотні питання: на скільки саме потрібно підвищити швидкість, щоб досягти заздалегідь визначених цільових значень цих характеристик. Зокрема, є можливість розраховувати, до якого рівня слід збільшити швидкість руху, щоб середній час очікування навантаження знизився до необхідного значення або щоб стала можливою оптимізація кількості задіяних складів.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, контейнерні перевезення, система масового обслуговування, швидкість руху, транспортно-експедиційне обслуговування.

Вступ

У теперішніх реаліях інтермодальні перевезення стали одним із найбільш популярних і швидкозростаючих підходів до організації міжнародної доставки вантажів. Їх активний розвиток зумовлений конкуренцією між різними видами транспорту, модернізацією інфраструктури та дедалі вищими вимогами клієнтів до якості та надійності послуг.

Національна транспортна стратегія України до 2030 року чітко вказує на ключові виклики

галузі, зокрема на недостатній рівень розвитку інтермодальних перевезень, наявність «вузьких місць» у транспортній мережі та, як наслідок, недостатню швидкість і точність доставки вантажів у встановлені терміни.

Контейнерні перевезення становлять ключовий елемент сучасних інтермодальних транспортних схем у глобальній торгівлі. Інтермодальні перевезення передбачають використання щонайменше двох різних видів транспорту. Їхня головна особливість полягає в тому, що вантаж протягом усього маршруту залишається в одній

і тій самій транспортній одиниці (наприклад, контейнері), а весь процес здійснюється за єдиним транспортним документом та під управлінням одного оператора. Завдяки цьому вантажовласник звільняється від необхідності укладати окремі договори з різними перевізниками та самостійно координувати перевезення - зокрема, складні операції перевантаження, узгодження графіків руху тощо. Саме ця зручність і комплексний супровід стають вирішальними факторами, які постійно приваблюють нових клієнтів до такого виду логістики. Додатковою перевагою є те, що оператор бере на себе контроль митних процедур під час перетину державних кордонів.

Цей варіант зберігає всі ключові ідеї оригіналу, але має іншу структуру речень, інший добір слів та дещо змінений порядок викладу.

Постановка завдання дослідження

У межах математичної моделі з'являється можливість формувати й розв'язувати значно ширші класи задач системи масового обслуговування. Йдеться не лише про аналіз того, як змінюються ключові характеристики системи зі зростанням швидкості руху контейнерних поїздів, а й про зворотні питання: наприклад, наскільки саме потрібно підвищити швидкість, щоб досягти заздалегідь визначених цільових значень цих характеристик. Зокрема, є можливість розраховувати, до якого рівня слід збільшити швидкість руху, щоб середній час очікування навантаження знизився до необхідного значення або щоб стала можливою оптимізація кількості задіяних складів.

Виходячи з знайдених закономірностей, необхідно розробити методику розв'язання практичних завдань з визначення параметрів прискорених перевезень, які забезпечують досягнення наперед заданих цільових характеристик руху поїздів.

Мета дослідження

Метою розробленої моделі є дослідження змін ключових показників логістики контейнерних перевезень: часу перебування вантажів у дорозі; тривалості очікування навантаження та розвантаження; а також інших пов'язаних параметри, задіяних при переході від швидкості традиційних перевезень до прискорених.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В сучасних реаліях інтермодальні переве-

зання стали одним із найпопулярніших і найдинамічніших способів організації міжнародної доставки вантажів. Їх активний розвиток зумовлений конкуренцією між різними видами транспорту, оновленням інфраструктури та зростанням вимог до якості транспортних послуг. Багато українських транспортно-експедиторських підприємств функціонують відокремлено в технологічному та інформаційному плані. Як наслідок, вони відчують значні труднощі при освоєнні ринку, мають слабку поінформованість про кон'юнктуру, новітні технології перевезень та потреби клієнтів, а також обмежені інвестиційні можливості для розширення спектру послуг [1, 2].

Зазначення цілей та пріоритетів розвитку вітчизняного транспортного потенціалу обумовлює відокремлення аналізу інтермодальної транспортної системи України. В Україні частка інтермодальних перевезень складає близько 1 - 2 % від загального обсягу змішаних перевезень, тоді як у Європі вона складає 40-50 % [3].

В Україні найбільша частка перевезень вантажів у контейнерах припадає на залізничний і автомобільний транспорт. Але за обсягом сумарного прибутку ці галузі стоять практично на одному рівні з авіаперевезеннями, на які за тоннажем припадають лише кілька відсотків, по причинам відсутності відповідного попиту на перевезення [4].

При організації інтермодальних перевезень вантажів транспортні-експедиторські підприємства виконують функції єдиного оператора з організації узгодженого функціонування системи. Тому, слід приділити увагу характеру функціонування підприємств транспортно-експедиторських підприємств на ринку логістичних послуг [5].

Однією з головних переваг інтермодальних перевезень є необхідність співпраці тільки з одним контрагентом. Незважаючи на наявність декількох видів транспорту, організацію доставки виконує транспортно-експедиторське підприємство, надалі – оператор інтермодального перевезення (ІП). Ця ж компанія-виконавець бере на себе зобов'язання по організації тимчасових місць зберігання, перевалочних пунктів, усіх вантажно-розвантажувальних робіт й складських операцій. Слід зазначити, що ефективна організація інтермодальних технологій доставки вантажів можлива на основі співробітництва між операторами (ІП) та транспортними підприємствами, їх кооперації [6].

Альтернативні схеми транспортно-експедиторського обслуговування вантажовласників

при інтермодальній контейнерній доставці в міжнародному сполученні будуються на численних комбінаціях різних видів транспорту. Вибір конкретної схеми залежить від вимог клієнта до умов перевезення, наявних можливостей інфраструктури, розміру відправки, а також від особливостей транспортного розвитку окремих країн.

За кордоном у процесі розвитку залізничного транспорту склалися дві основні бізнес-моделі транспортно-експедиційного обслуговування вантажів: північноамериканська (США та Канада) та європейська.

У північноамериканській моделі в організації транспортно-експедиційного обслуговування вантажів домінують кілька великих незалежних між собою залізничних компаній (наприклад, Union Pacific, BNSF, CSX, Norfolk Southern). Кожна з них є одночасно власником інфраструктури (залізничних станцій та колій з засобами зв'язку) і перевізником по «своїх» дільницях. Клієнт обирає перевізника залежно від того, куди саме потрібно доставити вантаж. При цьому компанії зобов'язані надавати конкурентам доступ до своїх колій на комерційних умовах («trackage rights»). Іноді окремі ділянки інфраструктури перебувають у спільній власності кількох операторів перевезення. Пасажирські перевезення майже повністю виконує державна компанія Amtrak, яка має законодавче право користуватися коліями вантажних компаній за регульовану досить низьку плату та отримує значні державні субсидії [7].

У європейській моделі, навпаки, здійснено чітке розділення інфраструктури та перевізників. Компанія-менеджер інфраструктури (наприклад, DB Netz у Німеччині, SNCF Réseau у Франції, Network Rail у Великобританії) володіє коліями, системами сигналізації, станціями та стягує плату за доступ із усіх операторів. Вантажні і пасажирські перевізники володіють власним рухомим складом - локомотивами та вагонами і конкурують між собою за право виконувати рейси на мережі інфраструктурного менеджера. Така система викликана для забезпечення недискримінаційного доступу до інфраструктури та організації максимальної конкуренції за право перевезення [8].

В європейських країнах активно функціонує мережа регулярних контейнерних поїздів, які курсують строго за розкладом. Їх відправлення здійснюється у чітко визначений час за «жорстким» графіком, навіть якщо склад заповнений не повністю.

Яскравим прикладом є шатл-поїзд

RailXpress, створений швейцарською компанією InnovaTrain AG. Основною задачею організації руху таких поїздів є оперативна доставка невеликих партій контейнерів і стандартних знімних кузовів («swap bodies») за фіксованим маршрутом у форматі змішаних автомобільно-залізничних перевезень. Ці поїзди є універсальними: локомотиви мають бі-модальну дизель-електричну тягу, тому можуть рухатися як по електрифікованих залізничних напрямках, так і неелектрифікованими під'їзними коліями. Це дає змогу безпосередньо подавати вагони на приватні термінали чи складські майданчики без перевантаження на інший вид транспорту. Ключовою технічною особливістю вагонів RailXpress є вбудована система горизонтального перевантаження. Завдяки спеціальним механізмам контейнери та знімні кузова можна переміщувати з платформи безпосередньо на автопричіп (і навпаки) без застосування кранів, що значно прискорює та здешевлює час термінальних операцій [9].

Американська залізнична компанія першого класу CSX Transportation (CSXT) створила сучасний транспортний коридор для перевезення двоповерхових контейнерних поїздів («double-stack») по території США. Для здійснення цих перевезень була проведена комплексна модернізація існуючої інфраструктури, яка полягала в підвищенні габариту верхньої будови колії, реконструкції мостів і тунелів, щоб під ними могли проходити поїзди з контейнерами, складеними у два яруси, а також розширення діючих станцій або будівництво нових інтермодальних терміналів. Новий коридор National Gateway створює швидкий і економічний маршрут доставки імпортованих контейнерних вантажів із великих портів Атлантичного узбережжя (Норфолк, Балтимор, Філадельфія тощо) у глибину країни до Середнього Заходу та далі. У зворотному напрямку потік формуватимуть експортні вантажі, насамперед зерно, вугілля, хімічна продукція та інші промислові товари. Така схема забезпечує збалансоване завантаження поїздів в обох напрямках, значно підвищуючи ефективність і рентабельність залізничних перевезень [10].

Для перевезення контейнерів у два яруси у США використовуються спеціалізовані вагони з заглибленою площадкою для їх установки. Це дозволяє перевозити по два контейнери на одній платформі з проходженням під мостами та в тунелях, що майже на 70 % підвищує ефективність інтермодальних перевезень та скорочує витрати, подвоюючи місткість на вагон. Цей метод, винайдений у США в 1984 році, є стандартним для

перевезення товарів по всій Північній Америці. За останні три десятиліття тарифні ставки на інтермодальні залізничні перевезення вантажів у США знизилися на 51 %. Головним драйвером такого падіння стала лібералізація ринку: з'явилася можливість укласти прямі конфіденційні контракти між вантажовідправником і оператором залізниці. Завдяки цьому залізничні компанії отримали змогу пропонувати гнучкі ціни, які успішно конкурують з автомобільними перевезеннями [11].

Між Європою та США існує фундаментальна різниця в підходах до формування тарифів з перевезення вантажів залізничним транспортом. Головна причина цього є власність інфраструктури: у США інфраструктура залізниць і рухомий склад належать приватним компаніям, тоді як у більшості країн ЄС ці елементи перебувають у державній власності.

У США так договірні тарифи формуються з двох основних складових: плати за доступ до залізничної інфраструктури та плати за безпосередньо надані перевізні послуги. Така модель дає змогу залізницям отримувати достатній дохід для модернізації та розширення своєї мережі і значно знижує ризик необґрунтованих скарг від вантажовідправників щодо рівня тарифів. У країнах ЄС основну роль в організації вантажопотоків виконують консолідаційні хаби, а також ефективний рух товарів від складських терміналів до кінцевих отримувачів. На контейнерних терміналах для виконання вантажно-розвантажувальних робіт використовуються портальні навантажувачі («reach stackers») та портальні крани.

Для України, яка має значну територію, розвинену мережу транспортних шляхів та суттєві регіональні відмінності у виробничій спеціалізації, особливо важливим є ефективне використання регіональних логістичних центрів.

Для власника вантажу головним фактором при виборі залізничного транспорту залишається гарантія безпечної та максимально швидкої доставки вантажу безпосередньо на склад одержувача.

Основний матеріал дослідження

Для залізничного транспорту як системи критерієм оптимальності виступає повне, якісне й оперативне задоволення всіх потреб вантажовласників у перевезеннях [12]. Цей критерій вимірюється кількісно за допомогою цілої низки різноманітних показників.

При плануванні вантажних перевезень в якості критеріїв оптимальності можливо застосувати наступні показники:

- мінімальна відстань перевезення або обсяг вантажообігу (тонно-кілометрів);
- мінімальні транспортні витрати на доставку вантажу;
- мінімізація сумарних виробничих та транспортно-складових витрат
- найкоротший час доставки вантажу.

Таким чином, вибір оптимального варіанту перевезення залежить від пріоритетного критерію, який встановлюється виходячи з конкретних задач логістики чи економіки підприємства. Залежно від мети та конкретних умов розв'язання оптимізаційної задачі, склад елементів витрат, які враховуються в цих показниках, а також характер їх використання можуть суттєво відрізнятися між собою.

Характерними ознаками оптимізаційної моделі є:

- наявність критерію оптимальності (цільової функції, яка виступає кількісним показником ефективності чи вигідності рішення);
- наявність системи обмежень (сукупності умов і вимог, що визначають область допустимих рішень, з-поміж яких обирається найкраще).

Впровадження прискорених контейнерних вантажних поїздів вважається одним із найперспективніших напрямів розвитку залізничного транспорту, однак цей проект є капіталомістким і технічно складним. Для його успішної реалізації необхідне глибоке економіко-фінансове обґрунтування та проведення якісного економічного аналізу, неможливого без попередньої оцінки тих змін у транспортно-експлуатаційних показниках вантажних перевезень, які будуть спричинені саме переходом на прискорений рух.

При цьому оцінювати слід не лише очевидні прямі параметри (зростання середньої швидкості руху поїздів, що впливає з технічних можливостей нових прискорених вантажних поїздів), а й низку похідних характеристик, які матимуть не менш важливе значення для кінцевої економічної ефективності проекту.

У проведеному авторами дослідженні аналізу впливу підвищення швидкості руху поїздів на характеристики вантажних перевезень було застосовано методи математичного моделювання. Зокрема, як основний інструмент дослідження обрано теорію масового обслуговування.

Система масового обслуговування (СМО) моделює процеси, в яких виникає випадковий потік заявок на обслуговування, а час їх обробки також має випадковий характер. Головна мета застосування такої моделі полягає в оцінці та

прогнозуванні пропускної спроможності системи, визначенні оптимальних способів організації процесу обслуговування, підвищенні його якості та розрахунку економічних витрат на основі відомостей про інтенсивність і характер вхідного потоку заявок.

Однією з ключових характеристик системи масового обслуговування є час, протягом якого заявка перебуває в черзі очікування. Цей час можливо зменшити шляхом збільшення кількості каналів (обслуговуючих пристроїв). Проте введення кожного нового каналу пов'язане з додатковими витратами, а водночас зростає частка часу простою цих пристроїв через брак заявок, що також вважається небажаним явищем.

У межах такої математичної моделі з'являється можливість формулювати й розв'язувати значно ширші класи задач. Йдеться не лише про аналіз того, як змінюються ключові характеристики системи зі зростанням швидкості руху контейнерних поїздів, а й про зворотні питання: наприклад, на скільки саме потрібно підвищити швидкість, щоб досягти заздалегідь визначених цільових значень цих характеристик. Зокрема, є можливість розраховувати, до якого рівня слід збільшити швидкість руху, щоб середній час очікування навантаження знизився до необхідного значення або щоб стала можливою оптимізація кількості задіяних складів.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування, можливо розв'язати задачу оптимізації, яка полягає в забезпеченні необхідного рівня якості обслуговування за найменших витрат, пов'язаних із простоями обслуговуючого обладнання.

Метою розробленої моделі є дослідження змін ключових показників логістики контейнерних перевезень: часу перебування вантажів у дорозі; тривалості очікування навантаження та розвантаження; а також інших пов'язаних параметри, задіяних при переході від швидкості традиційних перевезень до прискорених.

Виходячи з знайдених закономірностей, розроблено методику розв'язання практичних завдань з визначення параметрів прискорених перевезень, які забезпечують досягнення наперед заданих цільових характеристик руху поїздів.

Для теоретичного аналізу перевезень застосовано фундаментальні принципи системи масового обслуговування (СМО). Вантажні транспортні операції інтерпретовано як класичну СМО, в якій ключовими елементами є потоки запитів на послугу та механізми їх обробки. У рамках цієї математичної моделі СМО включає мережу паралельних сервісних каналів, які одночасно

виконують обробку вхідних запитів. Такі запити можуть перебувати в стані активної сервісної обробки або утворювати чергу в режимі очікування, що відображає динаміку реальних логістичних процесів. Цей підхід дозволяє кількісно оцінити ефективність, навантаження та потенційні вузькі місця в системі перевезень.

У розробленій моделі сервісами є прискорені чи звичайні вантажні поїзди, а заявками є «партії вантажів» – сукупності вантажів, що наповнюють один такий вантажний поїзд. Тобто вантажі розглядаються не індивідуально, а «груповим способом». Це пов'язано з тим, що на практиці прискорений рух вантажних поїздів буде досить дорогим і матиме сенс тільки при завантаженні таких поїздів близько до максимально можливого. Тому в моделі передбачено відправлення поїздів зі 100 % завантаженням. У такій ситуації розумно розглядати вантажі не індивідуально, а партіями вантажів. Тобто в якості заявки було розглянуто не окремі вантажі, а сукупність вантажів, що заповнюють один вантажний поїзд, таку сукупність називатимемо партією вантажів.

Отже, розроблена математична модель представлена у формі системи масового обслуговування типу $M/M/c/\infty$ (за стандартною нотацією Кендалла [13]). Це означає, що розглядається СМО з такими основними властивостями:

- вхідний потік заявок є пуассонівським, а часи обслуговування кожної заявки розподілені за експоненційним законом (тобто потік обслуговувань також пуассонівський);
- система обладнана с паралельними каналами (сервісами) обслуговування;
- місткість системи необмежена: загальна кількість заявок, які можуть одночасно перебувати як на обслуговуванні, так і в черзі очікування, є нескінченною.

Така модель дозволяє аналітично дослідити ключові характеристики багатоканальної системи з очікуванням за умови марковських потоків подій.

Окрім зазначеного, модель СМО додатково визначається двома ключовими параметрами: інтенсивністю надходження заявок λ та інтенсивністю обслуговування однією серверною одиницею μ .

По суті, це описує модель прискорених вантажних перевезень між двома ключовими транспортними хабами. Між цими пунктами регулярно курсують с вантажних поїздів.

Інтенсивність надходження вантажів на пункт відправлення становить у середньому $\lambda \cdot N$

одиниць за одиницю часу, де N – місткість одного вантажного поїзда.

Водночас один поїзд у середньому доставляє з пункту відправлення до пункту призначення $\mu \cdot N$ вантажів за той самий проміжок часу.

У моделі прискорених вантажних перевезень особливістю є підвищення інтенсивності обслуговування заявок одним каналом сервісу (μ).

Для вирішення поставленої задачі було поставлено наступні цілі:

- проаналізувати параметри двох СМО моделі $M/M/c/\infty$ з ідентичною інтенсивністю надходження запитів, але з відмінною інтенсивністю обслуговування одним каналом, тобто оцінити особливості руху вантажних поїздів під час переходу від стандартного режиму до прискореного;

- на базі виведених формул дослідити, як залежить кількість вантажних поїздів і тривалість простою обслуговуючих пристроїв від рівня інтенсивності обслуговування, тобто від темпу руху;

- визначити рівень інтенсивності обслуговування, який потрібен для забезпечення наперед заданої середньої тривалості перебування запиту в СМО, тобто розрахувати швидкість вантажного поїзда, необхідну для досягнення заздалегідь визначеного середнього часу транспортування вантажів;

- визначити рівень інтенсивності обслуговування, який забезпечить заздалегідь встановлений відсоток простою обслуговуючих засобів, тобто підрахувати швидкість руху, що дозволить досягти попередньо заданого відсотка простою вантажних поїздів;

- визначити рівень інтенсивності обслуговування, потрібний для досягнення заздалегідь заданої середньої тривалості перебування запиту в черзі, тобто розрахувати швидкість руху, яка забезпечить наперед визначену середню тривалість транспортування вантажів.

Системи масового обслуговування, які розглядалися в розробленій моделі даного типу, належать до класичних об'єктів дослідження в теорії черг. Для них вже давно розроблено та виведено стандартні математичні формули, що описують ключові характеристики ефективності функціонування системи.

Коефіцієнт завантаження системи розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

де: λ - інтенсивність надходження заявок,
 μ - інтенсивність їх обслуговування.

Тоді ймовірність того, що в СМО відсутні заявки (тобто система перебуває в порожньому стані), визначається за формулою

$$p_0 = \left(\sum_{n=0}^{c-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^c}{c!} \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho}{c}} \right) \right)^{-1} \quad (2)$$

Через цю можливість p_0 обчислюються основні функціональні властивості системи.

У теорії масового обслуговування (ТМО) середня кількість заявок у черзі розраховується за формулою:

$$L_q = \frac{\rho^{c+1}}{(c-1)! \cdot (c-\rho)^2} \cdot p_0 \quad (3)$$

Імовірність того, що в СМО знаходиться n заявок, обчислюється за формулами:

$$p_n = \frac{\rho^n}{n!} \cdot p_0, \text{ якщо } n \leq c \quad (4)$$

$$p_n = \frac{\rho^n}{c! \cdot c^{n-c}} \cdot p_0, \text{ якщо } n > c \quad (5)$$

Середня кількість заявок, що знаходяться в системі, розраховується за формулою:

$$L_s = L_q + \rho \quad (6)$$

Середня тривалість перебування заявки в системі та середня тривалість перебування заявки в черзі знаходяться за формулою Літтла [14]

$$L_s = \lambda \cdot W_s, \quad L_q = \lambda \cdot W_q \quad (7)$$

Середня тривалість перебування заявки в системі (тобто час від надходження заявки до завершення її обслуговування, включаючи можливе очікування в черзі) обчислюється за формулою Літтла [14]:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda}, \quad (8)$$

а середня тривалість перебування заявки у черзі обчислюється за формулою:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (9)$$

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід, який базується на системному аналізі та послідовному виконанні етапів. Основна ідея методології полягає в інтеграції теоретичних засад з практичними інструментами, що дозволяє ефективно вирішувати завдання з урахуванням специфіки об'єкта дослідження.

1. Аналіз та зіставлення ключових показників

двох СМО типу $M/M/c/\infty$ з ідентичною інтенсивністю надходження заявок, але відмінною інтенсивністю обслуговування одним каналом. Це дозволило оцінити зміни в характеристиках потоку вантажних поїздів під час переходу від традиційного вантажного сполучення до прискореного режиму.

У системі функціонують вантажні поїзди двох типів c : звичайні та прискорені. Вантажі прибувають на станцію для обробки партіями з постійною інтенсивністю λ партій за добу. Інтенсивність обслуговування однієї партії (що включає навантаження, транспортування, розвантаження та повернення поїзда на станцію) становить $\mu_{зв}$ партії за добу для одного звичайного вантажного поїзда та $\mu_{пр}$ партії за добу для одного прискореного вантажного поїзда.

Необхідно обчислити усі ключові параметри СМО, застосовуючи класичні формули з теорії масового обслуговування для вказаного різновиду СМО.

Для аналізу залежності ключових характеристик СМО від інтенсивності потоку обслуговування ми варіюватимемо цей параметр у діапазоні від $\mu_{зв}$ партії за добу до $\mu_{пр}$ партії за добу з кроком $\Delta\mu$ партій за добу.

2. Дослідження залежності числа вантажних поїздів та частки простою обладнання для обслуговування від інтенсивності потоку операцій обслуговування, зокрема від швидкості переміщення.

У тих випадках, коли необхідно розрахувати кількість вантажних поїздів, яка дозволить зменшити час обробки заявки в системі масового обслуговування до рівня $T_{доб}$. На основі проведеного аналізу необхідно зробити висновки щодо сильних і слабких сторін перевезень за допомогою прискорених вантажних поїздів у порівнянні з традиційними вантажними перевезеннями.

При аналізі задач такого типу виявлено, що зростання кількості каналів обслуговування (наприклад, поїздів у транспортній системі) призводить до збільшення числа одиниць, які залишаються без роботи. Цей показник описується відсотком простою каналів обслуговування (або засобів обслуговування), позначеним як X . Для його розрахунку спочатку визначено середню кількість зайнятих каналів c . Тоді відсоток простою розраховується за формулою:

$$X = \frac{c - \bar{c}}{c} \cdot 100 \quad (10)$$

Середню кількість працюючих каналів обслуговування можна обчислити як різницю між

середньою кількістю заявок у системі (L_s) та середньою кількістю заявок у черзі (L_q):

$$\bar{c} = L_s - L_q \quad (11)$$

Однак середнє число заявок, які перебувають у СМО, позначається як L_s і обчислюється за відомою формулою Літтла [14]:

$$L_s = L_q + \rho, \text{ де } \rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (12)$$

У підсумку, отримуємо вираз для визначення рівня простою техніки у відсотках:

$$X = \left(1 - \frac{\lambda}{c \cdot \mu}\right) \cdot 100 \quad (13)$$

На підставі наведеної формули виконані розрахунки для визначення відсотка простою обладнання обслуговування X .

Для виконання поставленої задачі в моделі змінювали кількість поїздів c в системі.

3. Дослідження необхідної інтенсивності процесу обслуговування для забезпечення наперед визначеного середнього часу перебування заявки в СМО, що еквівалентно аналізу потрібної швидкості переміщення вантажів задля досягнення заздалегідь установленого середнього терміну їх знаходження під час транспортування.

В тому випадку, коли зменшуємо середню тривалість перебування заявки до СМО до T діб. Визначимо, якою має бути інтенсивність потоку обслуговування μ для досягнення цієї мети.

Ця задача вирішується шляхом варіювання інтенсивності потоку обслуговування μ за допомогою декількох ітерацій. Обчислення проводилися на основі формули для середньої тривалості перебування заявки у СМО W_s за формулою (8) з урахуванням формули (12). Середня кількість заявок у черзі знаходиться за формулою (3).

Це дослідження дало змогу сформулювати висновки щодо переваг або недоліків транспортування вантажів прискореними вантажними поїздами в порівнянні зі стандартними вантажними складами.

4. Дослідження необхідної інтенсивності потоку обслуговування для забезпечення заздалегідь встановленого рівня простою обслуговуючих пристроїв, а саме визначення потрібної швидкості руху, яка гарантує досягнення заданого відсотка простою вантажних поїздів.

В проведених дослідженнях проведено аналіз щодо визначення, якою повинна бути інтенсивність обслуговування μ , аби частка простою ресурсів обслуговування (поїздів) X залишалася

в межах заданої межі. На основі цього вивчення сформульовані висновки стосовно сильних і слабких сторін транспортування вантажів прискореними поїздами в порівнянні з традиційними вантажними поїздами.

Відсоток простою засобів обслуговування (поїздів) X обчислюється за допомогою формули (13). Для цього було розв'язано цю задачу, змінюючи інтенсивність потоку обслуговування за допомогою кількох ітераційних кроків.

Дослідження проблеми визначення необхідної інтенсивності каналу обслуговування для забезпечення наперед заданої середньої тривалості очікування заявки в черзі, а саме - обчислення мінімальної швидкості транспортного потоку, яка гарантує досягнення попередньо визначеного середнього часу перебування вантажів під час їх перевезення.

5. Уявімо ситуацію, коли необхідно встановити середній час очікування заявки в черзі на рівні $W_q = T$ діб. Визначено, яка саме інтенсивність процесів обслуговування потрібна для реалізації цієї задачі. Базуючись на результатах проведеного аналізу, сформульовано висновки щодо сильних і слабких сторін СМО з використанням прискорених вантажних поїздів у порівнянні з СМО, що застосовує стандартні вантажні поїзди.

Ця задача розв'язується за допомогою змінювання інтенсивності потоку обслуговування μ шляхом виконання кількох ітерацій. Розрахунки здійснювалися за допомогою використання формул (2, 3, 9) для середнього часу очікування заявки в черзі W_q .

Розглянемо приклад вирішення поставленої задачі за допомогою розробленої моделі.

Проведемо аналіз організації вантажних перевезень між парою логістичних центрів, які мають наступні параметри:

- кількість вантажних поїздів у системі (прискорених або звичайних): $c=2$;
- інтенсивність вхідного потоку: $\lambda = 0,9$ партій за добу, тобто в середньому за добу прибуває 0,9 партій вантажів;
- інтенсивність потоку обслуговувань звичайним вантажним поїздом: $\mu_{зв} = 0,5$ партій на один поїзд за добу, тобто в середньому звичайному вантажному поїзду на навантаження, доставку, розвантаження та повернення у вихідний пункт потрібно 2 доби;
- інтенсивність потоку обслуговувань прискореним вантажним поїздом: $\mu_{пр} = 2$ партій на один поїзд за добу, тобто в середньому прискореному вантажному поїзду на навантаження, доставку, розвантаження та повернення у вихідний

пункт необхідно 0,5 добу;

- межі зміни інтенсивності потоку обслуговувань: від $\mu_{зв} = 0,5$ партій за добу до $\mu_{пр} = 2$ партій за добу з кроком $\Delta\mu = 0,15$ партій за добу.

Мета дослідження: провести аналіз і зіставлення ключових показників двох СМО моделі $M/M/c/\infty$, які мають ідентичну інтенсивність надходження заявок, але відрізняються швидкістю обробки одним каналом. Це дозволяє оцінити, як змінюються параметри ефективності при організації вантажних перевезень у разі переходу від стандартного режиму руху до прискореного.

Результати обчислень, отримані за допомогою програмного забезпечення PTC Mathcad Prime 3.0, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння головних показників СМО для різних інтенсивностей обслуговування

Інтенсивність потоку обслуговування (μ)	Ймовірність надходження в СМО 0 заявок (p_0)	Середня кількість заявок у черзі (L_q)	Середня кількість заявок, в системі (L_s)	Середня тривалість перебування заявки у черзі (W_q)	Середня тривалість перебування заявки у системі (W_s)
0,50	0,053	7,674	9,474	8,526	10,526
0,65	0,182	1,274	2,659	1,416	2,955
0,80	0,280	0,521	1,646	0,579	1,829
0,95	0,357	0,274	1,221	0,305	1,357
1,10	0,419	0,164	0,983	0,183	1,092
1,25	0,471	0,107	0,827	0,119	0,919
1,40	0,514	0,074	0,717	0,082	0,797
1,55	0,550	0,053	0,634	0,059	0,705
1,70	0,581	0,040	0,569	0,044	0,633
1,85	0,609	0,031	0,517	0,034	0,575
2,00	0,633	0,024	0,474	0,027	0,527

На основі цих розрахункових даних збудуємо графіки (див. рис. 1-3).

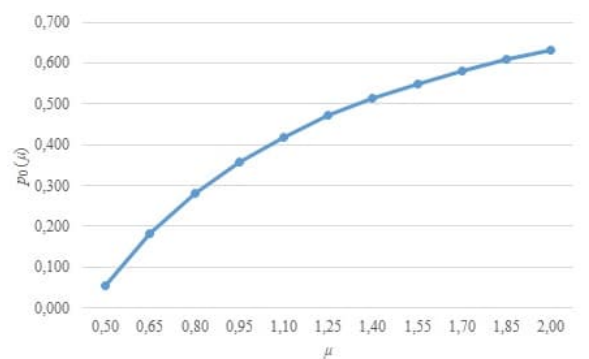


Рис. 1. Залежність ймовірності того, що у СМО знаходиться 0 заявок p_0 від інтенсивності потоку обслуговувань одним сервісом (вантажним поїздом) μ

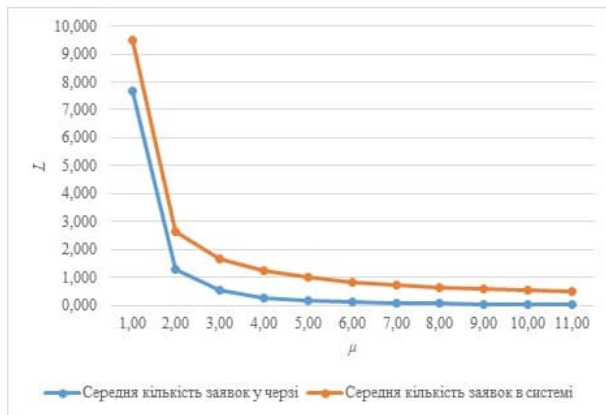


Рис. 2. Залежність середньої кількості заявок у черзі L_q та системі L_s від інтенсивності потоку обслуговувань одним сервісом (вантажним поїздом) μ

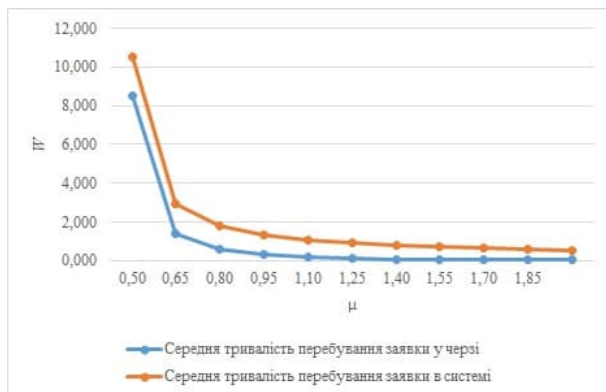


Рис. 3. Залежність середньої тривалості перебування заявки в черзі W_q та системі W_s від інтенсивності потоку обслуговувань одним сервісом (вантажним поїздом) μ

Як видно з рис. 1, зі зростанням інтенсивності обслуговування одним сервером імовірність відсутності заявок у системі (тобто $n=0$) монотонно збільшується та досягає свого максимального значення при $\mu=2$.

Як впливає з рис. 2, при збільшенні інтенсивності потоку обслуговувань одним поїздом середня кількість вимог у черзі L_q та в системі L_s монотонно знижується, досягаючи найменшого значення при $\mu=2$.

Як видно з рис. 3, зі зростанням інтенсивності обслуговування одним поїздом середня кількість заявок у черзі W_q та системі W_s стабільно знижується і досягає мінімального значення при $\mu=2$.

На підставі аналізу табл. 1 та рис. 1–3 можна зробити висновок, що СМО із застосуванням прискорених вантажних поїздів перевершує СМО зі звичайними вантажними поїздами за низкою важливих показників і має виражені переваги:

- помітно нижчі значення середньої довжини черги (L_q), загальної кількості заявок у системі

- (L_s), середнього часу очікування в черзі (W_q) та середнього часу перебування в системі (W_s);

- набагато більша імовірність (p_0) того, що в системі наразі відсутні заявки.

Наукова новизна і практична значимість

У якості наукової новизни у статті представлено новий підхід до визначення розподілення швидкостей руху контейнерних поїздів між собою при інтермодальних перевезеннях

У межах запропонованої математичної моделі з'являється можливість формулювати й розв'язувати значно ширші класи задач. Йдеться не лише про аналіз того, як змінюються ключові характеристики системи зі зростанням швидкості руху контейнерних поїздів, а й про зворотні питання: на скільки саме потрібно підвищити швидкість, щоб досягти заздалегідь визначених цільових значень цих характеристик. Зокрема, є можливість розраховувати, до якого рівня слід збільшити швидкість руху, щоб середній час очікування навантаження знизився до необхідного значення або щоб стала можливою оптимізація кількості задіяних складів

Висновки

У статті запропоновано методичний підхід до оцінки змін ключових показників інтермодальних вантажних перевезень при переході від звичайного до прискореного режиму руху поїздів. Йдеться про такі характеристики, як середня швидкість доставки вантажу, середній час очікування навантаження, середня кількість поїздів, що перебувають у простоті, та інші подібні параметри.

Оснoву розробленої методики становлять положення теорії масового обслуговування. За її допомогою виявлено загальні математичні закономірності, які описують, як змінюються зазначені показники при впровадженні прискорених вантажних перевезень.

У ході дослідження вирішені наступні основні задачі:

- проведено порівняльний аналіз змін основних показників обслуговування вантажних перевезень при переході від традиційних до прискорених вантажних перевезень;

- досліджено залежність кількості вантажних поїздів та відсотка простою засобів обслуговування від швидкості руху поїздів, а також визначено необхідну кількість вантажних поїздів для забезпечення заданого середнього часу доставки вантажів;

- проаналізовано, яка швидкість руху поїздів потрібна для досягнення наперед встановленого

допустимого рівня простою вантажних поїздів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Левковець П. Р., Шульга С. В. Проблеми здійснення транспортно-експедиційної діяльності в Україні. *Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів*. 2003. № 17. С. 96–101.
2. Левченко О. П. Розвиток транспортно-експедиційної діяльності в Україні. *Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту. Серія "Економіка і управління"*. 2005. № 7. С. 93–97.
3. Брайковська А. Бенчмаркінг у сфері організації вантажних перевезень у змішаному сполученні. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту: Серія «Економіка і управління»*. 2012. Т. 2, № 21-22. С. 104–117.
4. Марінцева К. В. Аналіз транспортної та логістичної інфраструктури України. *Матеріали дев'ятонадцятій всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал української науки - XXI сторіччя»*. URL: <http://nauka.zinet.info/19/marintseva.php> (дата звернення: 23.12.2025).
5. Артеменко А. Н. Совершенствование транспортно-экспедиторского обслуживания предприятий и организаций на примере автомобильного транспорта общего пользования Украины. г. Киев : Автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. экономичес. наук, 1993. 19 с.
6. Панченко С. В., Лаврухин О. В., Котенко А. М. Математична модель руху контейнерних поїздів напрямку Україна – Китай на принципах глобальної логістики. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*.

2016. № 160. С. 5–10.

7. Wang X. Operational Transportation Planning of Modern Freight Forwarding Companies: Vehicle Routing Under Consideration of Subcontracting and Request Exchange. *Springer Fachmedien Wiesbaden, Imprint: Springer Gabler*. 2014. 180 p.

8. Annual trends of the transport forum. *International Transport Forum*. URL: <https://www.itf-oecd.org/> (date of access: 20.09.2025).

9. Railjet Xpress Train. *About Railjet Xpress Trains*. URL: <https://rail.ninja/train/railjet-xpress-train> (date of access: 20.09.2025).

10. Davis L. Intermodal railway success stories. *CSX*. URL: <https://www.intermodal.com/> (date of access: 21.09.2025).

11. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. *T&F eBooks*. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003343196/geography-transport-systems-jean-paul-rodrigue> (date of access: 28.09.2025).

12. Статут залізниць України. *Постанова Кабінету міністрів України №457*. URL: <https://qdpro.com.ua/export/document/8009> (дата звернення: 05.10.2025).

13. Goethals P., Scala N., Bennett D. Mathematics in Cyber Research. *T&F eBooks*. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9780429354649/mathematics-cyber-research-paul-goethals-natalie-scala-daniel-bennett> (date of access: 05.10.2025).

14. Leon-Garcia A. Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering : textbook. 3rd ed. Toronto : Pearson Education, Inc, 2008. 818 p.

Надійшла в редколегію 01.10.2025

Прийнята до друку 11.12.2025

O. PAKHOV, R. KOMPANIETS, M. SERHIENKO

MATHEMATICAL MODELING OF THE CONTAINER TRANSPORTATION PROCESS FOR THE PURPOSE OF ITS OPTIMIZATION

Container transportation is a key element of modern intermodal transport schemes in global trade. The tasks associated with the modeling of container transportation are becoming increasingly **relevant**. The **purpose** of the modeling is to study changes in key indicators of container transportation logistics: cargo transit time; loading and unloading waiting times; as well as other related parameters involved in the transition from the speed of traditional transportation to accelerated ones. Thus, the choice of the optimal transportation option depends on the priority criterion, which is established based on specific logistics or economic problems of the enterprise. Depending on the purpose and specific conditions for solving the optimization problem, the composition of cost elements taken into account in these indicators, as well as the nature of their use, may differ significantly from each other. The proposed **methodology** is based on a mass service system that models processes in which a random flow of service requests occurs, and the time for their processing is also random. The main purpose of using such a model is to assess and predict the system's throughput, determine the optimal ways to organize the service process, improve its quality, and calculate economic costs based on information on the intensity and nature of the incoming flow of applications. As a **scientific novelty**, the article presents a new approach to determining the distribution of container train speeds among themselves during intermodal transportation. **Results**. The following main tasks were solved during the study: a comparative analysis of

changes in the main indicators of freight service during the transition from traditional to accelerated freight transportation was carried out; the dependence of the number of freight trains and the percentage of downtime of service facilities on the speed of trains was studied, and the required number of freight trains was determined to ensure a given average cargo delivery time; the speed of trains required to achieve a predetermined permissible level of freight train downtime was analyzed. **Practical significance.** Within the framework of the proposed mathematical model, it becomes possible to formulate and solve much wider classes of problems. This concerns not only the analysis of how the key characteristics of the system change with the increase in the speed of container trains, but also the inverse questions: how much exactly the speed needs to be increased in order to achieve the predetermined target values of these characteristics. In particular, it is possible to calculate to what level the speed should be increased so that the average waiting time for the load decreases to the required value or so that the optimization of the number of warehouses involved becomes possible.

Keywords: intermodal transportation, container transportation, mass service system, speed of movement, freight forwarding service.

УДК 629.423:[621.355:621.333.41]

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, А. О. СКАЧКОВ^{2*}

^{1*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта a.m.afanasyov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта lskachkovl@gmail.com, ORCID 0009-0001-2423-8377

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З БОРТОВИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. Метою наукового дослідження є проведення загального енергетичного аналізу електричної тяги автономного електропоїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем та планом колії. Для автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами нормування витрат електроенергії на тягу та оптимізація режимів руху є особливо актуальними. На даний час відомий цілий ряд наукових робіт, в яких зазвичай розглядаються методи нормування витрат електроенергії на тягу на основі результатів тягових розрахунків. Таки методи передбачають наявність кривих руху електропоїзда на дільниці. Задачею даного дослідження була розробка методики нормування витрат електроенергії на тягу без побудови таких кривих, а тільки за параметрами профілю та плану дільниці експлуатації. Дослідження, спрямовані на визначення енергетичних показників експлуатації автономних електропоїздів є актуальними. **Методи.** Методологічною основою наукового дослідження є загальні теоретичні положення теорії електричної тяги. Аналіз енергетичних характеристик електропоїзду проведено на основі відомих методів визначення питомих опорів руху та питомих витрат електроенергії на тягу. Обґрунтування методики визначення питомих витрат електроенергії на тягу виконано з використанням відомих методів математичного аналізу. Для визначення ступеню коректності запропонованої методики проведено розрахунки витрат електроенергії на тягу для умовної дільниці колії з загальними параметрами профілю та плану колії, що відповідають загальним параметрам реальної дільниці Львів – Мукачеве. **Результати.** В результаті проведеного аналізу показано, що питомі витрати електроенергії на тягу електропоїздів можуть бути представлені у вигляді функції від питомих опорів руху та приведених до пробігу витрат електроенергії на власні потреби. При цьому повні витрати електроенергії на тягу можуть бути оцінені з достатньою точністю без проведення самих тягових розрахунків, тільки за результатами аналізу профілю і плану колії ділянки. В науковій роботі отримані теоретичні залежності, за допомогою яких може бути проведено оцінка впливу на загальні витрати електроенергії частоти зупинок електропоїзда на дільниці. Зазначено, що обмеження використання рекуперативного гальмування при високих швидкостях руху автономних електропоїздів можуть бути істотними при наявності відповідних обмежень потужності заряду накопичувача електроенергії. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику нормування витрат електроенергії на тягу електропоїзда, використання якої потребує наявності лише загальних параметрів профіля та плану колії дільниці експлуатації. Отримані характеристики, використання яких дозволяє визначити додаткові витрати електроенергії, обумовлені використанням механічного гальмування на проміжних зупинках електропоїзду. **Практична значимість.** Запропонована методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів може бути використана при проектуванні автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії, зокрема – для визначення параметрів самих накопичувачів та перетворювачів енергії.

Ключові слова: електропоїзд, накопичувач електроенергії, тяга, рекуперативне гальмування, питомі витрати електроенергії, основний опір руху, механічне гальмування.

Вступ

Наявність неелектрифікованих ділянок у мережі залізниць України потребує використання автономного тягового та моторвагонного рухомого складу. В даний час ця проблема вирішується за рахунок експлуатації тепловозів та дизель-поїздів. Відсутність на даний час у парку автономного рухомого складу акумуляторних

електровозів та електропоїздів пояснюється, в основному, високою собівартістю та низькими енергетичними показниками сучасних електрехімічних джерел енергії. Незважаючи на високий к. к. д. споживачів електроенергії в залізничному секторі, виробники прагнуть до подальшого вдосконалення електрорухомого складу [1]. Їхні головні зусилля спрямовані на зменшення питомих витрат електроенергії на тягу,

заміну дизельного автономного рухомого складу на електротранспорт, обмеження впливу повітряної інфраструктури електрифікованих залізниць [2]. Використання бортових джерел електроенергії на залізничних транспортних засобах стало популярним рішенням серед виробників сучасного електрорухомого складу [1-5].

Аналіз історії та перспектив розвитку електрохімічних джерел показує, що у найближчому майбутньому застосування таких накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі буде економічно доцільним та порівнянним за енергетичними показниками з існуючим варіантом живлення тягового електроприводу від контактної мережі [6-8]. При цьому основною проблемою живлення тягового електроприводу від електрохімічних джерел залишатиметься обмеження потужності розряду та заряду накопичувача (батарей) [9-11]. Режим пуску та зупинного електричного гальмування вимагають відбору та повернення енергії зі значеннями потужності, на порядок більшими, ніж у режимах руху електропоїзда, що встановилися [12-15]. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок застосування додаткових накопичувачів енергії високої потужності, а саме – іоністорів [11].

Мета дослідження

Метою наукового дослідження є проведення загального енергетичного аналізу електричної тяги автономного електропоїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем та планом колії. Результатом даного аналізу має бути спеціальна методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів лише за параметрами профілю та плану дільниці експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В цілому ряді існуючих публікацій проведено загальний огляд існуючих викликів у сфері залізничних перевезень з використанням електрорухомого складу [1-3]. Автори таких досліджень заглиблюються в сферу нових технологій електропостачання та бортових систем перетворення електроенергії для живлення електричних двигунів різних типів. В якості ключових при цьому розглядаються питання забезпечення надійності електричного транспорту та енергоефективності перевезень [4-8]. До найбільш характерних належать такі інноваційні технічні рішення, як системи на основі альтернативних джерел енергії, системи з

водневими паливними елементами та технології зберігання енергії, спрямовані на використання кінетичної енергії рухомого складу [8-11].

На даний час залишаються актуальними питання оптимізації режимів руху поїздів та нормування витрат електроенергії на тягу [13-15]. В більшості наукових робіт зазвичай розглядаються методи нормування витрат електроенергії на тягу на основі результатів тягових розрахунків. Таки методи передбачають обов'язкову наявність кривих руху електропоїзда на дільниці [13,14].

Загальний енергетичний аналіз електричної тяги автономного електропоїзда

Проведемо загальний енергетичний аналіз електричної тяги поїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем, до складу якого входять елементи з ухилами, відмінними і за модулем, і за знаками.

Найбільш раціональним з точки зору мінімуму витрат електроенергії при заданих значеннях довжини ділянки і часу її проходження електропоїздом є режим, що відповідає кривій швидкості, наведеній на рис. 1 [13].

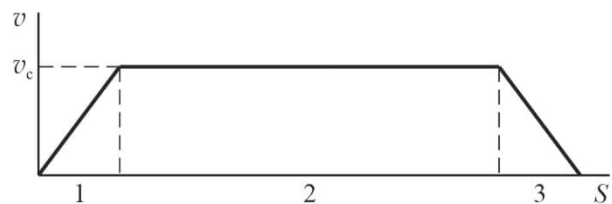


Рис. 1. Крива швидкості електропоїзда

Ділянка 1 являє собою пуск електропоїзда з постійним прискоренням, ділянка 2 – рух з постійною швидкістю v_c , а ділянка 3 – гальмування з постійним уповільненням.

Аналітично значення загальної корисної енергії, необхідної для забезпечення руху електропоїзда по ділянці, може бути оцінено у вигляді суми корисної роботи з подолання всіх сил опору руху та корисної енергії на покриття витрат на власні потреби [13]:

$$A = A_t + A_{вп},$$

де A_t – корисна робота з подолання всіх сил опору руху;

$A_{вп}$ – корисна енергія на покриття витрат на власні потреби.

Витрати електроенергії на власні потреби визначаються у вигляді [14]:

$$A_{вп} = a_{вп} \cdot T, \quad (1)$$

де $a_{\text{вп}}$ – питомі витрати електроенергії на власні потреби, які, по суті, являють собою середнє значення потужності кіл власних потреб;

T – загальний час проходження дільниці електропоїздом.

Точний розрахунок витрат електроенергії на тягу вимагає наявності кривих швидкості, струму і часу, побудованих для відомого режиму руху електропоїзда з відомими характеристиками по заданому профілю. Однак для попередніх оціночних розрахунків можуть бути використані методи визначення загальних витрат електроенергії на тягу за відомими питомими значеннями окремих її складових.

У загальному вигляді значення корисної роботи з подолання всіх сил опору руху електропоїзда можна представити як:

$$A_t = A_w + A_i + A_r + A_B, \quad (2)$$

де A_w – корисна робота з подолання сил основного опору руху;

A_i – корисна робота з подолання сил додаткового опору від підйомів (спусків);

A_r – корисна робота з подолання сил додаткового опору від кривих;

A_B – корисна робота з покриття втрат від використання механічного гальмування.

Необхідно зазначити, що робота A_i може мати як позитивний, так і негативний знак. При русі на підйомах $A_i > 0$, при русі на спусках $A_i < 0$.

У разі, якщо на електропоїзді застосовується рекуперативне гальмування, що забезпечує практично повну його зупинку, складова A_B з припустимим ступенем спрощення може бути прийнята рівною нулю: $A_B = 0$. Питання впливу частоти зупинного механічного гальмування електропоїзда без застосування рекуперації на загальні питомі витрати електроенергії на тягу розглянемо нижче.

Складові роботи A_t у виразі (2) можуть бути знайдені у вигляді:

$$A_w = a_w \cdot M \cdot S; \quad (3)$$

$$A_i = a_i \cdot M \cdot S; \quad (4)$$

$$A_r = a_r \cdot M \cdot S, \quad (5)$$

де a_w , a_i і a_r – питомі роботи з подолання основного та додаткового опору руху відповідно;

M – маса електропоїзда;

S – довжина ділянки, пройденої електропоїздом.

В експлуатації на залізницях України питомі витрати електроенергії, приведена до одиниці

маси і пройденого шляху, вимірюються або в $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, або в $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{10^4 \cdot \text{т} \cdot \text{км}}$. При проведенні даного енергетичного аналізу доцільніше буде використовувати одиницю виміру питомих значень роботи та електроенергії $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Використання такої одиниці виміру дозволить в подальшому аналізі позбутися від додаткових коефіцієнтів, що ускладнюють аналітичні вирази.

Для зручності подальшого аналізу представимо вираз (1) для витрат електроенергії на власні потреби у вигляді, аналогічному (3) – (5):

$$A_{\text{вп}} = a'_{\text{вп}} \cdot M \cdot S, \quad (6)$$

де $a'_{\text{вп}}$ – питомі витрати електроенергії на власні потреби, приведені до одиниці маси і пройденого шляху, залежні від середньої швидкості електропоїзда на ділянці $v_{\text{ср}}$.

Параметри $a'_{\text{вп}}$ і $a_{\text{вп}}$ пов'язані між собою виразом:

$$a'_{\text{вп}} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot a_{\text{вп}}}{M \cdot v}.$$

Значення параметру $a_{\text{вп}}$ для сучасних електропоїздів, що складаються з 8-10 вагонів, знаходиться в межах $4 \div 5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{хв}}$, що для середньої

маси електропоїзда $400 \div 500$ т і середньої швидкості руху на ділянці 20 м/с (72 км/год) відповідає зміні значення $a'_{\text{вп}}$ в межах $24 \div 30 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Залежність $a'_{\text{вп}} = f(v)$, отримана з умов $a_{\text{вп}} = 5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{хв}}$ і $M = 500$ т, наведена на рис. 2.

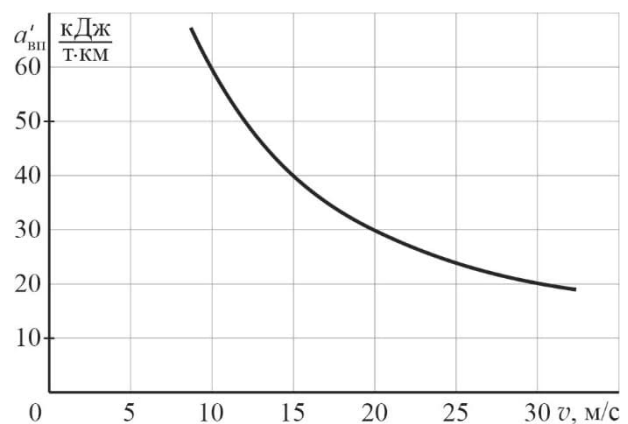


Рис. 2. Залежність питомих витрат на власні потреби від швидкості руху

В такому вигляді цю залежність можна використовувати і для електропоїздів іншої складності.

З урахуванням виразів (2) – (6) загальна корисна робота, здійснювана на ділянці, може бути визначена у вигляді:

$$A = (a_w + a'_{\text{вп}} + a_i + a_r) \cdot S \cdot M = \bar{a} \cdot S \cdot M, \quad (7)$$

де $\bar{a}$ – питома сумарна корисна робота на подолання всіх сил опору і покриття витрат електроенергії на власні потреби.

Питома корисна робота на подолання сил основного опору руху, виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, може бути знайдена у вигляді [14]:

$$a_w = w_{\text{ос}},$$

де $w_{\text{ос}}$ – середньозважений питомий опір руху на ділянці, вимірюваний в $\frac{\text{Н}}{\text{т}}$.

Середній за шляхом питомий опір руху може бути представлений як:

$$w_{\text{ос}} = \frac{1}{S} \int_0^S w_0(v) dS,$$

де w_0 – питомий основний опір руху, який залежить від швидкості.

Для режиму руху, представленого на рис. 1, можна припустити, що:

$$w_0 = w_0(v_c) = \text{const}.$$

Відтак можна прийняти:

$$w_{\text{ос}} = w_0(v_c);$$

$$a_w = w_0(v_c).$$

Наприклад, для електропоїзда ЕПЛ2^Т залежність $w_0(v)$ має вигляд [14]:

$$w_0 = 11 + 0,12v + 0,00267v^2. \quad (8)$$

У формулі (8) параметр w_0 вимірюється у $\left[\frac{\text{Н}}{\text{т}}\right]$, а швидкість v у км/год.

Питоме значення корисної роботи з подолання сил додаткового опору від підйомів (спусків), виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, може бути знайдено у вигляді [13]:

$$a_i = \frac{\sum a_{ij} \cdot S_j}{\sum S_j} = \frac{\Delta H g}{S},$$

де ΔH – перепад висот на загальній довжині ділянки S ;

S_j – довжина ділянки j з постійним ухилом i ;

g – прискорення вільного падіння;

a_{ij} – питома корисна робота з подолання сил додаткового опору від підйому j з постійним

ухилом i , виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, яка визначається у

вигляді:

$$a_{ij} = g \cdot i,$$

де i – величина ухилу в %.

Питома корисна робота з подолання сил опору від k кривих з різними радіусами може бути визначена у вигляді [13]:

$$a_r = \frac{\sum a_{rk} \cdot S_{rk}}{S}, \quad (9)$$

де a_{rk} – питома корисна робота з подолання сил додаткового опору від кривої k довжиною S_{rk} , визначається за формулою:

$$a_{rk} = w_{rk},$$

де w_{rk} – питомий опір руху від кривої k , вимірюваний в $\frac{\text{Н}}{\text{т}}$, який визначається у вигляді [13]:

$$w_{rk} = g \cdot \frac{700}{R_k}, \quad (10)$$

де R_k – радіус кривої k .

Об'єднавши формули (9) і (10), після заміни і перетворень отримаємо вираз для a_r у вигляді:

$$a_r = 700 \cdot g \cdot \alpha_r, \quad (11)$$

де α_r – параметр, що характеризує еквівалентну кривизну ділянки S , яка включає в себе k кривих певної довжини S_{rk} і певного радіуса R_k . Значення α_r може бути знайдено за формулою [13]:

$$\alpha_r = \frac{1}{S} \sum \frac{S_k}{R_k}. \quad (12)$$

Необхідно зазначити, що вираз (11) є емпіричним і при обчисленні параметра α за формулою (12) значення S_k , S і R_k задаються в метрах.

Приклад розрахунку повної корисної роботи по переміщенню автономного електропоїзда

Для прикладу розглянемо варіант руху електропоїзда на підйомі довжиною 10 км з ухилом 10 % і еквівалентним радіусом кривих 500 м (варіант 1). Швидкість руху на ділянці приймемо

постійною (рис. 1) і рівною $v_c = 20$ м/с (72 км/год).

Значення питомих корисних робіт, що входять до виразу (7), отримані в результаті розрахунків, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Значення питомих корисних робіт
при $i = 10\%$ і $R = 500$ м**

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	100	14	30	178

Загальна питома корисна робота з переміщення електропоїзда в такому режимі буде $178 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $50 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Результати розрахунку тих же питомих корисних робіт для варіанту руху електропоїзда з тією ж швидкістю 20 м/с (72 км/год) на прямій горизонтальній ділянці ($a_i = 0$; $a_r = 0$) наведені в таблиці 2 (варіант 2).

Таблиця 2

Питомі значення корисної роботи при $i = 0$ і $R = \infty$

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	0	0	30	64

Загальне питома значення корисної роботи в такому режимі становитиме $64 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $18 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Результати розрахунку тих же питомих корисних робіт для варіанту руху електропоїзда на спуску з ухилом 10 ‰ і тим же планом колії, що і у варіанті 1, наведені в таблиці 3 (варіант 3). Загальна питома корисна робота для варіанту 3 становитиме $-22 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $-6 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Таблиця 3

**Питомі значення корисної роботи
при $i = -10\%$ і $R = 500$ м**

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	-100	14	30	-22

Тобто при русі на такому спуску буде відбуватися накопичення електроенергії в накопичувачі в результаті рекуперативного гальмування [16-18].

У таблиці 4 наведено результати розрахунку складових загальної корисної роботи, що йде на подолання сил опору і покриття витрат на власні потреби вагона електропоїзда масою $M = 60$ т для трьох варіантів руху по ділянці довжиною $S = 10$ км. На рисунках 3 і 4 залежності $A = f(S)$ для варіантів 1 і 3 відповідно представлені графічно.

Таблиця 4

**Результати розрахунку складових загальної
корисної роботи для $S = 10$ км і $M = 60$ т**

Параметр		A_w	A_i	A_r	$A_{вп}$	ΣA
Варіант 1	МДж	20,4	60	8,4	18	107
	кВт·год	5,7	17	2,3	5	30
Варіант 2	МДж	20,4	0	0	18	38,4
	кВт·год	5,7	0	0	5	10,7
Варіант 3	МДж	20,4	-60	8,4	18	-13,2
	кВт·год	5,7	-17	2,3	5	-3,7

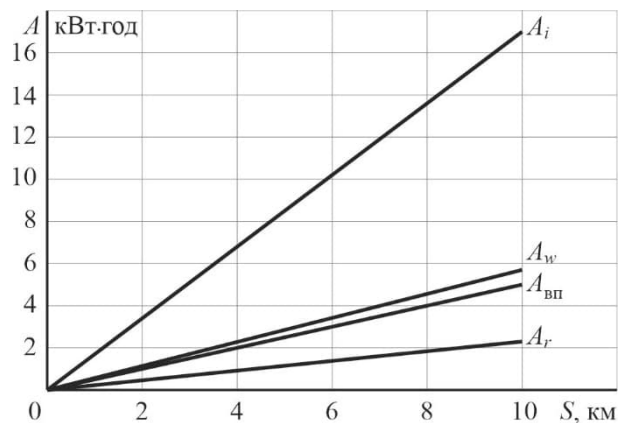


Рис. 3. Залежності складових загальної корисної роботи від пробігу для варіанту 1 (режим тяги на підйомі)

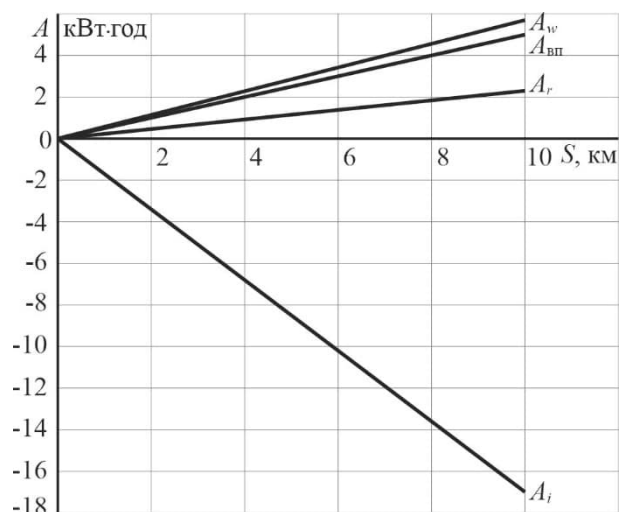


Рис. 4. Залежності складових загальної корисної роботи від пробігу для варіанту 3 (режим рекуперації на спуску)

З даних таблиці 4 та графіків на рис. 3, 4 можна зробити висновок про те, що загальна питома корисна робота по переміщенню електропоїзда істотно залежить від профілю колії. При проходженні ділянки з будь-яким перепадом висот профілю з використанням рекуперації на спусках загальна корисна робота по переміщенню електропоїзда буде визначатися різницею висот на початку і в кінці ділянки.

Розглянемо варіант руху електропоїзда на умовній ділянці довжиною 200 км, профіль якої наведено на рис. 5.

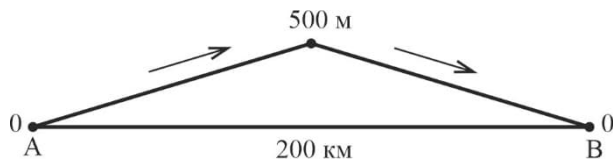


Рис. 5. Профіль умовної ділянки

Даний умовний профіль ділянки довжиною 200 км характеризується рівністю висот точок А і В і максимальним перепадом висот в середині ділянки 500 м. Приблизно така ж довжина і такий перепад висот відповідає ділянці Львів – Мукачєво Львівської дороги, яка проходить через перевал Бескид. Необхідно зазначити, що в реальності на даній ділянці величини ухилів підйомів і спусків змінюються в дуже широких межах і за модулем досягають значення майже 30 %.

Еквівалентні значення ухилів на підйомі і спуску на всій ділянці, показані на рис. 5, будуть дорівнювати відповідно 5 і –5 %. Значення корисної роботи з подолання основного і додаткового опору руху одного вагона електропоїзда масою 60 т, а також на покриття витрат електроенергії на власні потреби, розраховані для даної умовної ділянки, наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Значення корисної роботи з подолання сил опору руху та покриття витрат електроенергії на власні потреби

Параметр		A_w	A_i	A_r	$A_{вп}$	ΣA
Підйом	МДж	204	300	84	180	768
	кВт·год	57	83	23	50	213
Спуск	МДж	204	-300	84	180	168
	кВт·год	57	-83	23	50	47

Результуюче питома значення корисної роботи на підйомі буде дорівнювати $35,5 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$,

а на спуску – $7,8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$. Середнє питома значення корисної роботи на всій ділянці буде дорівнювати $22 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Слід зауважити, що для проходження такої ділянки в накопичувачі кожного вагона попередньо має бути запасена енергія $A_{нп}$, достатня для подолання максимального перепаду висоти (500 м):

$$A_{нп} = \frac{\Sigma A}{\eta},$$

де η – к. к. д. електропривода, значення якого можна прийняти $\eta = 0,9$.

Для розглянутого варіанту профілю отримаємо значення запасеної в накопичувачі електроенергії, необхідної для руху на підйомі:

$$A_{нп} = 853 \text{ МДж} = 237 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Для руху на спуску значення необхідної запасеної в накопичувачі електроенергії буде дорівнювати:

$$A_{нс} = 187 \text{ МДж} = 50 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Середні питомі витрати електроенергії на всій ділянці дорівнюють:

$$\bar{a} = 24 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}.$$

Отримане значення параметра $\bar{a}$ дещо менше реальних значень для існуючого парку електропоїздів, що експлуатуються на залізницях України ($30 \div 50 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$). Пояснюється це

тим, що при розрахунках розглядався режим руху електропоїзда по ділянці без застосування механічного гальмування, яке в реальних умовах значно збільшує загальні питомі витрати електроенергії.

Аналіз впливу режимів механічного гальмування на загальні питомі витрати електроенергії на тягу

Додаткова корисна робота з покриття витрат енергії від одноразового зупинного механічного гальмування електропоїзда може бути знайдена у вигляді:

$$A_b = \frac{M v_{г0}^2}{2},$$

де $v_{г0}$ – початкова швидкість механічного гальмування.

При багаторазовому застосуванні механічного гальмування протягом всієї ділянки довжиною S ця робота може бути знайдена у вигляді:

$$A_b = \frac{M}{2} \sum_{i=1}^{i=n} v_{r0i}^2.$$

Питоме значення цієї роботи, приведене до одиниці маси і довжини пройденого шляху, може бути представлено як:

$$a_b = \frac{1}{2S} \sum_{i=1}^{i=n} v_{r0i}^2.$$

Результати розрахунків залежності питомого значення корисної роботи з покриття втрат, обумовлених механічним гальмуванням, a_b від середньої довжини перегонів S_n між зупинками електропоїзда наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Результати розрахунків залежності питомого значення корисної роботи a_b від середньої довжини перегонів S_n

S_n , км		2	5	10	15	20
$a_b, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	$v_{r0} = 10 \text{ м/с}$	7	2,8	1,4	0,93	0,7
	$v_{r0} = 15 \text{ м/с}$	15,6	6,3	3,2	2,1	1,6
	$v_{r0} = 20 \text{ м/с}$	28	11,2	5,6	3,7	2,8

Залежності $a_b = f(S_n)$, розраховані для трьох значень швидкості початку механічного гальмування, графічно представлені на рис. 6. З табл. 6 і графіків на рис. 6 видно, що при зниженні параметра S_n до значень 2÷3 км частка питомої роботи a_b у сумарній питомій корисній роботі $\bar{a}$ може досягати 50 %.

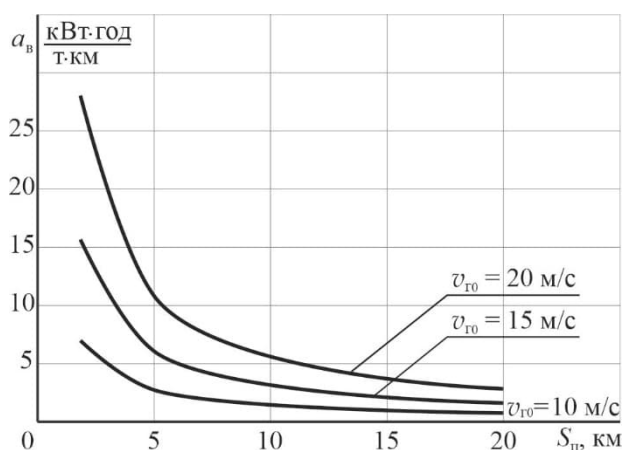


Рис. 6. Залежності питомого значення корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням від середньої довжини перегонів

При значеннях v_{r0} , більше 20 м/с, ця частка може навіть перевищувати 50 %, що ще раз підтверджує той факт, що використання регульованого механічного гальмування на автономних електропоїздах є неприпустимим з точки зору енергоефективності. Істотне зниження питомих витрат електроенергії при використанні рекуперативного гальмування на звичайних електропоїздах є відомим фактом [19]. Однак практика показує, що на цьому типі електрорухомого складу застосування рекуперативного гальмування має цілий ряд обмежень, які відсутні на автономних електропоїздах [20].

У таблиці 7 наведено результати розрахунку залежності параметра a_b від швидкості початку гальмування. Розрахунки наведено для трьох значень S_n : 2, 5 і 10 км.

Таблиця 7

Результати розрахунку залежності параметра a_b від швидкості початку гальмування v_{r0}

v_{r0} , м/с		10	15	20	25	30
$a_b, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	$S_n = 2 \text{ км}$	7	15,6	27,8	43,4	62,5
	$S_n = 5 \text{ км}$	2,8	6,3	11,1	17,4	25
	$S_n = 10 \text{ км}$	1,4	3,1	5,6	8,7	12,5

Графічно залежності $a_b = f(v_{r0})$, побудовані за даними табл. 7, представлені на рис. 7.

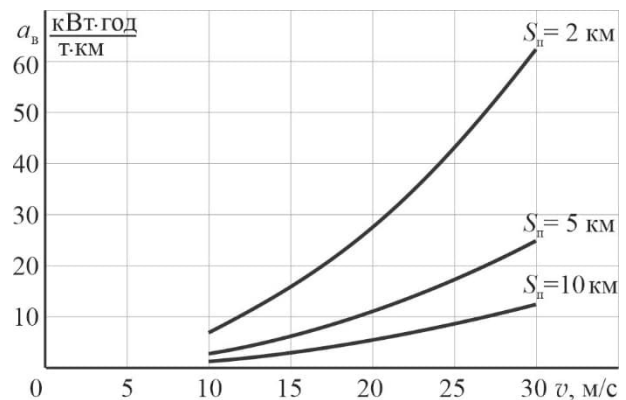


Рис. 7. Залежності питомої корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням, від швидкості

З графіків на рис. 7 видно, що питомі значення корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням, при малих довжинах перегонів S_n співмірні із середнім значенням питомих значень загальних питомих витрат на тягу для звичайних електропоїздів ($30 \div 50 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$). При цьому необхідно зазначити, що для автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії можливі

обмеження максимальної швидкості рекупера- тивного гальмування, обумовлені обмеженням електричної потужності заряду накопичувача.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано методику норму- вання витрат електроенергії на тягу електропої- зда, використання якої потребує наявності лише загальних параметрів профіля та плану колії ді- льниці експлуатації. Отримані характеристики, використання яких дозволяє визначити додат- кові витрати електроенергії, обумовлені вико- ристанням механічного гальмування на проміжних зупинках електропоїзду.

Запропонована методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів може бути використана при проектуванні автономних елек- тропоїздів з бортовими накопичувачами елект- роенергії, зокрема – для визначення параметрів самих накопичувачів та перетворювачів енергії.

Висновки

1. Питомі витрати електроенергії на тягу елек- тропоїздів можуть бути представлені у вигляді функції від питомих опорів руху та приведених до пробігу витрат електроенергії на власні пот- реби, при цьому повні витрати електроенергії на тягу можуть бути оцінені з достатньою точністю без проведення самих тягових розрахунків, а лише за результатами аналізу профілю і плану колії ділянки.

2. Для визначення питомих витрат електрое- нергії на власні потреби електропоїзда може ви- користовуватися універсальна залежність наве- деного значення витрат електроенергії від сере- дньої швидкості руху на ділянці.

3. Результати розрахунку енергетичних пара- метрів накопичувача, отримані для умовного профілю, підтвердили високу ефективність ви- користання автономних електропоїздів з бorto- вими накопичувачами електроенергії для забез- печення пасажирських перевезень, у тому числі і на ділянках зі складним профілем і планом шляху.

4. Необхідна енергетична ефективність експлуатації автономних електропоїздів може бути досягнута тільки при повній відмові від механі- чного гальмування на користь рекупера- тивного.

5. Обмеження використання рекупера- тивного гальмування при високих швидкостях руху автономних електропоїздів можуть бути істот- ними при наявності відповідних обмежень потужності заряду накопичувача електроенергії.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Kljaić Z, Pavković D, Cipek M, Trstenjak M, Mli- narić TJ, Nikšić M. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased En- ergy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 347. URL: <https://doi.org/10.3390/fi15110347>.
2. Meinert, M.; Melzer, M.; Kamburow, C.; Palacin, R.; Leska, M.; Aschemann, H. Benefits of hybridisation of diesel driven rail vehicles: Energy management strat- egies and life-cycle costs appraisal. *Applied Energy*. 2015. Vol. 157. P. 897-904. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.051>.
3. Skobieć K. Energy efficiency in rail vehicles: anal- ysis of contemporary technologies in reducing energy consumption. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2023. No. 3-4. P. 64-70. URL: <https://doi.org/10.53502/rail-177660>.
4. Sulym A. Comparative analysis of approaches to determining the parameters of a capacitive energy stor- age for electric rolling stock. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2022. No. 202. P. 77–98. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273623>.
5. Аналіз питань енергозбереження та енергоефе- ктивності під час експлуатації рухомого складу мет- рополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим, О. С. Сіора // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропет- ровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. – № 3(63). – С. 108-119. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>.
6. Sofia Mendoza D., Solano J., Boulon L. Energy management strategy to optimise regenerative braking in a hybrid dual-mode locomotive. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2020. Vol. 10, no. 4. P. 391–400. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2020.0070>.
7. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard en- ergy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Sys- tems in Transportation*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 279. <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
8. Sulym A., Khozia P. Management strategies for energy processes in electric rolling stock with on-board energy storage devices. *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies series "Transport Systems and Technologies"*. 2021. Vol. 1, no. 38. P. 63–79. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-63-6>.
9. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu. Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, no. 8. P. 7329–7339. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2921161>.
10. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyu- barskyi B., Yeritsyan B. Method to Improve the Effi- ciency of the Traction Rolling Stock with Onboard En- ergy Storage // *International Journal of Renewable En- ergy Research*. 2019. Vol. 9, no 2. P. 848-858

11. Iannuzzi D., Ciccarelli F., Lauria D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. Vol. 21, no. 1. P. 321–337. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.11.002>.

12. Sulym A. O., Muzhychuk S. O., Khozya P. O., Melnyk O. O., Fedorov V. V. Study on energy exchange processes in normal operation of metro rolling stock with regenerative braking systems. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2017. No. 5(71). P. 28–47. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2017/112934>.

13. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги : підручник. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2014. Т. 1. 578 с.

14. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги : підручник. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2014. Т. 2. 490 с.

15. Сулим А. А., Ломонос А. И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2013. Вип. 23. С. 22-29.

16. Riabov I., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 101416. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.

17. Рябов С.С., Кондратьева Л.Ю., Овер'янова Л.В., Єріцян Б.Х., Гулак С.О. Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро, 2022. №2(98). С.26–44. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267984>.

18. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov I., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 65, no. 1. P. 119–136. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.2631>.

19. Arpul S., Afanasov A., Babyak M., Vasyliov V. Improving the System of Electricity Consumption Rationing / S. Arpul et al. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 01005. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439001005> (date of access: 06.11.2025).

20. Афанасов А. М., Линник Д. И., Арпуль С. В., Білухін Д. С., Васильєв В. Є. Перспективи використання автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії. *Транспортні системи та технології перевезень*. Дніпро, 2022. Вип. 23. С. 46–51. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261652>.

Надійшла в редколегію 14.10.2025

Прийнята до друку 18.12.2025

A. AFANASOV, A. SKACHKOV

ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF PROSPECTIVE ELECTRIC TRAINS WITH ON-BOARD ELECTRIC ENERGY STORAGE DEVICES

Purpose. The purpose of the scientific research is to conduct a general energy analysis of the electric traction of an autonomous electric train with an on-board energy storage device, which moves along a section with a complex profile and track layout. For autonomous electric trains with on-board storage devices, the issues of standardizing traction energy consumption and optimizing operating modes are particularly relevant. There are a number of scientific works in which methods for standardizing traction energy consumption based on the results of traction calculations are usually considered. Such methods require the availability of electric train movement curves for the section. The objective of this study was to develop a method for standardizing traction power consumption without constructing such curves, but only based on the parameters of the profile and layout of the operating section. Studies aimed at determining the energy performance of autonomous electric trains are relevant. **Methodology.** The methodological basis of the scientific research is the general theoretical provisions of the theory of electric traction. The analysis of the energy characteristics of the electric train was carried out based on known methods for determining the specific resistance of movement and specific electricity consumption for traction. The rationale for the methodology for determining specific electricity consumption for traction was carried out using known methods of mathematical analysis. To determine the degree of correctness of the proposed methodology, calculations of electricity consumption for traction were performed for a conditional section of track with general parameters of the profile and track plan corresponding to the general parameters of the real section Lviv – Mukacheve. **Findings.** The analysis shows that the specific energy consumption of electric trains can be represented as a function of specific resistance to motion and energy consumption for internal needs per mileage. At the same time, the total electricity consumption for traction can be estimated with sufficient accuracy without performing the traction calculations themselves, based only on the results of the analysis of the profile and track plan of the track section. The scientific work has yielded theoretical

dependencies that can be used to assess the impact of the frequency of electric train stops on the section on the total electricity consumption. It is noted that restrictions on the use of regenerative braking at high speeds of autonomous electric trains can be significant in the presence of corresponding restrictions on the charging power of the energy storage device. **Originality.** For the first time a methodology for standardizing electricity consumption for electric train traction has been proposed, the use of which requires only the general parameters of the profile and track plan of the operating section. The obtained characteristics, the use of which allows determining the additional electricity consumption caused by the use of mechanical braking at intermediate stops of the electric train. **Practical value.** The proposed method for standardizing electricity consumption for electric train traction can be used in the design of autonomous electric trains with on-board electricity storage devices, in particular for determining the parameters of the storage devices and converters themselves.

Keywords: electric train, energy storage device, traction, regenerative braking, specific energy consumption, main resistance to motion, mechanical braking.

УДК 656:658.7

І. В. НІКОЛАСНКО^{1*}, М. В. ХАРА^{2*}, Г. В. МАСЛАК^{3*}

^{1*}Каф. «Транспортні технології і системи», Державний університет «Київський авіаційний інститут», вул. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна, тел. +38 (096) 743 92 93, ел. пошта iryna.vnikolaienko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2933-0498

^{2*}Каф. «Транспортні технології підприємств», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, 49009, Україна, тел. +38 (096) 743 72 36, ел. пошта haramarina4691@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6818-7938

^{3*}Каф. «Транспортні технології підприємств», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, 49009, Україна, тел. +38(068) 435 92 95, ел. пошта avmaslak81@gmail.com, ORCID 0000-0001-7256-5543

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО ДОСВІДУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГУМАНІТАРНОЇ ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Мета. Дослідження українського досвіду функціонування гуманітарної логістики, проблем та ризиків організації постачань гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану. **Методика.** В процесі дослідження використані методи елементарно-теоретичного аналізу та синтезу для всебічного розуміння відносин і зв'язків при управлінні інтеграційними процесами гуманітарної логістики. Відображення складових гуманітарного ланцюга постачань та причинно-наслідкових зв'язків на макрорівні та на локальному рівні здійснено за допомогою графічного методу. Статистичний аналіз використано для оцінки змісту та обсягу постачань товарів гуманітарного призначення. **Результати.** Дослідження проблем організації поставок та розподілу гуманітарної допомоги є актуальним і важливим для забезпечення успішної адаптації внутрішньо переміщених осіб, і це вимагає системного підходу та координації взаємодії державних органів та інституцій, місцевої громади, різноманітних благодійних та громадських організацій. На основі українського досвіду роботи інституцій різного рівня сформульовано базові принципи організації постачань гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану: системність, інтегрованість, гнучкість та динамічність, ефективність та інформаційне забезпечення. Аналіз структури та обсягів постачань гуманітарних товарів виконано на прикладі роботи Благодійної організації «Благодійний фонд «Центр допомоги Олександрія». У 2023 р. на першому місці знаходились гігієна та побутова хімія, друге та третє місце займали одяг, вода та продукти харчування. У 2024 році окрім товарів широкого вжитку від донорів було отримано медичне обладнання для людей з обмеженими фізичними можливостями, товари для відпочинку, спорту та інше. За звітами щомісячна кількість постачань коливалась від однієї до семи. Найбільш трудомісткими для волонтерів і працівників благодійної організації були весняні та літні місяці. За різних умов та обставин відповідальними за організацію транспортування гуманітарної допомоги в м. Олександрія могли бути як донори, так і отримувач «Центр допомоги Олександрія». На основі вітчизняного досвіду функціонування гуманітарної логістики та досвіду роботи благодійної організації представлена сукупність основних параметрів гуманітарних ланцюгів постачань. **Наукова новизна.** Отримані результати можуть бути використані на етапі моделювання ланцюгів гуманітарних постачань та розподілу гуманітарної допомоги на місцевому рівні. Запропонована сукупність основних параметрів гуманітарних ланцюгів постачань дозволяє сформулювати методику оцінювання ефективності ланцюгів постачання гуманітарних товарів в умовах війни. **Практична значимість.** Висновки стосовно нових викликів та ризиків в ланцюгах постачань гуманітарної допомоги є основою для продовження досліджень особливостей гуманітарної логістики на регіональному рівні та в місцевих громадах України.

Ключові слова: внутрішньо переміщена особа, гуманітарна допомога, гуманітарна логістика, ланцюг постачань, параметри, ризик.

Вступ

Російське вторгнення в Україну 24 лютого 2022 року спровокувало вимушене переміщення мільйонів людей, які виживають в екстремальних умовах війни та потребують гуманітарної допомоги.

У Законі України «Про гуманітарну допомогу» гуманітарна допомога визначається як цілюва, адресна, безоплатна допомога в грошовій,

натуральній формі, у вигляді робіт, надання послуг, що надається іноземними та вітчизняними донорами із гуманних мотивів особам, які перебувають у складних обставинах, зокрема внаслідок введення воєнного або надзвичайного стану, хвороби тощо [1].

Згідно з аналізом Управління ООН з координації гуманітарних справ оціночна кількість людей, які потребували гуманітарної допомоги, склала близько 40 % населення України. Великі

потреби мають 3,6 мільйона внутрішньо переміщених осіб (ВПО), особливо ті, які перебувають у місцях тимчасового проживання [2]. Вітчизняний досвід показує, що гуманітарна допомога для ВПО пов'язана із питаннями житла, освіти, медичної допомоги та соціальної зайнятості.

У 2022 році США виділили понад 1,89 млрд. євро на гуманітарну допомогу Україні, переважно через Агентство США з міжнародного розвитку (USAID). Однак у 2023 році ця сума скоротилася приблизно до третини – близько 0,65 млрд. євро, а в 2024 році становила 0,87 млрд. євро [3].

Починаючи з 2022 року, Європейська Комісія виділила понад 1 мільярд євро на програми гуманітарної допомоги Україні. Гуманітарне фінансування ЄС допомагає людям в Україні, надаючи їм: грошову допомогу для покриття основних потреб; захист; медичне обслуговування, включаючи підтримку психічного здоров'я та психосоціальну підтримку; екстрене та зимове житло; продукти харчування; воду; предмети першої необхідності та освіти в надзвичайних ситуаціях (рис. 1).



Рис. 1. Гуманітарне фінансування ЄС для України у 2024 році (за секторами).

Дослідження проблем організації поставок та розподілу гуманітарної допомоги для ВПО є актуальним і важливим для забезпечення успішної адаптації переміщених осіб, і це вимагає системного підходу та координації взаємодії державних органів та інституцій, місцевої громади, різноманітних благодійних та громадських організацій.

Аналіз останніх публікацій та досліджень

Актуальним питанням гуманітарної логістики та транспортування товарів гуманітарного призначення присвячені праці таких науковців як В. К. Мироненко, Т. Д. Гринів, М. О. Мікуліна, S. Tadić, F. Regis-Hernández, B. Sahay та ін.

У статті [5] автори дослідили виклики та кризи в різних регіонах світу, на основі цього здійснили комплексне обґрунтування та структурування гуманітарної логістики, проаналізували ролі учасників, процесів та потоків мережі гуманітарної логістики.

Колектив науковців [6] запропонував план дій ефективного реагування на катастрофи та їх наслідки, який відображає роль основних зацікавлених сторін, починаючи з етапу підготовки товарів гуманітарного призначення.

Дослідження В. К. Мироненка [7] висвітлює питання оптимізаційних задач гуманітарної логістики та транспортного обслуговування в надзвичайних ситуаціях. Також досліджено аспекти комплексного підходу до організації надання гуманітарної допомоги за участю державних органів, академічних закладів, постачальників та громади.

О. О. Чуприна та ін. [8], спираючись на закордонний досвід, проаналізували основні фактори при організації гуманітарних логістичних процесів під час військових дій. Автори наголошують на тому, що своєчасна доставка життєво необхідних гуманітарних вантажів повинна вирішуватись комплексно, на різних управлінських рівнях.

Т. Д. Гринів [9] розглянула класифікацію товарів гуманітарної допомоги для України, та джерела її отримання. В дослідженні зазначено важливість чіткої координації між різними учасниками логістичного ланцюга та запропоновано шляхи запобігання несвоєчасній доставці гуманітарних вантажів.

Аналіз наукових публікацій та досліджень демонструє відсутність чіткого розуміння тієї складової гуманітарної логістики, яка стосується ефективного планування, організації та реалізації гуманітарних процесів і заходів від моменту перетину кордону України з подальшою доставкою та розподілом на рівні місцевих громад.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження українського досвіду функціонування гуманітарної логістики, проблем та ризиків організації постачання гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану.

Методи дослідження

В процесі дослідження використані методи елементарно-теоретичного аналізу для вивчення сутності гуманітарних процесів в умовах війни, та синтезу – для всебічного розуміння відносин

і зв'язків при управлінні інтеграційними процесами гуманітарної логістики. Відображення складових гуманітарного ланцюга постачань та причинно-наслідкових зв'язків на макрорівні та на мікрорівні здійснено за допомогою графічного методу. Статистичний аналіз використано для оцінки змісту та обсягу постачань товарів гуманітарного призначення.

Результати дослідження

За визначенням F. Regis-Hernández та ін. [10] гуманітарна логістика – це процес планування, впровадження та контролю ефективного, економічно вигідного руху та зберігання товарів і матеріалів, а також пов'язаної з ними інформації, від місця походження до місця споживання з метою полегшення страждань вразливих верств населення.

У цій статті пропонується розглянути управління ефективними інтеграційними процесами гуманітарної логістики на макрорівні країни та менеджменту благодійних організацій на локальному рівні.

Відповідно до українського законодавства ключові позиції в ланцюгах поставок гуманітарної допомоги займають три сторони: донор, отримувач та набувач [11]. Донором може бути фізична або юридична особа, яка надає гуманітарну допомогу. Отримувач – це юридична особа або представництво іноземної організації без статусу юридичної особи. В якості набувача розглядається фізична або юридична особа, у якої є потреба в гуманітарній допомозі.

Державні органи, такі як МЗС, Міністерство соціальної політики, Державна прикордонна служба, Державна митна служба, Міністерство інфраструктури та АТ «Укрзалізниця», а також обласні військові адміністрації та департаменти соціального захисту населення відіграють важливу роль у вирішенні наслідків гуманітарних ризиків на макрорівні (рис. 2).

Слід відмітити певні особливості гуманітарної логістики у 2022 році:

1. Масштаб та ризики гуманітарної кризи значно перевищували попереднє прогнозування рівня потреб країни, регіонів та окремих місцевих громад. Внаслідок цього традиційний підхід до організації ланцюгів постачань товарів гуманітарного призначення частково не було реалізовано.

2. На початку повномасштабного вторгнення більша частина гуманітарних вантажів здебільшого була зосереджена на складах західної частини України та за кордоном. При цьому міжнародні організації не могли забезпечити

швидке постачання достатньої кількості товарів для потреб ВПО.

3. Протягом декількох місяців релігійні організації та волонтерські групи брали на себе пошук донорів та самостійно доставляли гуманітарну допомогу за власний рахунок та власними транспортними засобами в міста масового тимчасового поселення ВПО.



Рис. 2. Управлінні інтеграційними процесами гуманітарної логістики на рівні країни.

Одним з таких міст є Олександрія (Кіровоградська область). Місто знаходиться на перетині багатьох маршрутів руху населення країни та пасажирського транспорту (з півдня на північ та зі сходу на захід) і відіграє значну роль у наданні гуманітарної допомоги з 2014 року.

З початком масштабних військових дій місцева громада прийняла тисячі переселенців з Харківської, Донецької, Луганської, Запорізької та Херсонської областей.

Починаючи з лютого 2022 року, в Олександрії активну участь у постачаннях та видачі товарів гуманітарного призначення приймають:

1. Благодійна організація «Благодійний фонд «Центр допомоги Олександрія».
2. Релігійна організація «Релігійна громада «Церква євангельських християн-баптистів міста Олександрія».

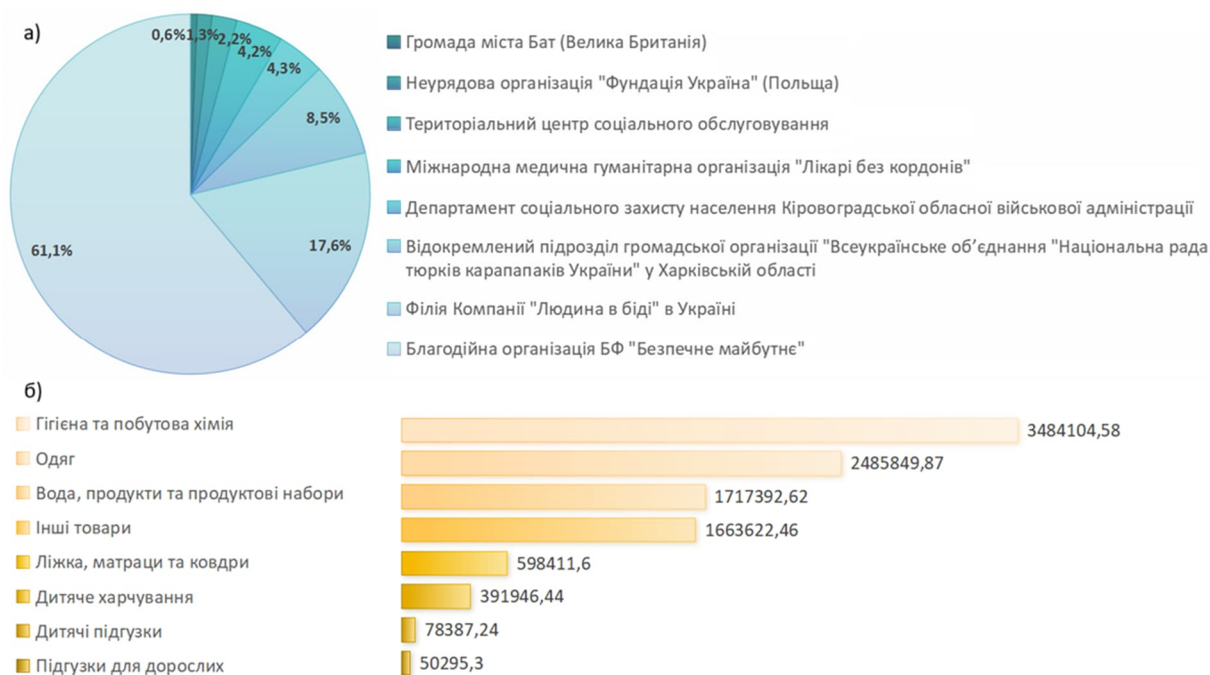


Рис. 3. Організації-донори (а) та гуманітарні товари (б) для ВПО м. Олександрія у 2023 р.

3. Благодійна організація «Благодійний фонд «Міжнародне Служіння Благодійності «Еммануїл-ІМОСЕ».

4. Релігійна організація «Релігійна громада церква християн повного Євангелія «Блага вість».

Подальший аналіз структури та обсягів постачань гуманітарних товарів виконано на прикладі роботи Благодійної організації «Благодійний фонд «Центр допомоги Олександрія» (БО «БФ «ЦДО»). Згідно з даними Єдиного державного реєстру юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців та громадських формувань БО «БФ «ЦДО» засновано в липні 2022 року для підтримки внутрішньо переміщених осіб та вразливих категорій населення.

За різних умов та обставин відповідальними за організацію транспортування гуманітарної допомоги в м. Олександрія могли бути як донори, так і отримувач – БО «БФ «ЦДО».

У 2023 р. вісім організацій-донорів, які надавали гуманітарну допомогу ВПО м. Олександрія, співпрацювали з Благодійним фондом «Центр допомоги Олександрія». Найбільша частка постачань припадала на Благодійну організацію БФ «Безпечне майбутнє» – 61,1 % від загальної суми 10 млн. 470 тис. грн. (рис. 3а).

Представництво БФ «Безпечне майбутнє» знаходиться у м. Кропивницький. Допомогу від цього донора залучала міська рада Олександрії. Транспортування здійснювалось вантажівками БФ «Безпечне майбутнє» з м. Кропивницький до

складу тимчасового зберігання БО «БФ «ЦДО» в м. Олександрія.

Логістика розподілу та видачі гуманітарної допомоги починається з моменту прийняття відповідного рішення міського виконавчого комітету (рис. 4).



Рис. 4. Приклад взаємодії зацікавлених сторін при постачаннях гуманітарних вантажів на мікрорівні.

В Олександрії організовано вісім місць компактного проживання ВПО – в гуртожитках та дитсадках. Для них передача гуманітарної допомоги здійснюється на основі відповідного акту. Зі складу БО «БФ «ЦДО» гуманітарні вантажі

доставляються в гуртожитки та дитсадки власним транспортом МКП. Для ВПО, які мають індивідуальне проживання, видача допомоги організується в межах БО «БФ «ЦДО». В такому випадку, факт надання гуманітарної допомоги підкріплюється оформленням відповідних відомостей (рис. 4).

За перші три роки роботи БО «БФ «ЦДО», завдяки розширенню кола донорів, значно зросла кількість товарних позицій в гуманітарних поставках. У 2023 р. на першому місці знаходились товари категорії «гігієна та побутова хімія» – 3 млн. 484 тис. грн., друге та третє місце займали одяг, вода та продукти харчування (рис. 3б).

У 2024 році окрім товарів широкого вжитку (продукти харчування, вода, засоби гігієни, ліки

тощо), від донорів було отримано медичне обладнання для людей з обмеженими фізичними можливостями на суму 458,274 тис. грн., товари для відпочинку, спорту та інше (рис. 5а).

У 2024 р. кількість організацій-донорів, які співпрацювали з БО «БФ «ЦДО» збільшилась до десяти. Найбільший обсяг поставок гуманітарних товарів (23,5 % від загальної суми 13 млн. 773 тис. грн.) надійшов від Благодійної асоціації «Tournesols d'Ukraine» з Франції (рис. 5б).

Французька асоціація «Tournesols d'Ukraine» надає засоби гігієни, ліки, продукти харчування, одяг, як для підтримки населення, так і військових. Приблизно кожні три місяці «Tournesols d'Ukraine» відправляє вантажні автомобілі, заповнені гуманітарною допомогою, які розвантажуються в Олександрії.

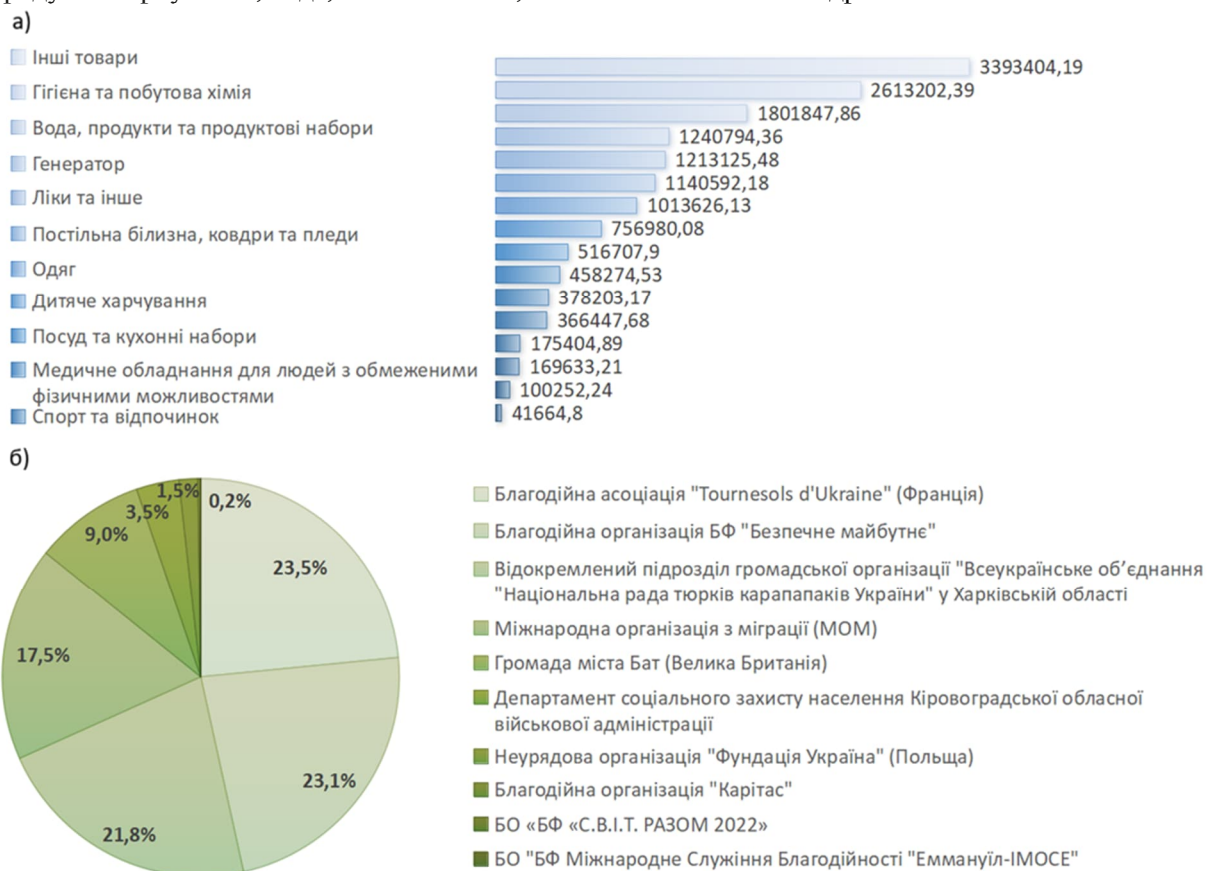


Рис. 5. Гуманітарні товари (а) та організації-донори гуманітарної допомоги (б) для ВПО м. Олександрія у 2024 р.

У 2023...2024 р.р. через БО «БФ «ЦДО» було отримано від донорів і видано набувачам гуманітарних товарів на суму 24242,92 тис. грн. За звітами щомісячна кількість поставок коливалась від однієї до семи (рис. 6).

Найбільш трудомісткими для волонтерів і працівників благодійної організації були весняні та літні місяці.

Гуманітарні ланцюги поставок на прикладі Олександрійської громади проаналізовано з урахуванням того, що гуманітарні потреби у Кіровоградській області збільшилися з рівня «виникнення потреб» до рівня «значні потреби», про що вказано у «Плані гуманітарних потреб і реагування», підготовленому Управлінням ООН з координації гуманітарних справ [2].

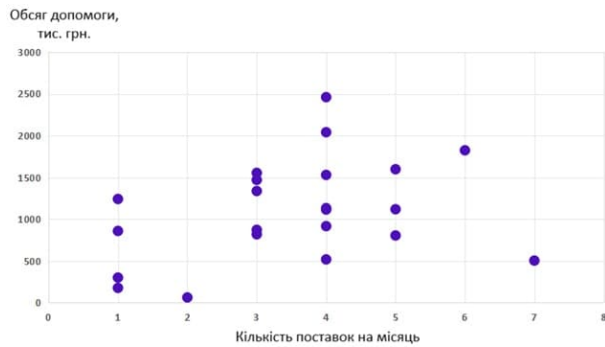


Рис. 6. Обсяг допомоги, наданий через БО «БФ «ЦДО», за період 2023-2024 р.

На основі вітчизняного досвіду функціонування гуманітарної логістики та досвіду роботи БО «БФ «ЦДО» представлена сукупність основних параметрів гуманітарних ланцюгів поставок (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри гуманітарних ланцюгів поставок	
Донор	Міжнародна організація. Благодійний фонд. Неофіційна волонтерська організація. Місцева громада.
Персонал отримувача	Волонтери. Наймані працівники. Ступінь зайнятості. Цифрова компетентність.
Набувач	ВПО. Населення прифронтових територій. Індивідуальне проживання. Місця компактного проживання (МКП).
Гуманітарні товари	Нові та вживані. Упаковані та неупаковані. З обмеженим та необмеженим терміном придатності.
Характер поставання	Разове. Епізодичне. Регулярне.
Організація доставки і зберігання	Приватний транспорт фізичних осіб (волонтерів). Автомобільний транспорт, що належить організації-донору. Послуги транспортних та логістичних компаній. Склади тимчасового зберігання.
Видача допомоги	Врахування умов, які висувають донори (групи та категорії набувачів). Засоби інформування набувачів. Терміни видачі (обмежені, необмежені).

В цілому досвід Олександрійської громади у сфері гуманітарної логістики та взаємодія зацікавлених сторін з метою забезпечення надійних поставок гуманітарної допомоги дозволив зробити наступні висновки. Масштабна надзвичайна ситуація, пов'язана з міграцією великої кількості людей, призвела до нових викликів та ризиків в ланцюгах поставок гуманітарної допомоги:

1. Висока невизначеність життєвого циклу, частоти та змісту гуманітарних поставок. Брак достатньої кількості донорів, з якими укладено довгострокові угоди та меморандуми про співпрацю.

2. На відміну від традиційного підходу до вирішення питань допомоги постраждалим від стихійного лиха, складно спрогнозувати остаточні терміни ліквідації наслідків гуманітарної кризи.

3. Високий рівень невизначеності зовнішнього та внутрішнього середовища міста, регіону та країни в цілому.

4. Ймовірність часткового недосягнення запланованих цілей гуманітарної логістики, тобто соціального ефекту.

5. Потреба у регулярних та стабільних поставках товарів широкого вжитку (продукти харчування, вода, засоби гігієни, ліки тощо).

6. Відсутність стабільного попиту на деякі товари гуманітарного призначення, або навпаки, недостатність забезпечення ВПО товарами певної номенклатури. Частина поставлених товарів, що були у вжитку, мають низьку якість, тому їх подальше використання неможливо.

7. Необхідність розміщення об'ємних товарів тривалого користування на тимчасових неспеціалізованих площах (наприклад, зберігання розкладачок, матраців і ковдр в школах та дитячих садочках).

8. Низький рівень закупівель на стратегічному рівні. Найбільша частка логістичних операцій здійснюється на тактичному та оперативному рівні під час фази реагування на гуманітарну кризу. У зв'язку з цим ланцюги поставок мають доволі значний рівень невизначених організаційно-технологічних питань.

Еволюція розвитку гуманітарної логістики та ролі благодійних організацій в Україні з 2022 по 2025 рік демонструє зміни у змісті та характері допомоги (табл. 2).

Отже, відбувається перехід від забезпечення товарами для виживання до створення умов для довгострокової адаптації, соціалізації та фінансової самостійності ВПО та вразливих верств населення.

Таблиця 2

Розвиток гуманітарної логістики в умовах війни

Фаза	Характеристика
Реактивна	Надаються продовольча та непродовольча допомога: продуктові та гігієнічні набори, одяг та медикаменти.
Стабілізація	Надаються послуги психологічної підтримки, організуються різноманітні тренінги.
Інтеграція	Практикується гуманітарна грошова допомога, програми адаптації дітей-ВПО та розвитку дитячої творчості.
Відновлення	Поширюється практика благодійної діяльності у вигляді грантової допомоги на самозайнятність і розвиток бізнесу, ремонт житла та інші соціальні проєкти для ВПО.

Наукова новизна та практична значимість

В статті розглянуто сучасний стан та проблеми гуманітарної логістики в умовах воєнного стану. Отримані результати можуть бути використані на етапі моделювання ланцюгів гуманітарних поставок та розподілу гуманітарної допомоги на місцевому рівні. Запропонована сукупність основних параметрів гуманітарних ланцюгів поставок дозволяє сформувати методику оцінювання ефективності ланцюгів поставок гуманітарних товарів в умовах війни. Висновки стосовно нових викликів та ризиків в ланцюгах поставок гуманітарної допомоги є основою для продовження досліджень особливостей гуманітарної логістики у інших регіонах та місцевих громадах України.

Висновки

На основі українського досвіду роботи інституцій різного рівня сформульовано базові принципи організації поставок гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану:

1. Системність. Елементи ланцюга поставок, в тому числі донори, перевізники та отримувачі, розглядаються не тільки у взаємозв'язку між собою, а також з урахуванням інтенсивності і масштабів військових дій. При цьому важливе значення має соціологія міграційних процесів та вимушеного переселення.

2. Інтегрованість. Структура та елементи ланцюгів поставок формуються під впливом факторів і невизначеностей внутрішнього та зовнішнього середовища: під потреби певного регі-

ону країни, з урахуванням організаційних, технологічних і технічних можливостей, та економічного потенціалу місцевої громади.

3. Гнучкість та динамічність. Своєчасне визначення пріоритетності поставок гуманітарних товарів певної категорії та номенклатури. Як наслідок, прийняття швидких рішень по донорах, виконавцях перевезень, отримувачах, оптимальних строках поставок та необхідності додаткових місць тимчасового зберігання гуманітарної допомоги.

4. Ефективність. Скоординоване партнерство учасників гуманітарного ланцюга, результатом якого є придбання, постачання і видача необхідних товарів в місцях проживання ВПО з урахуванням своєчасності та актуальності реагування на запит про гуманітарну допомогу.

5. Інформаційне забезпечення. Використання єдиної національної бази даних про зацікавлених осіб (організацій донорів, перевізників, волонтерських та благодійних організацій тощо) з поточним переліком необхідної допомоги по областях і місцевих громадах. На даний момент в Україні така база даних відсутня.

Подяка

Автори статті висловлюють подяку керівнику Благодійної організації «Благодійний фонд «Центр допомоги Олександрія» Л. М. Мороз та А. В. Безкровній за допомогу в отриманні статистичних даних.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Про гуманітарну допомогу : Закон України від 22.10.1999 № 1192-XIV : станом на 7 серп. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1192-14#Text>
2. Україна. План гуманітарних потреб і реагування. Цикл гуманітарних програм 2025 р. *Управління ООН з координації гуманітарних справ*. URL: <https://www.unhcr.org/ua/publications>
3. Ukraine Support After Three Years of War: Aid remains low but steady and there is a shift toward weapons procurement. *Kiel Institute*. URL: <https://www.kielinstitut.de/publications/news/ukraine-support-after-3-years-of-war-aid-flows-remain-low-but-steady-shift-towards-weapons-procurement/>
4. European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations. *European Union*. URL: https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/where/europe/ukraine_en
5. Humanitarian logistics: a framework for structuring and research / S. Tadić et al. *Transportation Research Procedia*. 2025. Vol. 83. P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.02.011>
6. Managing Humanitarian Logistics / ed. by B. S. Sahay, S. Gupta, V. C. Menon. New Delhi :

Springer India, 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2416-7>

7. Мироненко В. Основи гуманітарної логістики та транспортного обслуговування в надзвичайних ситуаціях. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг* : колект. монографія. Київ, 2021. С. 203–225.

8. Чуприна О., Колосок Е., Григоренко О. ГУМАНІТАРНА ЛОГІСТИКА: ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ В СУЧАСНИХ РЕАЛІЯХ. *Економіка та суспільство*. 2023. № 58.

URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-39>

9. Гринів Н. ГУМАНІТАРНА ЛОГІСТИКА ЯК ІНСТРУМЕНТ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ ПОТОКІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56.

URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4>

10. Humanitarian Logistics from the Disaster Risk Reduction Perspective / ed. by F. Regis-Hernández et al. Cham : Springer International Publishing, 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90877-5>

11. Хто може бути отримувачем та набувачем гуманітарної допомоги: роз'яснення Міністерства соціальної політики. *Урядовий портал. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/khto-mozhe-buty-otrymuvachem-ta-nabuvachem-humanitarnoi-dopomohy-roziasnennia-minsotspolityky>

Надійшла в редколегію 17.10.2025

Прийнята до друку 26.12.2025

I. NIKOLAIENKO, M. KHARA, A. MASLAK

RESEARCH ON NATIONAL EXPERIENCE OF HUMANITARIAN LOGISTICS OPERATIONS UNDER MARTIAL LAW

The purpose of this research is to study Ukraine's experience in humanitarian logistics, as well as the challenges and risks of organising humanitarian aid delivery under conditions of the martial law. **Methodology.** In the process of research, the method of elementary theoretical analysis was used to study the essence of humanitarian processes in wartime, and the synthesis method was used to comprehensively understand the relationships and connections in the management of humanitarian logistics integration processes. The components of the humanitarian supply chain and cause-and-effect relationships at the macro and micro levels were presented using a graphical method. Statistical analysis was used to assess the content and volume of humanitarian supplies. **The results.** The study of issues related to the humanitarian aid supply and distribution system is relevant and important for ensuring the successful adaptation of internally displaced persons. It requires a systematic approach and coordination between state bodies and institutions, local communities, and various charitable and public organisations. Based on Ukraine's experience with institutions at various levels, the following basic principles for organising humanitarian aid supplies in a state of martial law have been formulated: consistency, integration, flexibility and dynamism, efficiency, and information support. The analysis of the structure and volume of humanitarian supplies was carried out using the example of the operation of the charitable organisation 'Charitable Foundation 'Oleksandriia Aid Centre'. In 2023, hygiene and household chemicals ranked first, while clothing, water and food ranked second and third. In 2024, in addition to consumer goods, medical equipment for people with disabilities, leisure and sports goods, and other items were received from donors. According to reports, the monthly number of deliveries ranged from one to seven. The spring and summer months were the most labour-intensive for volunteers and employees of this charitable organisation. Under various conditions and circumstances, both donors and recipients, Oleksandriia Aid Centre, could be responsible for organising the humanitarian aid transport in Oleksandriia. Based on the national experience of humanitarian logistics and the charity's experience, a set of key parameters for humanitarian supply chains has been presented. **Scientific novelty.** The obtained results can be used at the stage of modelling humanitarian supply chains and humanitarian aid distribution at the regional and municipal levels. The proposed set of key parameters for humanitarian supply chains allows for the development of a methodology for assessing the humanitarian supply chain effectiveness in wartime conditions. **Practical significance.** Conclusions regarding new challenges and risks in humanitarian aid supply chains form the basis for further research into the specifics of humanitarian logistics at the regional level and in local communities in Ukraine.

Keywords: internally displaced person, humanitarian aid, humanitarian logistics, supply chain, parameters, risk.

УДК 621.313.33:62-83:625.1/.2

В. І. ДОСКОЧ^{1*}, О. Ю. БАЛІЙЧУК^{2*}

^{1*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 893 79 70, ел. пошта doskoch.volodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-9991-1650

^{2*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 341 80 82, ел. пошта o.y.baliichuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-0119-1446

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТЕНДУ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мета. Робота спрямована на розробку методики експериментального дослідження впливу зниженої напруги живлення на робочі та механічні характеристики асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором потужністю до 5 кВт. Дослідження орієнтоване на критично важливе технологічне обладнання підприємств залізничного транспорту (локомотивних депо, ремонтних заводів), яке в сучасних умовах часто експлуатується в режимах енергопостачання з низькими якісними показниками. **Методи.** У роботі застосовано комплексний аналіз технічного оснащення залізничних підприємств, аналітичні методи дослідження властивостей асинхронних машин та методи математичного аналізу результатів випробувань. Основу експериментальної частини складає метод безпосереднього навантаження на стенді взаємного навантаження, де в якості гальмівного пристрою використано машину постійного струму з незалежним збудженням. Процес включає попереднє зняття характеристик холостого ходу та неробочого ходу для калібрування вимірювальної системи. **Результати.** Розроблено та практично апробовано схему експериментального стенду, що дозволяє фіксувати координати електроприводу (момент, частоту обертання, струм) у широкому діапазоні навантажень. Встановлено, що використання генератора типу П-42 як навантажувального пристрою дозволяє створювати регульований гальмівний момент від 0 до 35 Н·м. Це забезпечує можливість моделювання режимів роботи асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт при варіації живлячої напруги. Описана метрологічна база підтверджує високу точність отриманих даних для подальшої побудови реальних механічних характеристик. **Наукова новизна.** Автором вперше запропоновано використовувати стенд взаємного навантаження з генератором постійного струму співмірної до двигуна потужності, що працює на мережу з регульованою напругою, спеціально для оцінки стійкості роботи нетягових споживачів залізниці в умовах нестабільного енергопостачання. Також набув подальшого розвитку метод безпосереднього навантаження машин малої потужності, який, на відміну від аналітичних моделей, дозволяє враховувати реальні електромагнітні процеси в умовах відхилення параметрів мережі від номінальних значень. **Практична значимість.** Отримана методика та результати стендових випробувань є вихідними даними для прогностичного моделювання стабільності роботи промислового обладнання ремонтних підприємств залізниць. Практичне застосування результатів дозволить розробити технічні рекомендації щодо захисту критичного обладнання від негативного впливу низької якості електроенергії, а також обґрунтувати впровадження заходів із компенсації напруги та використання відновлюваних джерел енергії для безперебійної роботи локомотивних депо.

Ключові слова: нетягові споживачі, електрообладнання підприємств залізничного транспорту, стенд взаємного навантаження, критично важливе обладнання, робочі характеристики асинхронних двигунів, експериментальне визначення координат асинхронних електроприводів.

Вступ

В основі електроприводу більшості технологічного обладнання підприємств залізничного транспорту лежить асинхронний двигун із короткозамкненим ротором. За своїм виконанням це двигуни загальнопромислових серій – 4А, АІР, та ін. потужністю для основного обладнання від 0,37 кВт до 15 кВт.

Названі двигуни в умовах локомотивних

депо та ремонтних підприємств працюють від мережі електричної енергії, де характеристики напруги відрізняються недостатньою якістю. При цьому спостерігається погіршення робочих властивостей названих двигунів.

Попри те, асинхронний двигун повинен виконувати свою основну функцію – реалізовувати номінальний момент при зміні в певних межах живлячої напруги та частоти, обумовлених режимами роботи мережі.

Постановка завдання дослідження

Підприємством-виробником на вимогу [1] в об'ємі контрольних випробувань проводиться мінімальний перелік досліджень параметрів асинхронного двигуна: вимірювання опору обмоток постійному струму в холодному стані; визначення струму і втрат холостого ходу; визначення напрямку обертання, чи порядку чергування фаз; випробування ізоляції підвищеною напругою.

Також вказаний перелік, відповідно до [1] може бути доповнений випробуваннями на короткочасне перевантаження двигуна обертовим моментом та визначення мінімального обертового моменту при пуску. Названі параметри оцінюються за номінальної напруги.

Для двигунів критично важливого технологічного обладнання локомотивних депо та ремонтних підприємств залізничного транспорту в умовах реальної експлуатації характерним є живлення напругою при значних відхиленнях від нормативних значень. Таким чином, практичний інтерес при оцінці працездатності такого обладнання являють собою робочі характеристики не стільки при номінальній напрузі, скільки в умовах реальної експлуатації, коли відхилення напруги є суттєвими.

Мета дослідження

Розробити методику експериментального дослідження впливу зниженої напруги живлення на робочі характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором потужністю до 5 кВт, які отримують з використанням стенду взаємного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню дослідження робочих характеристик асинхронних двигунів протягом останнього часу приділено значну кількість публікацій. Частина робіт [2 – 3] присвячується безпосередньо експериментальному визначенню параметрів та робочих характеристик на стендах взаємного навантаження або подібних, а більшість проаналізованих робіт [4 – 10] – методам аналітичної їх побудови на основі розрахункових даних, математичного та імітаційного моделювання з використанням пакету MATLAB.

В роботі [2] автори порівнюють основні традиційні методи дослідження характеристик асинхронних двигунів з усталеними еталонними методами з метою пошуку найбільш точного методу визначення характеристик двигуна, що є критично важливим тоді, коли мова йде про

здійснення ефективного векторного керування. Запропонований авторами експериментальний метод безпосереднього визначення характеристик двигуна має похибку в 6,5% у порівнянні з іншими обчислювальними методами, основаними на ряді припущень, похибка яких становить 19,65%.

Авторами в [3] розглядається ряд схемних рішень систем взаємного навантаження при дослідженні асинхронних двигунів тягового рухомого складу. Розглянуто системи «асинхронний двигун- асинхронний генератор» з механічним перетворювачем частоти у вигляді редуктора, ремінного варіатора або гідравлічної передачі; систему «асинхронний двигун – синхронний генератор» із ланкою постійного струму, реалізованою за допомогою двомашинного мотор-генераторного агрегату; систему «асинхронний двигун – асинхронний генератор» із одним або двома напівпровідниковим частотними перетворювачами як з'єднаних ланкою постійного струму, так і не з'єднаних нею; систему «асинхронний двигун – генератор постійного струму»; систему «асинхронний двигун – синхронний генератор». В ході порівняльного аналізу виявлено переваги і недоліки, сформульовано експлуатаційні обмеження розглянутих систем.

В [4] порівняно статичні робочі характеристики асинхронного двигуна, отримані в ході імітаційного моделювання в системі MATLAB при реалізації принципів FOC-керування (Field Oriented Control), яке наближає характеристики асинхронного двигуна до характеристик машин постійного струму, та скалярного керування. В результаті продемонстровано переваги FOC, як кращого метода керування електроприводами змінного струму.

Роботу [5], присвячено моделюванню стаціонарних та перехідних режимів трифазних асинхронних двигунів, та їх робочих характеристик. Розглянута в [5] MATLAB-модель дозволяє зімітувати різні методи пуску двигуна, для оцінки їхнього впливу на пускові струми, пусковий момент та його загальну продуктивність.

В роботі [6] показано метод моделювання механічних характеристик асинхронних двигунів на основі класичного виразу для механічної характеристики з урахуванням всіх параметрів схеми його заміщення. Описаний тут метод підходить для швидкої валідації даних, отриманих із аналітичних виразів, або для порівняння результатів моделювання із експериментальними даними, або результатами, отриманими на інших моделях.

При необхідності отримати високо адекватну

статичну характеристику асинхронного двигуна необхідно враховувати змінні параметри математичної моделі асинхронного двигуна, як це показано в [7]. В представленій моделі враховано змінні індуктивність намагнічування, а також момент інерції обертових мас, з'єднаних із ротором, що підвищує адекватність результатів моделювання.

В роботах [8, 9] міститься практичний алгоритм побудови механічних характеристик асинхронних двигунів на основі аналітичних розрахунків. Так, в [8], представлено метод розрахунку механічних характеристик трифазних асинхронних двигунів, які живляться від однофазної мережі, де обертове магнітне поле створюється завдяки вмиканню послідовно в одну фазу конденсаторів. Задача розв'язується як крайова у трифазній нерухомій системі координат. В математичній моделі двигуна враховується насичення магнітопроводу та витіснення струму. А в роботі [9] запропоновано алгоритм розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором при різних частотах напруги живлення. В основу розрахунку покладено математичну модель асинхронного двигуна, в якій також враховується насичення магнітопроводу і витіснення струму в стержнях короткозамкненого ротора. Електромагнітні процеси у двигуні описуються системою нелінійних рівнянь електричної рівноваги, записаної в перетворених до ортогональних осей координат, яка розв'язується ітераційним методом Ньютона разом з методом продовження по параметру.

Дослідження [10] вивчає динамічну поведінку асинхронних двигунів шляхом розробки та перевірки чотирьох різних математичних моделей, призначених для перехідних та пускових режимів. Ці моделі, виражені в системах координат α , β та d , q , аналізують частоту обертання, електромагнітний момент та профілі струму з різним рівнем складності, включаючи підходи на основі струму, потокозчеплення та електромагнітної постійної часу обмотки ротора. Варто відзначити, що моделі потокозчеплення чудово враховують складні перехідні явища, тоді як моделі на основі струму спрощують інтеграцію з дослідженнями енергосистем. Ці результати забезпечують надійну основу для аналізу роботи асинхронних двигунів за різних умов, таких як сценарії небалансу напруги та виходу з ладу, що дозволяє оптимізувати роботу двигунів в енергоємних галузях промисловості.

Проведений аналіз свідчить, що дослідження робочих та механічних характеристик

асинхронних двигунів є безумовно своєчасним та актуальним завданням при вирішенні проблеми працездатності промислових електроприводів.

Основний матеріал дослідження

Як визначено в [1, 3, 11], в обов'язкову програму контрольних (приймально-здавальних) випробувань асинхронних машин входять:

1. Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2. Вимірювання опору обмоток постійному струму в практично холодному стані.
3. Визначення коефіцієнта трансформації (для двигунів із фазним ротором).
4. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5. Випробування міжвиткової ізоляції статора і фазного ротора на електричну міцність.
6. Визначення струму та втрат холостого ходу.
7. Визначення струму і втрат короткого замикання.

Причому, як при масовому виробництві [1, 11], так і проведенні післяремонтних випробувань [3] обов'язковими для кожної окремої машини залишаються лише визначення струму і втрат холостого ходу, випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.

Специфічними для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є визначення струму та втрат холостого ходу та короткого замикання; визначення коефіцієнту корисної дії (ККД), коефіцієнта потужності, ковзання; визначення максимального, мінімального і початкового обертового моментів [11].

Початковий пусковий обертовий момент можна визначити із досліду короткого замикання, а максимальний (критичний, або «перекидаючий» момент) та мінімальний момент в процесі пуску може бути визначений із залежності обертового моменту від частоти обертання при навантаженні двигуна на генератор постійного струму. Даний дослід може виконуватися як із поглинанням енергії навантажувального генератора, так і з поверненням її [12].

Для вимірювання абсолютного значення обертового моменту може бути використано генератор постійного струму із незалежним збудженням при незмінному $I_z = const$, який працює на мережу постійного струму із регульованою напругою. Зміну навантаження двигуна

здійснюють регулюванням напруги мережі.

Для визначення шуканої кривої $M = f(n)$ асинхронного двигуна при випробуваннях вимірюють струм якоря генератора $I_{\text{я}}$ та частоту обертання двигуна n (об/хв). Величину обертового моменту визначають за виразом:

$$M = 9,55 \cdot U_0 \cdot \frac{(I_{\text{я}} + I_0)}{n}, \quad (1)$$

де U_0 - електрорушійна сила (ЕРС) навантажувального генератора в режимі холостого ходу (ХХ), В; I_0 - струм холостого ходу генератора, А. Ці величини визначають попередньо із дослідів холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження при сталій частоті обертання та в двигунному режимі при сталому струмі збудження при знятті характеристики $I_0 = f(n)$ відповідно. Очевидно, що ці два досліді передують виконанню основного випробування.

В якості навантажувального генератора пропонується використовувати генератор постійного струму із незалежним збудженням типу П-42.

Схему дослідів холостого ходу генератора постійного струму із незалежним збудженням показано на рис. 1. На схемі умовними позначками показано: SA1, SA2 – двополюсний та триполюсний рубильники відповідно; FU1...FU5 – плавкі запобіжники; PA1 – амперметр постійного струму типу М2015; R1 – регульовальний реостат в колі обмотки збудження генератора постійного струму; G – генератор постійного струму типу П-42; М – асинхронний двигун; PV2 – вольтметр типу Е59; ТГ – датчик тахометра (первинний перетворювач) ДТ-5М; PV1 – тахометр ТЕ-4В

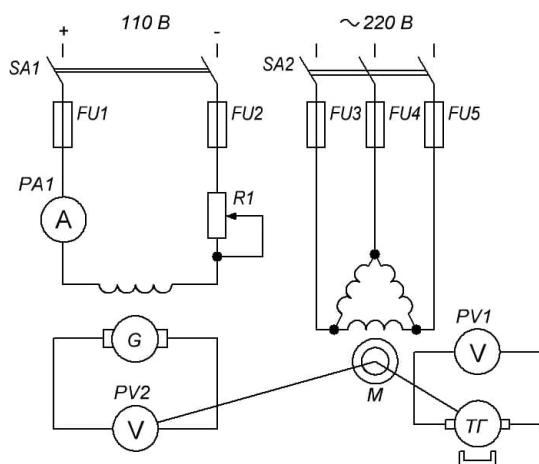


Рис. 1. Схема дослідів холостого ходу генератора постійного струму

Метод зняття характеристики холостого ходу [12] полягає в тому, що струм збудження

генератора постійного струму плавно знижують, починаючи із максимального значення до нуля. Змінюють полярність обмотки збудження і плавно підвищують струм збудження до максимального значення, а потім знову знижують до нуля та, змінивши полярність, плавно підвищують до максимального значення. Характеристикою холостого ходу буде крива $U_0 = f(I_3)$, абсциси якої є середньоарифметичними абсцисами аналогічних кривих при розмагніченні та намагніченні машини струмом збудження прямої полярності.

Частоту обертання двигуна при холостому ході визначають при номінальній напрузі в колі якоря і номінальному струмі збудження. При цьому температура обмотки збудження повинна бути близькою до робочої [12]. Для виконання названого дослідів використовуємо схему, яку представлено на рис. 2.

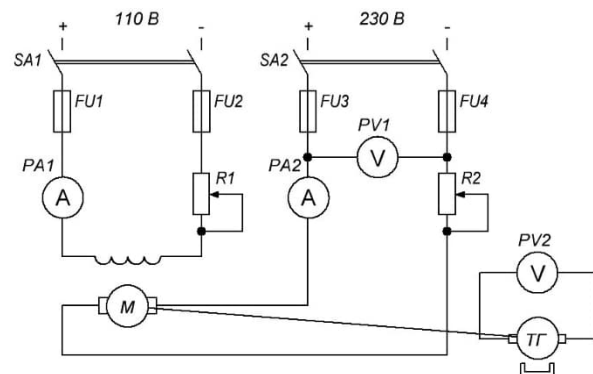


Рис. 2. Схема дослідів з визначення $I_0 = f(n)$ машини постійного струму в режимі двигуна

На рис. 2: SA1, SA2 – двополюсні рубильники; FU1...FU4 – плавкі запобіжники; PA1, PA2 – амперметри постійного струму типу М2015; PV1 – вольтметр типу Е59; R1 – регульовальний реостат в колі збудження машини постійного струму; R2 – пусковий реостат в колі якоря машини постійного струму; М – машина постійного струму типу П-42; ТГ – датчик тахометра ДТ-5М; PV2 – тахометр ТЕ-4В.

Паспортні дані генератора П-42 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики генератора П-42				
$P_{\text{н}}$, кВт	$U_{\text{н}}$, В	$I_{\text{н}}$, А	$n_{\text{н}}$, об/хв	$\eta_{\text{н}}$
3,6	230	15,65	1450	0,775

Метрологічні властивості електровимірювальних приладів, які використовуються в цих дослідів, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Метрологічні властивості застосованих електровимірювальних приладів [13 – 16]

Тип	Найменування	Діапазон виміру	Клас точності (похибка)
E59	Вольтметр	0...600 В	0,5
M2015	Амперметр	0...30 А	0,2
ДТ-5М	Первинний перетворювач	0...9000 об/хв	-
ТЕ-4В	Тахометр	500...1000 об/хв	±55 об/хв
		1000...4000 об/хв	±40 об/хв

Таблиця 3

Характеристика холостого ходу при збудженні машини струмом «прямої полярності»

I_3, A	0	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,61	0,65	0,71
$U_0 \text{ розм, В}$	6	126	142	158	174	188	200	212	218	230
$U_0 \text{ нам, В}$	-6	112	132	150	166	180	194	208	217	230
$U_0, В$	0	119	137	154	170	184	197	210	217,5	230

Таблиця 4

Характеристика холостого ходу при збудженні машини струмом «зворотної полярності»

I_3, A	0	-0,3	-0,35	-0,4	-0,45	-0,5	-0,55	-0,6	-0,65	-0,71
$U_0 \text{ розм, В}$	-6	-127	-144	-159	-174	-189	-202	-212	-221	-230
$U_0 \text{ нам, В}$	6	-114	-133	-150	-167	-182	-196	-208	-220	-232
$U_0, В$	0	-120,5	-138,5	-154,5	-170,5	-185,5	-199	-210	-220,5	-231

Використовуючи описаний вище метод отримання характеристики холостого ходу, фіксуємо характеристики машини постійного струму типу П-42 при збудженні струмом «прямої полярності» (див. табл. 3) та «зворотної полярності» (див. табл. 4).

За експериментальними даними із табл. 3 та 4 побудовано графічні залежності $U_0 = f(I_3)$ при прямій та зворотній полярності струму збудження машини. Графіки цих залежностей показано на рис. 3 та 4 відповідно.

Як можна бачити на рис. 3 та 4, знята за описаним методом характеристика холостого ходу фактично являє собою середню лінію повної петлі гістерезису (в інших координатах) при намагніченні та розмагніченні електротехнічної сталі, використаної при виготовленні осердь даної машини.

В результаті проведення досліду неробочого ходу в режимі двигуна для машини П-42 відповідно до схеми на рис. 2 визначено, що струм $I_0 = 0,7 A$, і становить від номінального струму машини:

$$\frac{I_0}{I_{\text{ном}}} = \frac{0,7}{15,65} \cdot 100 = 4,5\%,$$

що є деяким середнім значенням для машин постійного струму потужністю до 10 кВт [17].

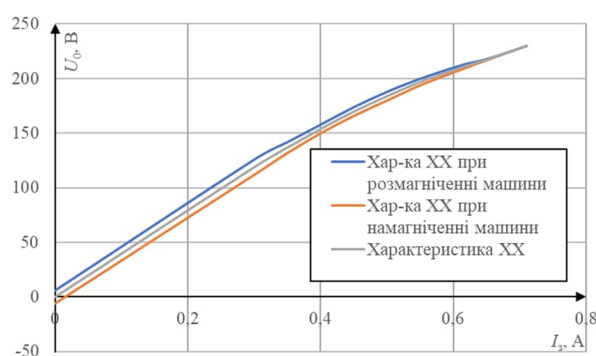


Рис. 3. Характеристики холостого ходу машини постійного струму типу П-42 в режимі генератора при збудженні струмом «прямої полярності»

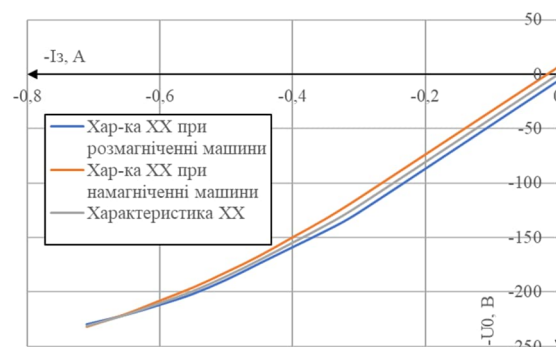


Рис. 4. Характеристики холостого ходу машини постійного струму типу П-42 в режимі генератора при збудженні струмом «зворотної полярності»

Якщо прийняти, що механічна характеристика двигуна, який приводить в рух генератор постійного струму, «жорстка» і його частота обертання в залежності від навантаження змінюється в діапазоні від 1490 об/хв (при холостому ході) до 1440 об/хв (при номінальному навантаженні), то момент, який забезпечить стенд із навантаженням у вигляді генератора типу П-42, визначений за виразом (1) при «холостому ході» генератора ($I_a = 0$ та $U_0 = 230$ В відповідно до рис. 3) та при струмі збудження $I_s = 0,71$ А, буде мінімальним і становитиме:

$$M_{\min} = 9,55 \cdot E_0 \cdot \frac{I_0}{n} = 9,55 \cdot 230 \cdot \frac{0,7}{1490} = 1,03 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

З урахуванням властивості електричних машин витримувати 25% перевантаження струмом, максимальний струм генератора буде $I_{a \max} = 1,25 \cdot I_n = 1,25 \cdot 15,65 = 19,6$ А, а, отже, найбільший момент навантаження, який реалізує цей генератор, складе:

$$M_{\max} = 9,55 \cdot E_0 \cdot \frac{I_{a \max} + I_0}{n_n} = 9,55 \cdot 230 \cdot \frac{19,6 + 0,7}{1440} = 31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тобто, момент, створюваний системою навантаження стенду, лежить в діапазоні від 0 до $1,1M_{\text{ном}}$.

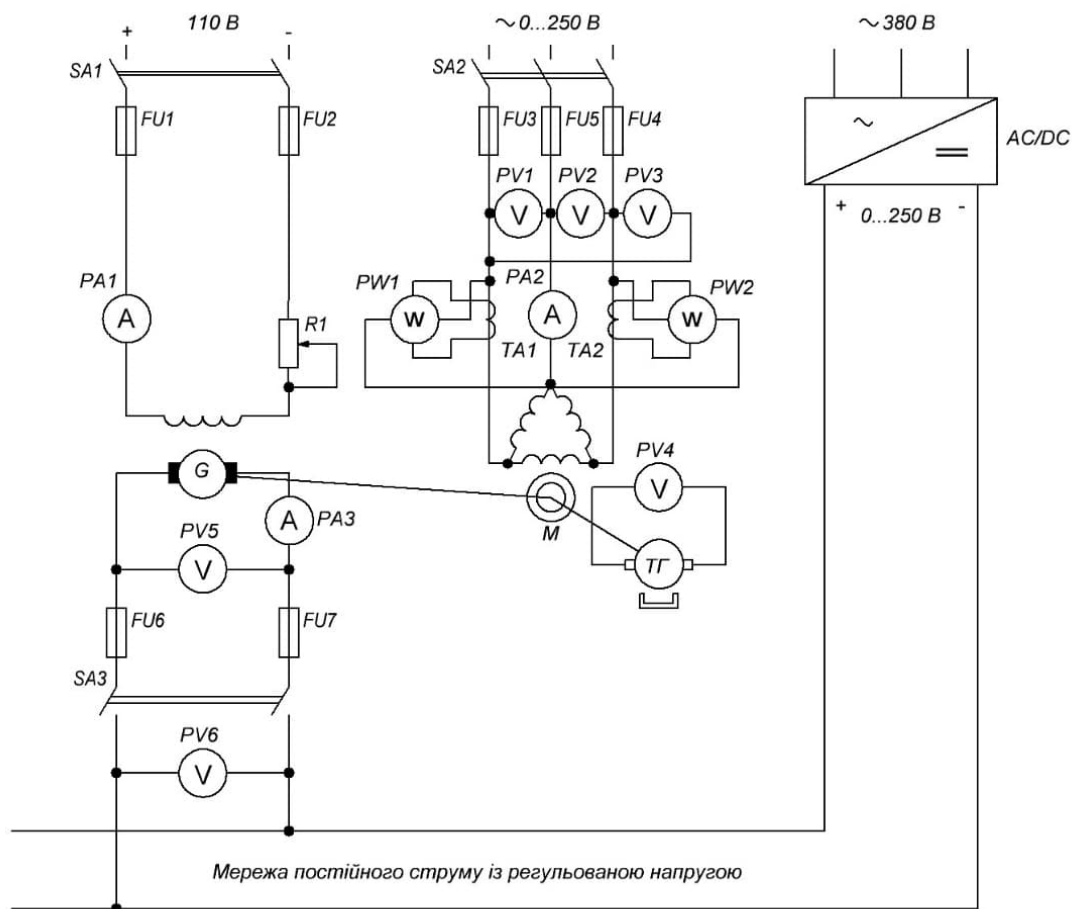


Рис. 5. Схема експериментального визначення координат асинхронного електроприводу на стенді із генератором постійного струму

Схема дослідів по визначенню координат асинхронного електроприводу на стенді із генератором постійного струму в якості навантаження показано на рис. 5.

Як можна бачити із рис. 5, живлення досліджуваного двигуна М здійснюється від регульованого джерела змінної трифазної напруги.

Вольтметри PV1...PV3 вимірюють лінійне значення цієї напруги. Амперметром РА2 вимірюємо лінійний струм, споживаний двигуном. Активну потужність, яку споживає досліджуваний двигун визначаємо методом двох ватметрів PW1, PW2, межі вимірювання яких за струмом розширено трансформаторами струму ТА1 та

ТА2. Мережа постійного струму із регульованою напругою отримує живлення від тиристорного агрегату АТ320/230-1, позначеного на схемі у вигляді блоку АС/DC. Генератор постійного струму підключається до мережі через рубильник SA3, при цьому напругу мережі та генератора узгоджуємо за показаннями вольтметрів PV5, PV6. Струм якоря генератора визначаємо за показами амперметра РА3. Струм

збудження генератора контролюємо амперметром РА1.

Вал досліджуваного двигуна з'єднано із первинним перетворювачем тахометра ТГ, який навантажено на вольтметр PV4. За його показами визначаємо частоту обертання двигуна.

Основні характеристики та метрологічні властивості перелічених вище засобів вимірювальної техніки наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Метрологічні властивості засобів вимірювальної техніки, використаних в схемі на рис. 5

Тип	Найменування	Діапазон виміру	Клас точності (похибка)
E59	Вольтметри PV1...3, 5...6	0...600 В	0,5
M2015	Амперметри РА1, РА3	0...30 А	0,2
E59	Амперметр РА2	0...5 А	0,5
ДТ-5М	Первинний перетворювач ТГ	0...9000 об/хв	-
И54М	Трансформатори струму ТА1, 2	0,5...50 А	0,2
Д5065	Ватметри PW1,2	0...1500 Вт	0,5
ТЕ-4В	Тахометр PV4	500...1000 об/хв	±55 об/хв
		1000...4000 об/хв	±40 об/хв

Використовуючи стенд, схему якого представлено на рис. 5, можна фіксувати безпосередньо криву $M = f(n)$, а також робочі характеристики у вигляді залежностей P_1 , I_1 , η , $\cos\varphi$, $s = f(P_2)$ як при $U_1 = U_{ном}$, так й при значеннях напруги $U_1 < U_{ном}$ при сталій її частоті $f_1 = const$ в діапазоні навантажень за моментом від 0 до 35 Н·м для двигунів потужністю до 5 кВт і синхронною частотою обертання 1500 об/хв.

Так як переважна більшість електроприводів критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту має в основі асинхронний двигун потужністю до 5 кВт, то використання розглянутого схемного рішення дозволяє експериментально досліджувати вплив зниження напруги на окремі робочі характеристики і координати електроприводів в режимах близьких до умов реальної експлуатації.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано для дослідження впливу зниження напруги живлення на робочі характеристики асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором потужністю до 4,5...5 кВт використовувати стенд взаємного навантаження, де в якості джерела гальмівного моменту використовується генератор постійного струму типу П-42 співмірної із досліджуваним двигуном потужності, що працює на мережу постійного струму із регульованою напругою.

Отримав подальший розвиток метод безпосереднього навантаження асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором малої потужності

при експериментальному дослідженні їх робочих та механічних характеристик на випробувальних стендах.

Отримана методика та результати стендових випробувань є вихідними даними для прогностичного моделювання стабільності роботи промислового обладнання ремонтних підприємств залізниць. Практичне застосування результатів дозволить розробити технічні рекомендації щодо захисту критичного обладнання від негативного впливу низької якості електроенергії, а також обґрунтувати впровадження заходів із компенсації напруги та використання відновлюваних джерел енергії для безперебійної роботи локомотивних депо.

Висновки

Розроблено методику експериментального визначення координат асинхронного електроприводу потужністю до 5 кВт та оцінки впливу на них зниження живлячої напруги.

Запропоновано схему дослідного стенду взаємного навантаження, де в якості джерела регульованого моменту опору використовується генератор постійного струму із незалежним збудженням, що працює на мережу із регульованою напругою.

Встановлено, що запропонований стенд може розвивати гальмівний момент в діапазоні 0...35 Н·м, таким чином моделюючи навантаження двигуна в межах від 0 до $1,1M_{ном}$, що для більшості електроприводів відповідає їх реальним умовам експлуатації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (ІЕС 60034-1:2017, ІДТ). На заміну ГОСТ 28173-89 (МЭК 34-1-83); чинний від 2019-08-01. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 74 с.
2. Experimental Benchmarking of Existing Offline Parameter Estimation Methods for Induction Motor Vector Control / B. K. Reddy та ін. *Technologies*. 2024. Т. 12, № 8. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies12080123>.
3. Шаповалов О. С., Карасьов О. П. Випробування асинхронних трифазних двигунів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2023. № 18. С. 46–50. URL: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2019/254550>.
4. Hamdy Mohamed Soliman. Studying the Steady State Performance Characteristics of Induction Motor with Field Oriented Control Comparing to Scalar Control. *EJENG*. Т. 1, № 2. С. 18–25. URL: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2016.1.2.115>.
5. Analysis Characteristics and Performance of Induction Motor Using MATLAB / N. S. Jadhav та ін. *JEDT*. 2024. С. 16–24. URL: <https://matjournals.net/engineering/index.php/JEDT/article/view/1123>
6. Tengfei M. Simulation Study on Mechanical Properties of Three-Phase Asynchronous Motor. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Control Systems*. 2015. С. 200–205. URL: <https://doi.org/10.2991/mecs-15.2015.39>.
7. Popenda A. Mathematical Modelling of Induction Motor with a Saturated Magnetic Circuit. *Przegld Elektrotechniczny*. 2015. Т. 91, № 3. С. 145–150..
8. Malyar V. S. Mechanical Characteristics of a Three-Phase Induction Motor Supplied from a Single-Phase Network. *Electrical and Computer Engineering, NTU KhPI*. 2016. С. 112–120.

9. Malyar V. S., Malyar A. V., Andreishyn A. S. A METHOD FOR CALCULATING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTORS WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. № 2. С. 9–13. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.2.02>
10. Konuhova M. Induction Motor Dynamics Regimes: A Comprehensive Analysis. *Applied Sciences*. 2025. Т. 15, № 2. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.3390/app15020350>.
11. Безрученко В., Варченко В., Чумак В. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посіб. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В Лазар., 2003. 252 с.
12. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. асинхронні машини: навч. посіб. / В. Грабко та ін. Вінниця: ВНТУ, 2007. 197 с.
13. E59. *zapadpribor.com*. URL: <https://zapadpribor.com/ua/e59/>
14. M2015. *zapadpribor.com*. URL: <https://zapadpribor.com/ua/m2015/>
15. Датчик тахометра ДТ-5 МЕТРОЛОГ. *Інтернет-магазин МЕТРОЛОГ - Все для точних вимірів*. URL: https://metrolog.com.ua/ua/product/datchik_tahometra_dt5
16. Тахометри магнітоіндукційні ТЕ-4В, магнітоіндукційний тахометр ТЕ-4В, Тахометр магнітоіндукційний ТЕ-4В, Тахометр ТЕ-4В - купити в Україні. *Лабораторні прилади, вимірювальний інструмент, випробувальне обладнання - поставка, ремонт обслуговування | ТОВ НВФ Стандарт-М*. URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/tahometry/tahometry-magnitoindukcionnye-te4v?mova=uk>
17. Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков та ін. Дніпро: НТУ "Дніпр. політехніка", 2020. 408 с.

Надійшла в редколегію 20.10.2025

Прийнята до друку 30.12.2025

V. DOSKOCH, O. BALICHUK

EXPERIMENTAL SETUP FOR DETERMINING THE COORDINATES OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE USING A MUTUAL LOAD STAND

Purpose. The work is aimed at developing a methodology for experimental research into the influence of reduced supply voltage on the operating and mechanical characteristics of squirrel-cage induction motors with a power of up to 5 kW. The research is focused on critically important technological equipment of railway transport enterprises (locomotive depots, repair plants), which in modern conditions is often operated in power supply modes with low quality indicators. **Methods.** The work uses a comprehensive analysis of the technical equipment of railway enterprises, analytical methods for studying the properties of asynchronous machines, and methods for mathematical analysis of test results. The experimental part is based on the method of direct loading on a mutual load stand, where a DC machine with independent excitation is used as a braking device. The process includes preliminary measurement of the characteristics of idling and non-working speed for calibrating the measuring system. **Results.** A scheme of an experimental stand has been developed and practically tested, allowing to fix the coordinates of the electric drive (torque, speed, current) in a wide range of loads. It has been established that the use of a P-42 type generator as a

loading device allows to create a regulated braking torque from 0 to 35 N·m. This provides the possibility of modeling the operating modes of asynchronous motors with a capacity of up to 5 kW with a variation of the supply voltage. The described metrological base confirms the high accuracy of the obtained data for the further construction of real mechanical characteristics. **Originality.** The author first proposed to use a mutual load stand with a DC generator of proportional power to the engine, operating on a network with regulated voltage, specifically to assess the stability of non-traction railway consumers in conditions of unstable power supply. The method of direct loading of low-power machines has also been further developed, which, unlike analytical models, allows taking into account real electromagnetic processes in conditions of deviation of network parameters from nominal values. **Practical significance.** The obtained methodology and bench test results are the initial data for predictive modeling of the stability of industrial equipment operation at railway repair enterprises. The practical application of the results will allow developing technical recommendations for protecting critical equipment from the negative impact of low-quality electricity, as well as justifying the implementation of voltage compensation measures and the use of renewable energy sources for the uninterrupted operation of locomotive depots.

Key words: non-traction consumers, electrical equipment of railway transport enterprises, mutual load stand, critical equipment, operating characteristics of asynchronous motors, experimental determination of the coordinates of asynchronous electric drives.

УДК 656.001.63:351.863:355.02(477)

Д. Ю. НЕСТЕРОВ^{1*}, Є. В. ХОМЕНКО^{2*}, В. І. ІВАНЧЕНКО^{3*}, Я. Ф. МУСТАФАЄВА^{4*}

^{1*} Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту вул. Набережна перемоги, 386, м. Дніпро, Україна, 49094, тел: +380675685603, ел. пошта: 2016ndu@gmail.com, ORCID: 0009-0004-5992-3069

^{2*} Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту вул. Набережна перемоги, 386, м. Дніпро, Україна, 49094, тел: +380661060309, ел. пошта: ek70282@gmail.com, ORCID: 0009-0006-7006-3439

^{3*} Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту вул. Набережна перемоги, 386, м. Дніпро, Україна, 49094, тел: +380502583994, ел. пошта: naykaIvanchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0008-2913-4965

^{4*} Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту вул. Набережна перемоги, 386, м. Дніпро, Україна, 49094, тел: +380500198158, yanaeconomy10@icloud.com, ORCID: 0009-0007-0215-204X

ПЕРВИННІ РИЗИКИ ЄДИНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В УМОВАХ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ

Мета. Метою дослідження є проведення систематичного аналізу причин та механізмів, що генерують первинні ризики для ЄТСУ та визначення можливих заходів протидії. **Методи.** Дослідження виконані на підставі аналізу наукових, аналітичних та нормативних джерел, присвячених оцінці стану транспортної інфраструктури України в умовах воєнних дій, з використанням методів системного аналізу, контент-аналізу даних міжнародних і національних звітів щодо пошкодження об'єктів ЄТСУ. **Результати.** Встановлено, що первинні ризики для ЄТСУ мають цілеспрямований характер і пов'язані з системним ураженням транспортних вузлів. Виявлено відсутність у чинній нормативній базі методики класифікації таких ризиків за типами фізичного впливу та рівнем загрози. Сформовано розширену типологію фізичних уражень для автомобільного, залізничного, морського, авіаційного та трубопровідного секторів, а також визначено зв'язки між військовими цілями атак і наслідками для інфраструктури. Узагальнення дозволило виокремити спільні системні вразливості ЄТСУ – енергетичну залежність, географічну концентрацію пошкоджень і критичність логістичних вузлів, що лягли в основу моделі оцінки ризиків і заходів їх мінімізації. **Наукова новизна.** Вперше здійснено комплексне дослідження спільних вразливостей ЄТСУ, які проявляються під час воєнних дій. Доведено, що ризики генеруються не лише прямими ударами по транспортних об'єктах, а й атаками на суміжні сектори, зокрема енергетичну інфраструктуру, що створює каскадний ефект паралічу електрифікованих ділянок залізничної. Обґрунтовано та емпірично підтверджено концепцію “вузлової вразливості” транспортної мережі України. Аналіз пошкоджень показав: стратегія агресора зосереджена на руйнуванні невеликої кількості критичних вузлів (мости, залізничні розв'язки, порти), що спричиняє непропорційно великі розриви у мережі та її системну деградацію. Введено в науковий обіг поняття “транспортних пустель” як довгострокового наслідку концентрованих атак, що веде до фізичної та соціально-економічної ізоляції регіонів. **Практична значимість.** Отримані результати можуть слугувати аналітичною основою для розроблення методики оцінювання та мінімізації первинних ризиків ЄТСУ, удосконалення державних програм захисту критичної інфраструктури, а також для підготовки практичних рекомендацій щодо планування інженерного укріплення транспортних вузлів і підвищення стійкості логістичних маршрутів у зоні бойових дій.

Ключові слова: Єдина транспортна система, первинні ризики, інфраструктура, безпека, логістика, життєдіяльність, критична інфраструктура.

Вступ

Єдина транспортна система України є не просто економічним активом, а критично важливим елементом національного суверенітету, що забезпечує військову мобільність, соціальну зв'язність та економічну стійкість. Її стабільне функціонування є фундаментальною передумовою для оборони держави та її повоєнного відновлення. В умовах повномасштабної війни роль ЄТСУ трансформувалася, набувши критичного значення для перевезення військових вантажів, забезпечення мобільності військ, здійснення евакуаційних заходів для цивільного населення

та доставки гуманітарної допомоги. Таким чином, ЄТСУ є системою вищого порядку важливості для національної безпеки та сталого розвитку.

Повномасштабне вторгнення російської федерації з лютого 2022 року системно націлене на ЄТСУ. Воно виходить за рамки випадкових чи локальних ударів: стратегічний вибір критичних логістичних вузлів, залізничних коридорів, мостових переходів і портів комплексів свідчить про усвідомлену атаку на здатність країни розміщувати ресурси та резерви в часи кризи. Ця обставина створює окремий клас первинних ризиків – ризиків, що виникають безпосередньо у

момент військових дій і позначаються як фізичне руйнування компонентів інфраструктури. Первинні ризики не трансформуються опосередковано через економічні показники, а завдають негайних тактичних і оперативних втрат, що влучають у саму здатність до мобілізації та відновлення.

Існуючі аналітичні роботи, що вивчають наслідки агресії, здебільшого зосереджуються на кількісній оцінці збитків та вторинних економічних наслідках: падіння ВВП, обсяги пошкоджених активів, витрати на відбудову. Такий підхід важливий для макроекономічного планування, але він лишає поза увагою ланцюги прийняття воєнних рішень, тактичні схеми ураження та механізми вибору цілей, які породжують ці збитки.

Відсутність системного аналізу генезису первинних ризиків – тобто причинно-наслідкових ланцюгів, які формуються внаслідок військових рішень, типів озброєння, вибору цілей та ритму атак – створює аналітичну прогалину. Без її заповнення неможливо сформувати ефективні моделі прогнозування, захисту та адаптації транспортної системи до умов тривалої агресії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням функціонування транспортної системи України, аналізу її стану та визначенню перспектив розвитку присвячено значну кількість наукових праць вітчизняних дослідників. Їхні дослідження охоплюють економічну ефективність, інфраструктурний розвиток, оптимізацію логістики та інтеграцію до міжнародних мереж. У роботі Семенди Д. і Семенди О. [1] розглянуто адаптацію логістичних процесів до умов війни, перебудову маршрутів і втрати інфраструктурних зв'язків. Їх дослідження базуються на оцінці змін після 2022 року. У звіті Світового банку подано оцінку масштабів інфраструктурних руйнувань в Україні, зокрема понад 13 500 км доріг і близько 600 мостів [2]. Документ є основою для планування відновлення транспортної системи на державному рівні. Дослідники Киндич Т. та Радинський С. у своїй доповіді висвітлюють виклики, пов'язані з логістичними витратами й зміною маршрутів. Вони наголошують на потребі розвитку локальних транспортних мереж та посилення інфраструктурної адаптивності [3]. Питання кібербезпеки розглядається в наказі Державної служби спеціального зв'язку, де представлено методику оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури, включаючи транспортний сектор [4]. У доповіді Національного інституту стратегічних

досліджень йдеться про пріоритети розвитку реального сектору економіки, де транспортна система розглядається як один із ключових елементів економічної безпеки держави [5]. Систематизація ризиків Єдиної транспортної системи знайшла відображення в аналітично-довідниковому матеріалі за редакцією полковника Є. Хоменка [6], де детально проаналізовано військові, логістичні та інституційні виклики, що поставили перед ЄТСУ у період 2022-2025 років. Таким чином, сучасні наукові та аналітичні джерела створюють підґрунтя для стратегічного осмислення ролі транспорту в умовах війни та формування національної політики щодо його відновлення та стійкості. Разом з тим питання причинно-наслідкових зв'язків первинних ризиків ЄТСУ приділено недостатньо уваги. Відтак слід розуміти, що первинні ризики є не випадковими побічними збитками, а навмисними, фізичними проявами послідовної російської військової стратегії, спрямованої на досягнення системного колапсу шляхом ураження критичних вузлів та експлуатації іманентних вразливостей системи.

Мета статті

Проведення систематичного аналізу причин та механізмів, що генерують первинні ризики для ЄТСУ та визначення можливих заходів протидії.

Виклад основного матеріалу

На початку необхідно визначити певні ключові поняття. В дослідженні «Ризики та вразливості критичної інфраструктури України в сучасних умовах російсько-української війни» сформульовано тетрада «Проблема-Вразливість-Загроза-Ризик», яка є основою для розуміння першопричин збоїв. Так, авторами ризик визначається як: «...потенційна шкода, що виникає внаслідок реалізації загрози, яка використовує існуючу вразливість. Ризик є функцією ймовірності реалізації загрози та масштабу потенційних наслідків». Тому ми будемо оперувати поняттям «ризик», адже як зазначають автори далі: «...оцінка ризиків об'єднує ймовірність реалізації загрози та потенційний масштаб наслідків усунення вразливостей і зниження ризиків – це проактивний підхід, який переходить від ліквідації наслідків до зміцнення системи» [7, с. 9].

Первинні ризики визначаються як прямі, кінетичні та фізичні впливи на транспортні активи. Прикладами є обвал прогону мосту, вирва

на злітно-посадковій смузі або зруйнований портовий термінал. Це початкова точка збою, з якої впливають усі інші наслідки. Важливо відрізнити первинні ризики від вторинних (наприклад, зростання логістичних витрат, втрата доходів) та каскадних (наприклад, вплив блокади портів на залізничну систему). Вторинні та каскадні ризики є наслідками первинних, але не є предметом цього дослідження. Таке розмежування дозволяє чітко окреслити межі аналізу.

Наукові дослідження стійкості інфраструктури часто використовують так звану концепцію «4R» (Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity – Міцність, Надлишковість, Винахідливість, Швидкість), яка надає методологічну основу для оцінки як вразливостей, так і заходів реагування [8]. Сучасні конфлікти характеризуються навмисним розмиванням меж між цивільними та військовими об'єктами, що робить критичну інфраструктуру пріоритетною цілью. Це вимагає адаптації класичних підходів до аналізу ризиків з урахуванням стратегічних намірів супротивника.

Характер, масштаби та вибір цілей для фізичного руйнування свідчать про те, що генерація первинних ризиків є не побічним продуктом загальних бойових дій, а однією з ключових цілей російської кампанії. Це форма інфраструктурно-центричної війни. Наявні дані показують, що пошкодження розподілені нерівномірно; систематичних ударів зазнають конкретні типи активів: мости, тягові підстанції залізниці, портові зернові термінали. Військовий аналіз підтверджує наявність російської стратегії, спрямованої на ураження критичної інфраструктури з метою паралізації економіки та військової логістики України. Отже, первинний ризик (наприклад, зруйнований міст) слід розглядати не як випадкову подію, а як результат цілеспрямованого впливу, що має на меті порушення функціональної цілісності інфраструктурної системи. Такий підхід передбачає переосмислення характеру загроз: вони не є технічними збоями, а реалізованими намірами противника. Відповідно, акцент має бути зміщений із локального реагування на формування комплексної моделі захисту, яка поєднує превентивні, адаптивні та відновлювальні компоненти.

Військова стратегія російської федерації відкрито передбачає ураження критичної інфраструктури для досягнення стратегічних цілей: економічного примусу, порушення військових ліній постачання (блокування) та деморалізації

цивільного населення [9]. Ця доктрина є основою для систематичних атак на ЄТСУ, перетворюючи її на поле бою. Аналіз показує, як ця доктрина трансформується у вибір конкретних типів цілей, що можна згрупувати за функціональним призначенням:

- вузли логістичного блокування. Ключові мости через великі річки (наприклад, Дніпро, Інгулець), залізничні вузли та тунелі стають цільми для розриву наземних ліній комунікацій (Ground Lines of Communication, GLOCs), ізоляції українських військ та перешкоджання потоку західної військової допомоги [6].

- точки економічного виснаження. Портові термінали (порти “Великої Одеси”, Миколаїв, дунайські порти Ізмаїл, Рені, Усть-Дунайськ), зернові елеватори та промислові залізничні гілки систематично атакуються з метою знищення експортного потенціалу України, який є ключовим джерелом державних доходів [6].

- цілі для енергетичного паралічу. Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру навесні 2024 року, що призвели до знищення значних генеруючих потужностей (наприклад, Трипільської ТЕС та ДніпроГЕС), є прямим ударом по ЄТСУ. Знищення джерел генерації електроенергії є більш стратегічним підходом, ніж ураження окремих тягових підстанцій, оскільки це спричиняє каскадний ефект, що паралізує електрифіковану залізницю на великих ділянках [7].

Цілі для енергетичного паралічу: Тягові підстанції залізниці, що живлять електропоїзди та великі нафтобази стають цільми для знерухомилення як військового, так і цивільного транспорту, створюючи системний параліч.

Російські війська систематично атакують інфраструктуру “подвійного призначення” – активи, такі як великі залізничні вокзали та мости, що використовуються як цивільними, так і військовими. Це створює сприятливий юридичний наратив для атак, які максимізують шкоду цивільному населенню та поширюють терор, зберігаючи при цьому видимість військової легітимності. Міжнародне гуманітарне право (МГП) забороняє прямі напади на цивільні об'єкти, але дозволяє атакувати військові цілі, залишаючи об'єкти “подвійного призначення” у “сірій зоні” [10]. Для систематизації та наочного представлення виявлених первинних ризиків, їх причинних факторів, механізмів реалізації та наслідків, було розроблено розширену матрицю первинних ризиків (табл. 1).

Розширена матриця первинних ризиків для ЄТСУ 2022–2024 рр

Сектор транспорту	Первинний ризик (фізичне пошкодження)	Причинний фактор (військова мета)	Механізм реалізації (система озброєння / тактика)	Ілюстративні приклади та оновлені дані про збитки (станом на кінець 2024 р.)
Автомобільний	Руйнування дорожнього покриття	Уповільнення пересування військ та логістики	Артилерійські обстріли, авіаудари, рух важкої бронетехніки	Пошкоджено понад 26 000 км доріг; збитки \$28,3 млрд.
	Обвал прогонів мосту	Блокування наземних ліній комунікацій (GLOCs)	Високоточні удари балістичними/крилатими ракетами (напр., “Іскандер”, “Кинджал”)	Зруйновано або пошкоджено 346 мостів на підконтрольних територіях, зокрема Антонівський міст та міст біля Чорноморська.
Залізничний	Руйнування вокзалу та колій	Тероризування цивільного населення, блокування евакуації та військової логістики	Удар балістичною ракетою “Точка-У” з касетною бойовою частиною; удари по інфраструктурі	Удар по вокзалу в Краматорську (загинула 61 особа); пошкодження вокзалу в Дніпрі (квітень 2024); загальні збитки \$4,3 млрд.
	Знищення пасажирських вагонів	Ураження військового ешелону (заявлено РФ)	Удар балістичною ракетою «Іскандер»	Удар по станції Чаплине (загинуло 25 осіб).
	Знищення тягової підстанції / генеруючих потужностей	Параліч електрифікованого транспорту	Масована атака дронів-камікадзе або крилатих ракет	Систематичні удари по тягових підстанціях УЗ; знищення Трипільської ТЕС та ДніпроГЕС у 2024 році.
Морський / Річковий	Руйнування портів терміналів/елеваторів	Економічне виснаження, зрив експорту зерна	Удари крилатими ракетами (“Калібр”, “Іскандер-К”) та дронами	Систематичні атаки на порти Одеси, Чорноморська та Дунаю (2024-2024); пошкоджено понад 280 об’єктів портової інфраструктури; збитки \$0,85 млрд.
	Мінування морських акваторій	Блокада судноплавства, створення зони заборони доступу	Розгортання морських якірних та дрейфуючих мін	Забруднення мінами північно-західної акваторії Чорного моря.
Авіаційний	Руйнування злітно-посадкових смуг та терміналів	Досягнення переваги в повітрі, параліч авіасполучення	Координовані ракетні удари на початку вторгнення; періодичні удари по аеродромах	Пошкоджено 19 цивільних аеропортів; збитки \$2 млрд.
Трубопровідний	Пошкодження компресорних станцій та ПСГ	Порушення транзиту газу; геополітичний тиск	Ракетні удари та атаки БпЛА по наземній інфраструктурі	Удари по ПСГ на заході України (весна 2024).

* Таблицю складено авторами на основі джерел [6, 11, 12, 14]

Удари по залізничних вокзалах у Краматорську та Чаплиному були виправдані росією як удари по “військових ешелонах” [11]. Однак ці вокзали були відомими великими центрами евакуації цивільного населення, а час та тип озброєння (наприклад, касетні боеприпаси в Краматорську) були невибірковими та спрямованими

на максимальну кількість жертв серед цивільних [12]. Це свідчить про навмисний процес: обирається ціль, яка є беззаперечно важливою для військової логістики (що робить її “легітимною” ціллю за поблажливого тлумачення МГП), але водночас є місцем скупчення цивільних. Атака досягає військової мети – порушення логістики

– і одночасно тероризує населення, що є порушенням принципу розрізнення [13]. Це не просто військовий злочин, а системна практика, що використовує неоднозначність міжнародного права як зброю. Детальний аналіз атак на залізничні вокзали по Краматорську (ракета “Точка-У” з касетною бойовою частиною) та Чаплиному (ракета “Іскандер”), свідчить про навмисне ураження саме місць скупчення пасажирів та рухомого складу [11].

Окремим свідченням еволюції стратегії росії стали цілеспрямовані атаки у серпні 2025 року на компресорні станції Оператора ГТС України на Одещині. Ці об’єкти є ключовими елементами Трансбалканського газопроводу, який використовується для постачання газу з LNG-терміналів Греції та тестових обсягів азербайджанського газу до українських підземних сховищ (ПСГ) та потенційно до Європи. Ця атака є не просто військовою дією проти України. Вона демонструє перетворення кінетичної зброї на інструмент міжнародного енергетичного шантажу. Ураження інфраструктури, критично важливої для диверсифікації постачання газу до Європи, є прямим сигналом не лише Києву, а й його європейським партнерам та альтернативним постачальникам, таким як Азербайджан. Таким чином, російська федерація демонструє свою здатність фізично знищити будь-яку інфраструктуру, що загрожує її монополії на енергетичному ринку, переносючи поле бою у геополітичний вимір.

Аналіз автомобільної та мостової інфраструктури показує застосування двох різних підходів. Високоточні удари балістичними та крилатими ракетами, такими як «Іскандер», спрямовані на критичні структурні елементи мостів (опори, прогони) для забезпечення їх повного руйнування та тривалого виведення з ладу [15]. На відміну від цього, артилерійські обстріли та авіаудари по ключових автомагістралях мають на меті створення вирв та пошкодження дорожнього покриття для ускладнення та уповільнення руху транспорту. Наслідком є структурний колапс понад 344 великих мостів, що розірвало регіональні зв’язки та змусило транспорт рухатися довгими об’їзними шляхами. Масштабні пошкодження понад 26,000 км дорожнього покриття призвели до прискореного зносу транспортних засобів та значного уповільнення логістики.

Окремим напрямком є систематичні удари по тягових підстанціях з метою знеструмлення мережі та зупинки руху електропоїздів, які склада-

ють основу залізничних перевезень [14]. Як наслідок – пряме фізичне руйнування вокзалів, систем сигналізації та понад 507 км колій. Втрата локомотивів та вагонів. Ключовим фізичним наслідком є створення «електричних пустель» на залізничній мережі, що змушує використовувати менш ефективні та дорожчі дизельні локомотиви, знижуючи пропускну здатність усієї системи.

Систематичне використання крилатих ракет та дронів-камікадзе для знищення конкретних портових активів: зернових силосів, перевантажувальних кранів, резервуарів з паливом в портах Одеси, Чорноморська та на Дунаї. Окремим процесом є масштабне та невибіркове мінування північно-західної акваторії Чорного моря, що створює довготривалу фізичну загрозу. Прояв – в фізичному руйнуванні понад 200 об’єктів портової інфраструктури. Наявність сотень морських мін, як якірних, так і дрейфуючих, що становлять пряму фізичну загрозу для будь-якого судна, фактично перетворюючи сам морський простір на зброю.

Авіаційна інфраструктура зазнала критичних пошкоджень після першої хвилі атак 24 лютого 2022 року, яка включала скоординовані удари по злітно-посадкових смугах, командно-диспетчерських пунктах, радіолокаційних станціях та системах ППО на всіх великих цивільних аеродромах. Мета – досягнення негайного паралічу повітряного простору. В результаті – повна фізична нейтралізація 19 цивільних аеропортів. Пошкодження включають вирви на злітно-посадкових смугах, зруйновані термінали (наприклад, у Харкові, Херсоні) та втрату критично важливого навігаційного обладнання, що робить їх непридатними для використання в осяжному майбутньому.

Синтез наведених вище даних про ураження транспортної інфраструктури свідчить про те, що вразливість ЄТСУ сконцентрована в її вузлах: мостах, залізничних розв’язках, портах, підстанціях. Руйнування відносно невеликої кількості цих вузлів створює непропорційно великі фізичні розриви в мережі. Це є класичним постулатом теорії мереж, застосованим до інфраструктурної війни, де метою є не тотальне знищення, а виведення з ладу ключових елементів для досягнення максимального ефекту за мінімальних витрат.

Залежність як залізничного (тягові підстанції), так і міського транспорту (тролейбусні/трамвайні підстанції) від централізованої національної енергосистеми є критичною спільною вра-

зливистю. Атака на енергетичний об'єкт одночасно є атакою на транспортну систему, що ілюструє міжсекторальний первинний ризик, який оминає пряме ураження транспортних активів. Це робить енергетичну інфраструктуру пріоритетною ціллю для досягнення каскадного ефекту, що паралізує кілька секторів одночасно.

Картографування подій, пов'язаних з первинними ризиками, виявляє значну концентрацію фізичних пошкоджень у прифронтових областях, (Донецька, Харківська, Херсонська, Луганська, Запорізька, Сумська, Чернігівська) та вздовж ключових логістичних коридорів. Сукупний ефект концентрованих первинних ризиків у певних регіонах призводить до створення «транспортних пустель» – територій, де щільність зруйнованих мостів, замінованих доріг та недіючих залізниць фізично ізолює громади від решти країни. Це є стратегічним, а не лише тактичним результатом. Дані свідчать про інтенсивні руйнування в конкретних регіонах. Наслідком є не просто «зламаний міст тут, пошкоджена дорога там», а системний збій усієї регіональної мережі. Ця ізоляція унеможливує доставку гуманітарної допомоги, економічну діяльність та повернення переміщених осіб, що фактично сприяє депопуляції та ускладнює майбутню реінтеграцію. Таким чином, спільність географічної концентрації ризиків є не просто статистикою, а доказом процесу стратегічної ізоляції, що перетворює військову кампанію фізичного руйнування на довгостроковий інструмент демографічного та економічного інжинірингу.

В результаті виникає питання: яким чином можна зупинити або зменшити наслідки первинних ризиків, зосереджуючись на запобіганні або негайному пом'якшенні фізичного впливу.

Активний рівень захисту (запобігання ризикам). Аналіз ролі багаторівневих систем протиповітряної оборони є ключовим. Сучасні зенітно-ракетні комплекси, такі як Patriot та IRIS-T, відіграють вирішальну роль у запобіганні матеріалізації первинних ризиків, перехоплюючи засоби ураження (ракети, дрони) до того, як вони досягнуть цілі [16]. Це найефективніша, хоча й найбільш ресурсозатратна, стратегія мінімізації. Ефективність ППО безпосередньо корелює зі здатністю захистити критичну інфраструктуру та зменшити кількість фізичних пошкоджень.

Пасивний захист та інженерна стійкість (зменшення наслідків). Дослідження заходів пасивного захисту, що використовуються для зменшення фізичних пошкоджень у разі влучання, є важливим. Це включає використання габіонів, мішків з піском та бетонних укріплень

для захисту критичних компонентів, таких як трансформатори на тягових підстанціях [17].

Крім того, концепція “Відбудувати краще, ніж було” (Build Back Better) пов'язує реконструкцію з іманентною стійкістю. Йдеться не просто про відновлення, а про перепроєктування з урахуванням стійкості: використання міцніших матеріалів, створення надлишковості (наприклад, альтернативних маршрутів) та впровадження принципів розосередження для зменшення привабливості окремих цілей.

Критичну функцію у пом'якшенні негайних наслідків первинного ризику виконують спеціалізовані інженерні підрозділи, такі як Державна спеціальна служба транспорту. Їхній досвід у швидкому розгортанні тимчасових та модульних мостів (наприклад, типів Bailey, Acrow) є яскравим прикладом застосування принципу “Швидкості” (Rapidity) з концепції стійкості для відновлення зв'язності мережі та мінімізації тривалості збоїв [18]. Ця здатність до оперативного ремонту є ключовим елементом підтримки функціонування транспортних коридорів в умовах постійних атак.

Невідворотність покарання має виступати як стримуючий фактор. Окрім фізичних заходів безпеки, ключову роль у стримуванні агресора відіграє правовий вимір. Атаки, подібні до цілеспрямованого удару по заповненому цивільними вокзалу в Краматорську, є не просто трагедією, а воєнним злочином за міжнародними законами, такими як Римський статут та Женевські конвенції.

Коли кожна така атака чітко й голосно називається злочином, а винні переслідуються на міжнародному рівні, це стає потужним попередженням для інших. Створення прецеденту, де за вбивство мирних людей настає реальна відповідальність, є довгостроковим запобіжником проти найжахливіших проявів агресії та свідомого створення небезпеки для цивільних. Це перетворює абстрактні норми права на реальний інструмент захисту.

Наукова новизна

1. Вперше здійснено комплексне дослідження спільних вразливостей ЄТСУ, які проявляються під час воєнних дій. Доведено, що ризики генеруються не лише прямими ударами по транспортних об'єктах, а й атаками на суміжні сектори, зокрема енергетичну інфраструктуру, що створює каскадний ефект паралічу електрифікованих ділянок залізниць.

2. Обґрунтовано та емпірично підтверджено концепцію “вузлової вразливості” транспортної мережі України. Аналіз пошкоджень показав: стратегія агресора зосереджена на руйнуванні невеликої кількості критичних вузлів (мости, залізничні розв’язки, порти), що спричиняє непропорційно великі розриви у мережі та її системну деградацію.

3. Введено в науковий обіг для контексту воєнних дій поняття “транспортних пустель” як довгострокового стратегічного наслідку концентрованих атак, що веде до фізичної та соціально-економічної ізоляції регіонів.

Напрямки майбутніх досліджень

Для подальшого поглиблення розуміння проблеми пропонуються такі напрямки досліджень.

Кількісне моделювання та предикативний аналіз, що передбачає розробку математичних та імітаційних моделей для прогнозування ймовірних цілей атак на основі аналізу попередніх ударів, а також для оцінки каскадних відмов унаслідок комбінованих кінетичних та кібератак на взаємопов’язані системи (транспорт, енергетика, комунікації).

Дослідження довгострокових (10–20 років) наслідків створення «транспортних пустель» для соціальної згуртованості, регіональної ідентичності та довіри до державних інституцій у постраждалих громадах, з метою розробки ефективних стратегій повоєнної реінтеграції.

Інженерна стійкість та інноваційні технології відновлення, що передбачають аналіз балансу між швидкістю відновлення функціональності (“Build Back Fast”) та довгостроковою стійкістю (“Build Back Better”) в умовах триваючого конфлікту. Оцінка доцільності та масштабованості застосування передових інженерних рішень, таких як модульне будівництво та нові композитні матеріали, безпосередньо в зоні бойових дій.

Адаптація міжнародного гуманітарного права в напрямку розробки пропозицій щодо еволюції норм міжнародного гуманітарного права для усунення правової неоднозначності щодо об’єктів «подвійного призначення». Це включає адаптацію принципів розрізнення та пропорційності для адекватного врахування довгострокових та опосередкованих наслідків атак на мережеву інфраструктуру.

Проведення порівняльних стратегічних досліджень тактик та цілей ураження цивільної інфраструктури в Україні, Сирії та Ємені для виявлення спільних закономірностей та розробки єдиної теорії інфраструктури

ктурно-центричної війни, що дозволить краще прогнозувати та протидіяти цій загрозі на глобальному рівні.

Висновки

Встановлено, що первинні ризики є прямим наслідком цілеспрямованої та адаптивної стратегії росії, яка полягає у фізичному руйнуванні критичних вузлів транспортної та пов’язаної з нею енергетичної інфраструктури. Аналіз підтвердив, що російська стратегія еволюціонувала від ураження окремих об’єктів до завдання комплексних ударів по енергетичних та газотранспортних системах для досягнення максимального каскадного ефекту та економічному паралічу держави.

Розроблена розширена матриця первинних ризиків, вперше пов’язує військові цілі агресора з конкретними типами фізичних уражень інфраструктури. На основі цього аналізу було виокремлено ключові системні вразливості ЄТСУ: енергетичну залежність, критичність логістичних вузлів та географічну концентрацію руйнувань, що веде до стратегічної ізоляції цілих регіонів (“транспортні пустелі”).

Практична значущість дослідження полягає в тому, що його результати надають аналітичну основу для переходу від стратегії реактивного ремонту до проактивного захисту. Запропоновані заходи протидії, що включають активний захист (системи ППО), пасивний інженерний захист (укріплення вузлів), оперативну стійкість (швидке відновлення силами спеціалізованих підрозділів) та міжнародно-правовий тиск, створюють підґрунтя для розробки комплексної державної політики. Це дозволяє змістити парадигму від “відновлення як було” до “стійкості за задумом” (Resilience by Design), інтегруючи принципи захищеності та надлишковості ще на етапі проектування.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Семенда Д. К., Семенда О. В. Адаптація транспортно-логістичної галузі України в умовах війни: виклики та перспективи. *Актуальні питання сучасної економіки : матеріали XVI Всеукраїнської наукової конференції* (м. Умань, 14 листопада 2024 р.). Умань : УНУС, 2024. С. 179–180. URL: <https://www.academia.edu/125704638>
2. *Ukraine - Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 - December 2024*. World Bank. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099022025114040022>

3. Киндич Т. В., Радинський С. В. Логістика в умовах війни. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Вінниця, 21–23 березня 2024 р.). Вінниця : ВНТУ, 2024. С. 112–113. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/45175/2/FMZKP_2024_Kyndych_T-Logistics_in_conditions_112-113.pdf

4. Про затвердження Методики та Критеріїв і показників оцінки стану захищеності об'єктів критичної інфраструктури : наказ Адміністрації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України від 14.01.2025 № 17. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0375-25#Text>

5. *Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни : аналітична доповідь*. Національний інститут стратегічних досліджень. Київ : НІСД, 2024. 23 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/ad_realsektor-2023.pdf

6. Хоменко Є. В., Нестеров Д. Ю., Ємел'янова С. М. *Ризики єдиної транспортної системи України в сучасних умовах українсько-російської війни : аналітично-довідковий матеріал*. Дніпро : Центр Досліджень, 2025. 77 с. URL: <https://www.academia.edu/130212204/>

7. Хоменко Є. В., Нестеров Д. Ю., Ємел'янова С. М. *Ризики та вразливості критичної інфраструктури України в сучасних умовах російсько-української війни : дослідження*. Дніпро : Центр Досліджень, 2025. 83 с. URL: <https://www.academia.edu/143544690/>

8. *Critical Infrastructure Resilience in Ukraine: Energy, Transportation, and Communication : Risk and Resilience Report*. Center for Security Studies (CSS), ETH Zurich. Zurich, 2024. 64 p. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000662463>

9. Росія змінила тактику ударів по енергетичній інфраструктурі України – FT. *Укрінформ – актуальні новини України та світу*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3849939-rosia-zminila-taktiku-udariv-po-energeticnij-infrastrukturii-ukraini-ft.html>

10. *Правові рамки для оцінки використання морення голодом в Україні*. Just Security. URL: <https://www.justsecurity.org/81335/legal-frameworks-for-assessing-the-use-of-starvation-in-ukraine-ua/>

D. NESTEROV, Y. KHOMENKO, V. IVANCHENKO, Y. MUSTAFAIEVA

11. Дейна А. РФ підтвердила удар по Чаплиному, не згадавши, що серед загиблих – діти. *Дзеркало тижня | Mirror Weekly*. URL: <https://zn.ua/ukr/UKRAINE/rf-pidтверdila-udar-po-chaplyno-zamovkavshi-shcho-sered-zahiblikh-diti.html>

12. *Ракетний удар по вокзалу Краматорська: розслідувачі підтвердили причетність армії РФ*. ТСН.ua. URL: <https://tsn.ua/ato/raketniy-udar-po-vokzalu-kramatorska-rozsliduvachi-pidтверdili-scho-zatakovyu-stoyit-armiya-rf-2277928.html>

13. *Як міжнародне гуманітарне право захищає цивільних осіб під час війни?* Товариство Червоного Хреста України. URL: <https://redcross.org.ua/news/2025/05/113363/>

14. Кулакова К. Росія атакує інфраструктуру Укрзалізниці, у Defense Express назвали головну мету ворога і як можна йому завадити. *NV.ua*. 2024. 28 липня. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/rf-b-ye-pozaliznichniy-infrastrukturii-ukrajini-analitiki-nazvali-golovnu-metu-voroga-i-yakiy-ye-vihid-50532895.html>

15. Міллер І. «Іскандери», «Калібри» та «Кинджали»: характеристики ракет, якими РФ б'є по Україні. *ГЛАВКОМ*. URL: <https://glavcom.ua/country/incidents/iskanderi-jikh-analohi-i-kharakteristiki-1016239.html>

16. Михайлишин В. Протиповітряна оборона відіграватиме все більшу роль у війні: огляд аналітики. *Повернись живим*. 2024. 1 березня. URL: <https://savelifе.in.ua/materials/analytics/protypovitryana-oborona-vidihravatyme-vs/>

17. Дейна А. Енергосистема України будує три рівні захисту від обстрілів, але блекауті можливі: яким буде захист. *Вільне радіо*. 2023. 23 листопада. URL: <https://freeradio.com.ua/enerhosistema-ukrainy-buduie-try-rivni-zakhystu-vid-obstriliv-ale-blekauty-mozhlyvi-iazym-bude-zakhyst/>

18. Нойгард А. Як в Україні відновлюють мости, зруйновані війною. *Свій дім*. 2024. 10 травня. URL: <https://sviydim.media/articles/rebuilt/yak-v-ukrayiny-vidnovlyuyut-mosty-zrujnovani-vijnoyu/>

Надійшла в редколегію 23.10.2025

Прийнята до друку 14.01.2026

PRIMARY RISKS OF THE UNIFIED TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE IN THE CONDITIONS OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR

Purpose. The purpose of the study is to conduct a systematic analysis of the causes and mechanisms that generate primary risks for the Unified Transport System of Ukraine (UTSU) and to determine possible countermeasures. **Methods.** The research was carried out on the basis of an analysis of scientific, analytical and regulatory sources devoted to assessing the state of the transport infrastructure of Ukraine in conditions of military operations, using methods of system analysis, content analysis of data from international and national reports on damage to UTSU facilities. **Results.** It was established that the primary risks for UTSU are targeted in nature and are associated with systemic damage to transport nodes. The absence of a methodology for classifying such risks by types of physical impact and

level of threat in the current regulatory framework was revealed. An expanded typology of physical damage was formed for the automobile, railway, maritime, aviation and pipeline sectors, and the connections between military targets of attacks and consequences for the infrastructure were also determined. The generalization allowed us to identify common systemic vulnerabilities of the Unified Transport System of Ukraine – energy dependence, geographical concentration of damage, and the criticality of logistics nodes, which formed the basis of the risk assessment model and measures to minimize them. **Scientific novelty.** For the first time, a comprehensive study of the common vulnerabilities of the ETS, which manifest themselves during military operations, has been carried out. It has been proven that risks are generated not only by direct strikes on transport facilities, but also by attacks on adjacent sectors, in particular energy infrastructure, which creates a cascading effect of paralysis of electrified railway sections. The concept of “nodal vulnerability” of the transport network of Ukraine has been substantiated and empirically confirmed. Damage analysis has shown that the aggressor’s strategy is focused on the destruction of a small number of critical nodes (bridges, railway junctions, ports), which causes disproportionately large gaps in the network and its systemic degradation. The concept of “transport deserts” has been introduced into scientific circulation as a long-term consequence of concentrated attacks, which leads to the physical and socio-economic isolation of regions. **Practical significance.** The results obtained can be used as an analytical basis for developing a methodology for assessing and minimizing primary UTSU risks, improving state programs for the protection of critical infrastructure, as well as for preparing practical recommendations for planning engineering reinforcement of transport nodes and increasing the resilience of logistics routes in the combat zone.

Keywords: Unified Transport System, primary risks, infrastructure, security, logistics, resilience, critical infrastructure.

УДК 656.2:624.042.8

Н. С. ЧЕРНОВА^{1*}, Р. Б. НОВІК^{2*}

^{1*}Кафедра «Економіка та менеджмент», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 80, ел. пошта n.s.chernova@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-8461-498X

^{2*}Факультет військової підготовки Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 480-41-71, ел. пошта r.b.novik@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2571-6641

МІЖНАРОДНІ ПІДХОДИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПІСЛЯ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ

Мета. У статті узагальнено міжнародні підходи до відновлення об'єктів залізничної інфраструктури після збройних конфліктів із фокусом на управлінських та інженерно-організаційних рішеннях, які дозволяють поєднати швидке відновлення сполучення з довгостроковим підвищенням стійкості мережі. **Методика.** Дослідження виконано на основі порівняльного аналізу документів міжнародних організацій (Світовий банк, Європейська Комісія, ООН), матеріалів фінансових інституцій та відкритих кейсів відновлення залізниць у країнах, що пережили збройні конфлікти (Україна, Грузія, Азербайджан, Ірак, Шрі-Ланка, країни Західних Балкан). Застосовано контент-аналіз підходів «швидке відновлення» (rapid repair), «реабілітація» та «відбудова з модернізацією»; а також метод структурного синтезу для формування рамки пріоритезації об'єктів. **Результати.** Запропоновано типологію відновлення залізничної інфраструктури у постконфліктних умовах, яка охоплює три взаємопов'язані фази: аварійне відновлення пропускної спроможності та безпеки руху; реабілітація ключових коридорів із відновленням технічних параметрів; відбудова «краще, ніж було» із інтеграцією сучасних систем сигналізації, захисту та цифрових інструментів управління активами. Обґрунтовано, що ефективність відновлення визначається не лише обсягом інвестицій, а й правилами пріоритезації, здатністю до швидких закупівель, та інституційною координацією між оператором, державою та донорами. На основі міжнародних прикладів показано: у короткостроковій перспективі вирішальними є тимчасові мости/обхідні схеми та оперативне відновлення критичних вузлів; у середньостроковій — відновлення швидкостей і систем безпеки; у довгостроковій — модернізація коридорів під нову логістику та кліматичну стійкість. Сформовано матрицю пріоритетів для відбору об'єктів (мости, перегони, вузли, системи СЦБ і зв'язку) за критеріями критичності маршруту, безпекового ризику, впливу на експортно-імпорتنі потоки, часу відновлення та вартості життєвого циклу. **Наукова новизна.** Розроблено інтегровану рамку прийняття рішень щодо відновлення залізничних об'єктів після конфлікту, що поєднує фазовий підхід, інструменти пріоритезації та вимоги стійкості. **Практична значимість.** Результати можуть бути використані органами управління транспортом, оператором інфраструктури та міжнародними партнерами для формування портфеля проєктів відновлення, визначення КРІ (час відновлення, відновлена пропускна спроможність, підвищення швидкостей, зниження аварійності) та підготовки технічних завдань у межах програм післявоєнної реконструкції.

Ключові слова: відновлення, залізнична інфраструктура, постконфліктна реконструкція, стійкість, критична інфраструктура, пріоритезація, коридори, управління активами, безпека руху, донорська координація.

Вступ

Залізнична інфраструктура у збройних конфліктах стає одночасно ціллю та критичним ресурсом: вона забезпечує мобільність населення, гуманітарні перевезення, військово-логістичні потоки, а також експортно-імпорتنі коридори, що підтримують макроекономічну стабільність. Пошкодження мостів, стрілочних переводів, систем сигналізації та електропостачання швидко фрагментують мережу, зменшують пропускну спроможність і підвищують операційні ризики. Досвід України засвідчує, що навіть за тривалих бойових дій базову дорожньо-залізничну

доступність у звільнених регіонах можливо оперативно відновлювати, але масштаби накопичених втрат і потреб у реконструкції залишаються надзвичайно високими [1-3].

Сучасні дослідження постконфліктного відновлення транспортної інфраструктури зміщують акцент від «повернення до стану до руйнувань» до концепції «build back better», що передбачає підвищення стійкості активів, цифровізацію управління та поліпшення безпеки [4, 19]. Водночас у залізничному секторі проблема ускладнюється необхідністю забезпечити технологічну сумісність, керованість руху та дотримання норм безпеки на всій довжині коридорів.

У літературі недостатньо систематизовано саме інструменти пріоритезації об'єктів (мости, вузли, СЦБ) та інституційні механізми швидких рішень у ситуації, коли ресурси обмежені, а загроза повторних уражень зберігається.

Однак упродовж 2020–2025 рр. сформувався помітний корпус рецензованих досліджень, що розкриває саме «інфраструктурно-мережевий» вимір відновлення та стійкості транспортних систем у кризових умовах. Зокрема, запропоновано конфліктно-орієнтовані рамки відбудови критичної інфраструктури із застосуванням дистанційних даних та підходу *resilience-by-assessment* для пріоритезації реконструкції (на прикладі транспортної мережі України) [20]. Для портфельного відновлення активів у конфліктних регіонах розробляються інтегровані системи оцінювання, що поєднують показники стійкості та сталості (зокрема, для мостових портфелів) [21]. У напрямі транспортної/залізничної стійкості активно розвиваються моделі оцінювання деградації та відновлення мереж, які враховують одночасні збої та взаємозалежності, включно з задачами оптимізації відновлення інфраструктури і управління перевезеннями [22, 23]. Огляди останніх років узагальнюють метрики стійкості, підходи моделювання та відновлювальні стратегії для рейкових систем і ширших інтегрованих транспортних мереж [24–26].

Попри це, залишається «невирішена частина», критична для практики відновлення залізниць у зонах бойових дій: відсутність уніфікованої матриці пріоритезації саме для залізничних об'єктів (мости, вузли, СЦБ/зв'язок, енергоживлення) з явним урахуванням ризику повторних уражень і обмежень доступу; (2) недостатня формалізація KPI, що безпосередньо відображають відновлення пропускної спроможності/продуктивності коридорів (поїздів/добу, тоннажу/добу, знятих обмежень швидкості) у зв'язку з рішеннями щодо черговості ремонтів. Саме ці прогалини зумовлюють потребу у прикладній рамці, що поєднує фазовість відновлення та формалізоване ранжування об'єктів для портфеля проєктів.

Мета

Метою статті є узагальнення міжнародних підходів до відновлення об'єктів залізничної інфраструктури після збройних конфліктів та формування прикладної рамки пріоритезації й планування, що поєднує швидке відновлення сполучення із довгостроковою модернізацією та підвищенням стійкості.

Методика

Дослідження виконано з використанням порівняльного аналізу кейсів та документів міжнародних організацій і фінансових інституцій. Зокрема, використано матеріали *Rapid Damage and Needs Assessment* для України (RDNA3...RDNA4) та похідні програмні документи щодо транспортного сектору [1, 3, 4, 15], а також публічні дані про відновлення залізничних об'єктів у Грузії (2008), Шрі-Ланці (після завершення громадянського конфлікту), Азербайджані (відбудова інфраструктури на територіях після конфлікту), та Іраку (інвестиційна програма модернізації залізниць) [13, 14, 16, 7, 10, 11]. Метод структурного синтезу застосовано для розроблення типології фаз відновлення та матриці пріоритетів, придатної для використання оператором інфраструктури й органами державного управління.

Результати

Типологія підходів до відновлення. Узагальнення міжнародного досвіду дозволяє виділити три фази відновлення залізничних об'єктів після конфлікту. Перша фаза – аварійне відновлення (*emergency/rapid repair*) – має на меті мінімально достатню пропускну спроможність і безпечний рух на критичних ділянках. Типові рішення: тимчасові мости, відновлення колії за спрощеними технічними умовами, обхідні схеми організації руху, мобільні засоби зв'язку, тимчасові системи контролю швидкості та ручне керування стрілками у вузлах.

Друга фаза – реабілітація коридорів (*rehabilitation*) – спрямована на повернення технічних параметрів (швидкості, осьові навантаження, надійність СЦБ) і стабілізацію експлуатації. На цьому етапі встановлюється пріоритетність коридорів і вузлів із найбільшим соціально-економічним ефектом, а також формуються рамкові контракти для прискорення закупівель і зниження транзакційних витрат.

Третя фаза – відбудова з модернізацією (*«build back better»*) – передбачає довгострокові інвестиції у системи сигналізації та зв'язку, підвищення стійкості мостів і земляного полотна, впровадження цифрового управління активами (*asset management*), а також інтеграцію вимог кібер- та фізичної безпеки. У програмних документах для України прямо підкреслюється потреба пріоритезації та координації інвестицій у транспортний сектор, який має одну з найбільших часток у загальних потребах відновлення [4, 15].

Інженерно-організаційні рішення «швидкого відновлення». Практика воєнних уражень демонструє, що залізничні мости та вузлові станції є об'єктами найвищого ризику, оскільки їх вихід з ладу призводить до «розриву» коридорів. У конфлікті в Грузії 2008 року пошкодження мостової споруди на ключовій лінії спричинило зупинку руху, але лінію було відновлено у стислий термін, що ілюструє ефективність оперативних ремонтів та тимчасових рішень за умови доступу до ресурсів і безпеки робіт [13]. Для аварійної фази критичною є наявність резерву матеріалів верхньої будови колії, мобільних мостових конструкцій, а також заздалегідь підготовлених планів обходу вузлів.

Для України міжнародні оцінки фіксують масштаби руйнування у транспортному секторі та необхідність поєднання аварійних ремонтів із системним «перепроєктуванням» під нову логістику [1, 3]. Важливий висновок полягає в тому, що аварійні роботи мають виконуватися за стандартизованими технічними рішеннями, щоб

уникнути накопичення «тимчасових» обмежень швидкості на роки: кожне тимчасове рішення повинно мати визначений горизонт заміни на капітальне та бути відображене у портфелі проєктів.

Відновлення як портфель проєктів: пріоритетизація та КРІ. Постконфліктне відновлення є багатокритеріальною задачею: одночасно потрібно мінімізувати час відновлення коридорів, забезпечити безпеку руху, зберегти вантажні потоки та раціонально використати дефіцитні ресурси. На основі узагальнення практик запропоновано матрицю пріоритетів (табл. 1), яка дозволяє ранжувати об'єкти за інтегральною оцінкою. До критеріїв доцільно включати: критичність маршруту для гуманітарних та експортних потоків; рівень безпекового ризику (повторні ураження, мінування, доступність); вплив на пропускну спроможність мережі та альтернативність маршрутів; тривалість і складність відновлення; вартість життєвого циклу та потенціал модернізації.

Таблиця 1

Узагальнена матриця підходів і показників ефективності відновлення залізничних об'єктів

Група об'єктів	Аварійне відновлення	Реабілітація	Модернізація	Типові КРІ
Мости/переходи	тимчасові конструкції, обмеження швидкості	капітальний ремонт/відбудова	підвищення стійкості, моніторинг	дні до відновлення сполучення; % мостів без обмежень
Колія та земляне полотно	локальний ремонт, обхідні схеми	відновлення проєктних параметрів	підвищення несучої здатності, дренаж	км знятих обмежень; осьові навантаження
Вузли/станції	тимчасова схема роботи, ручне керування	відновлення стрілок, електропостачання	оптимізація пропускну спроможності	поїздів/добу; затримки
СЦБ/зв'язок	мобільні засоби, резервні канали	відновлення систем безпеки	ERTMS/цифровізація (за потреби)	інциденти; рівень автоматизації
Енергопостачання	резервні джерела, локальні підключення	відновлення тягових підстанцій	стійкість, резервування	години простою; частота відмов

Для уніфікації відбору об'єктів відновлення запропоновано багатокритеріальне ранжування за зваженою сумою балів. Для кожного об'єкта і визначається інтегральний пріоритетний бал:

$$P_i = \sum_{k=1}^K (w_k \cdot s_{ik})$$

де w_k – вага k -го критерію ($\sum_{k=1}^K w_k = 1$),

s_{ik} – нормований бал для об'єкта i за критерієм k у шкалі 0...5 (5 — найвищий пріоритет),

K – кількість критеріїв.

У постконфліктних умовах застосовано $K = 6$ критеріїв і ваги: С1 – критичність коридору/вузла ($w_1 = 0,25$); С2 – безпековий ризик і ризик

повторних уражень ($w_2 = 0,20$); С3 – вплив на пропускну спроможність та альтернативність маршруту ($w_3 = 0,20$); С4 – тривалість відновлення (коротші строки – вищий бал) ($w_4 = 0,15$); С5 – вартість життєвого циклу/ремонтпридатність ($w_5 = 0,10$); С6 – потенціал модернізації/підвищення стійкості ($w_6 = 0,10$). Шкали балів задаються на рівні оператора/держави (наприклад, С4: 5 балів – ≤ 7 діб; 4 – 8...30 діб; 3 – 1...3 міс.; 2 – 3...6 міс.; 1 – > 6 міс.). КРІ портфеля доцільно прив'язувати до С1–С3 і фаз відновлення: відновлена пропускну спроможність (поїздів/добу, тон/добу); км ділянок зі знятими обмеженнями швидкості; кількість/частка

відновлених «вузьких місць» у вузлах; час відновлення сполучення (дні) для об'єктів аварійної фази.

Кількісний приклад наведено в табл. 2. Узгодження метрик і задач відновлення з сучасною науковою дискусією обґрунтовується у працях 2022-2025 рр. [20-26].

Таблиця 2

Приклад розрахунку інтегрального пріоритету P_i для об'єктів коридору (шкала 0...5)

Об'єкт	C1	C2	C3	C4	C5	C6	P_i
СЦБ ділянки C1	4	5	4	5	4	4	4.35
Міст M1 (коридор експорт)	5	4	5	3	2	4	4.1
Тягова підстанція E1	4	4	4	4	3	3	3.8
Стрілочні переводи T1	4	4	4	4	3	3	3.8
Станційний вузол S1	5	3	5	2	2	4	3.75
Перегін П1 (земполотно)	3	3	3	3	3	3	3.0

Алгоритм відновлення залізничної інфраструктури після збройних конфліктів доцільно реалізовувати як послідовність трьох взаємопов'язаних фаз, які формують логіку пріоритетизації об'єктів і побудови портфеля проєктів.

У межах Фази 1 (аварійне відновлення, *garid geraig*) здійснюється відновлення мінімально необхідної функціональності для забезпечення безпечного руху та запуску базової пропускної спроможності на критичних ділянках. Для цього застосовуються тимчасові інженерні рішення (обхідні схеми, тимчасові мости або підсилення), спрощені регламенти експлуатації, резервні канали зв'язку та організаційні заходи, які дозволяють швидко відновити сполучення за умов дефіциту часу та ресурсів.

Далі реалізується Фаза 2 (реабілітація коридорів), метою якої є повернення технічних параметрів експлуатації до нормативних або цільових значень для ключових коридорів і вузлів.

На цьому етапі відновлюються параметри колії та земляного полотна, стрілочні переводи, електропостачання, системи сигналізації, централізації та блокування, а також забезпечується стабільність технології перевезень. Організаційно Фаза 2 передбачає формування

переліку пріоритетних коридорів, використання прискорених процедур закупівель (у межах чинних правил), а також застосування рамкових контрактів для типових робіт і матеріалів.

Фаза 3 (модернізація / *build back better*) інтегрує інструменти підвищення стійкості та якості інфраструктури, щоб зменшити ризики повторних відмов, прискорити майбутнє відновлення та підвищити ефективність експлуатації. У межах цієї фази впроваджуються сучасні підходи до управління активами (*asset management*), системи моніторингу стану критичних споруд, рішення з резервування та захисту, а також цифрові інструменти планування ремонтів і управління пропускною спроможністю.

Ключовим елементом, що поєднує всі фази та забезпечує об'єктивну пріоритетизацію, є «паспорт об'єкта» – стандартизований профіль (картка) об'єкта інфраструктури, який формується до ухвалення рішень щодо черговості відновлення. Паспорт включає:

1. ідентифікаційні дані об'єкта та його роль у мережі (тип, географія, належність до коридору/вузла);
2. технічний стан і характер пошкодження (функціональні обмеження, рівень деградації параметрів);
3. критичність для перевезень (вплив на гуманітарні, пасажирські, експортно-імпорتنі потоки);
4. наявність альтернативних маршрутів і можливості об'їзду (ступінь мережевої заміності);
5. безпековий ризик, включно з імовірністю повторних уражень, мінуванням та доступністю робіт;
6. орієнтовні ресурси та строки відновлення (матеріали, техніка, персонал, тривалість);
7. очікувані результати та KPI після відновлення (відновлена пропускна спроможність, зняття обмежень швидкості, зниження затримок, відновлення надійності систем безпеки).

У підсумку рішення щодо черговості робіт приймаються на основі порівняння «паспортів об'єктів» у межах обраної моделі пріоритетизації (зважена сума балів або інший багатокритеріальний підхід). Така логіка дозволяє узгодити оперативні потреби аварійного відновлення з системною реабілітацією та довгостроковою модернізацією, забезпечуючи прозорість, відтворюваність і керованість портфеля проєктів у постконфліктних умовах.

Міжнародні приклади та їх інтерпретація. Практична цінність кейсів полягає у відмінностях контексту, інституційних моделей та джерел

фінансування, які зумовлюють різні траєкторії відновлення.

Україна. Спільна оцінка RDNA3 визначає, що період оцінювання охоплює 24.02.202 – 31.12.2023, а серед пріоритетів є відновлення транспортної доступності та критичних мереж [1, 2]. Подальша оцінка RDNA4 (до 31.12.2024) фіксує подальше зростання прямої шкоди та загальної потреби відновлення, що підкреслює необхідність довгострокового програмування інвестицій у транспорт [3]. У планових документах з реалізації Ukraine Facility наголошено на значній частці транспортного сектору у потребах відбудови та потребі координації донорів і пріоритезації [15].

Грузія (2008). Пошкодження залізничної інфраструктури під час активної фази конфлікту спричинило переривання важливих вантажних потоків. Відновлення роботи ключової лінії після підриву мосту у серпні 2008 року демонструє типовий алгоритм «rapid repair»: швидке відновлення функціональності з подальшим переходом до капітальної реконструкції [13]. Кейс також підкреслює, що для транзитних країн критичним є резервування маршрутів та тимчасові рішення для збереження експортної логістики.

Азербайджан (після конфлікту). Прикладом відбудови «з нуля» на постконфліктних територіях є проєкт Horadiz–Aghband: будівництво розпочато у 2021 році, а довжина лінії становить 110,4 км (140,6 км з урахуванням колій роз'їздів і допоміжних шляхів) [7, 20]. Проєктна документація передбачає значну кількість штучних споруд, що ілюструє ресурсомісткість відбудови в умовах необхідності повної інженерної інфраструктури [9]. Важливий урок полягає у тому, що відновлення може бути інтегроване з розвитком нових коридорів, але потребує надійних механізмів управління проєктом і контролю якості.

Ірак. Світовий банк схвалив фінансування для проєкту розширення і модернізації залізниць, який має посилити вантажну спроможність коридору між портом Umm Qasr і Мосулом [10]. Технічні матеріали проєкту вказують на проблеми стану інфраструктури на півночі та потребу комплексної реабілітації окремих відрізків (зокрема, ділянки поблизу Мосула) [11]. Для постконфліктних умов це показовий приклад переходу від відновлення функціональності до інвестицій у національну зв'язність і економічну диверсифікацію.

Шрі-Ланка. Після завершення внутрішнього конфлікту відновлення Північної залізничної лінії розглядалось як чинник реінтеграції

територій. У 2009 році уряд оголосив про початок реконструкції лінії на північ (Vavuniya–Kankesanthurai через Jaffna) [14], а в подальшому відновлення експлуатації на окремих ділянках і робота станцій на півночі відображені у звітних матеріалах державних інституцій [17]. Кейс підкреслює, що відновлення залізниці у постконфліктному середовищі виконує не лише транспортну, а й соціальну функцію – відновлення доступності та економічних зв'язків.

Країни ЄС/ Балкани. Відновлення інфраструктури може поєднуватися з підвищенням технічних параметрів до стандартів безпеки та швидкості. Показовим є проєкт на кордоні Хорватії та Сербії, де відновлення 33,5 км лінії супроводжувалося підвищенням допустимої швидкості з 50 до 160 км/год і встановленням сучасних систем безпеки [6]. Це ілюструє практику реабілітації коридорів із «закладанням» модернізації у проєкт відновлення, що є релевантним для формування портфелів проєктів у післявоєнній реконструкції.

Узагальнена рамка прийняття рішень. На основі наведених прикладів пропонується рамка, що складається з чотирьох послідовних блоків: оцінка пошкоджень і безпекових умов; визначення критичних коридорів і вузлів; формування портфеля проєктів із прив'язкою до фаз; управління реалізацією через KPI та прозорі процедури закупівель. Ключовим інструментом є «паспорт об'єкта», який містить технічний стан, ризик повторних уражень, альтернативність маршрутів, план тимчасового рішення та план капітального відновлення. Рамка узгоджується з міжнародними підходами до відновлення транспортної інфраструктури в умовах тривалих ризиків та обмежених ресурсів [19].

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у систематизації підходів до відновлення залізничних об'єктів після збройних конфліктів у вигляді фазової типології та розробленні матриці пріоритетів, яка інтегрує інженерні, економічні та безпекові критерії. Практична значимість визначається можливістю застосування запропонованої рамки для формування портфеля проєктів відновлення, підготовки технічних завдань, обґрунтування донорського фінансування та моніторингу результативності через KPI (час відновлення сполучення, відновлена пропускна спроможність, зняті обмеження швидкості, надійність СЦБ).

Висновки

1. Міжнародний досвід підтверджує доцільність фазового підходу до відновлення залізничної інфраструктури після конфліктів: від аварійного відновлення функціональності до реабілітації коридорів і відбудови з модернізацією. Кожна фаза потребує власних інструментів планування, закупівель та контролю якості.

2. Найвищий пріоритет у постконфліктних умовах мають мости, вузлові станції та системи СЦБ/зв'язку як «точки відмови» коридорів. Ефективність швидкого відновлення підвищується за наявності стандартизованих тимчасових рішень і матеріальних резервів.

3. Перехід від «ремонту» до «відбудови краще, ніж було» є економічно обґрунтованим за умови, що модернізація інтегрується у проекти реабілітації коридорів і супроводжується КРІ та прозорим управлінням портфелем. Приклади Хорватії та Азербайджану демонструють, що відновлення може одночасно підвищувати швидкості й безпеку та формувати нові логістичні можливості [6, 7].

4. Запропонована матриця пріоритетів і рамка прийняття рішень є придатними для застосування в Україні та інших країнах, що відновлюють залізничну інфраструктуру після конфліктів, з урахуванням специфіки ризиків, структури вантажних потоків і доступності фінансування.

5. У постконфліктному відновленні залізничних коридорів ключовим принципом пріоритетзації має бути максимізація відновленої пропускної спроможності (поїздів/добу, тон/добу) на одиницю часу та/або бюджету за умов збереження прийняттого рівня безпеки руху і врахування ризику повторних уражень. Практично це означає, що в першу чергу мають виконуватися роботи на об'єктах, які є «точками відмови» коридору (мости, вузли, СЦБ/зв'язок, тягові підстанції), забезпечують найбільший приріст КРІ коридору (відновлення/зростання поїздів/добу, зняття обмежень швидкості на критичних перегонах, скорочення затримок у вузлах), і можуть бути реалізовані у найкоротші строки в межах наявних ресурсів. В ілюстративному прикладі ранжування (табл. 2) пріоритетність відновлення СЦБ ділянки та мостового переходу випереджає менш критичні роботи на земполотні, оскільки саме ці елементи визначають технологічну керованість руху й «вузькі місця» коридору, а отже – безпосередньо впливають на КРІ пропускної спроможності. Такий КРІ-орієнтований підхід підвищує відтворюваність

рішень і дозволяє прозоро обґрунтовувати черговість проєктів для держави та донорів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ukraine Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2024 / Government of Ukraine, World Bank Group, European Commission, United Nations. 2024. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UA%20RDNA3%20report%20EN.pdf>
2. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment released / The World Bank. 15.02.2024. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
3. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment released (RDNA4) / The World Bank. 25.02.2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
4. Ukraine Plan 2024–2027 (Ukraine Facility). 2024. URL: <https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/ukraine-facility-plan.pdf>
5. UNOPS and World Bank support restoration of Ukraine's transport network / ReliefWeb. 23.03.2024. URL: <https://reliefweb.int/report/ukraine/unops-and-world-bank-support-restoration-ukraines-transport-network>
6. Rail improvement project at the Croatian-Serbian border rebuilds war-damaged infrastructure / European Commission. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/croatia/rail-improvement-project-at-the-croatian-serbian-border-rebuilds-war-damaged-infrastructure
7. Horadiz-Aghband railway 68% ready in Azerbaijan / Report.az. 06.11.2025. URL: <https://report.az/en/infrastructure/horadiz-aghband-railway-68-ready-in-azerbaijan/>
8. Azerbaijan's Horadiz-Aghband railway advances as design work completes / Tunnels & Tunnelling International. 24.01.2025. URL: <https://www.tunnelsandtunnelling.com/news/azerbaijans-horadiz-aghband-railway-advances-as-design-work-completes/>
9. Designing of the Horadiz–Agband railway project (technical parameters) / InnoPro. URL: <https://innopro.az/en/projects/view/49>
10. World Bank approves over \$1 billion for projects in Lebanon, Syria and Iraq (Iraq railway financing) / AP News. 25.06.2025. URL: <https://apnews.com/article/7ca26740ae09cb997fc405e948bf42bc>
11. Iraq Railways Extension and Modernization (IREM) Project: Technical Note / The World Bank. 01.12.2025. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099113025221558008/pdf/P507282-c321fb93-70d9-4732-9b46-03d12ca95b70.pdf>

12. Key Georgian Rail Line Reopens After Explosion / Radio Free Europe/Radio Liberty. 25.08.2008. URL: https://www.rferl.org/a/Key_Georgian_Rail_Line_Reopens_After_Explosion/1193565.html

13. Sri Lanka: Work on Northern railway line begins / ReliefWeb. 14.03.2009. URL: <https://reliefweb.int/report/sri-lanka/sri-lanka-work-northern-railway-line-begins>

14. Signing of an agreement for restoration of Pallai-Kankesanthurai railway line / High Commission of India, Colombo. 11.07.2015. URL: <https://www.hcicolombo.gov.in/section/press-releases/signing-of-an-agreement-for-restoration-of-pallai-kankesanthurai-railway-line-in-northern-province-of-sri-lanka/>

15. Performance Report – Department of Sri Lanka Railway. 2015. URL: <https://www.parliament.lk/uploads/documents/paperspresented/performance-report-department-of-srilanka-railway-2015.pdf>

16. Fourth Rapid Damage and Needs Assessment in Ukraine: total cost of reconstruction and recovery estimated at €506 billion / EU Neighbours East. 25.02.2025. URL: <https://euneighbourseast.eu/news/latest-news/forth-rapid-damage-and-needs-assessment-in-ukraine-total-cost-of-reconstruction-and-recovery-estimated-at-e506-billion/>

17. Bosnia and Herzegovina Regional Railway Project / European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). URL: <https://www.ebrd.com/home/work-with-us/projects/psd/35418.html>

18. Poliukh A. Transport Infrastructure Amid Protracted War: Challenges and Recovery Pathways. Kyiv School of Economics. 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf

19. Azerbaijan's Horadiz-Aghband railway construction nears completion / Trend.az. 06.01.2026. URL: <https://www.trend.az/business/4138631.html>

20. Mitoulis S.-A., Argyroudis S., Panteli M. et al. Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding. Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 91. 104405. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104405.

21. Kopiika N., Di Bari R., Argyroudis S., Ninic J., Mitoulis S.-A. Sustainability and resilience-driven prioritisation for restoring critical infrastructure after

major disasters and conflict. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2025. Vol. 139. 104592. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104592.

22. Bešinović N., Goverde R.M.P., Quaglietta E. et al. Resilience assessment of railway networks: Combining infrastructure restoration and transport management. Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 220. 108245.

23. Ilalokhoin O., Thaduri A., Kumar U. A model and methodology for resilience assessment of interdependent rail networks – Case study of Great Britain's rail network. Reliability Engineering & System Safety. 2023. Vol. 231. 108978.

24. Yang Y., Zhou X., Zhang Y. et al. A systematic review of resilience assessment and enhancement of urban integrated transportation networks. Journal of Transport Geography. 2025. (Article in press).

25. Hu J., Yang M., Zhen Y. A Review of Resilience Assessment and Recovery Strategies of Urban Rail Transit Networks. Sustainability. 2024. 16(15): 6390. DOI: 10.3390/su16156390.

26. Wei Y., Wang S., Zhou X. et al. Understanding the Resilience of Urban Rail Transit: Concepts, Reviews, and Trends. Engineering. 2024. DOI: 10.1016/j.eng.2024.01.022.

27. Azerbaijan Railways (ADY). Horadiz-Aghband railway line (офіційна сторінка проєкту). URL: <https://corp.ady.az/en/ady-2/projects/horadiz-aghband>

28. European Commission. Rail improvement project at the Croatian-Serbian border rebuilds war-damaged infrastructure. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/croatia/rail-improvement-project-at-the-croatian-serbian-border-rebuilds-war-damaged-infrastructure

29. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, United Nations. Ukraine Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3). 2024. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UA%20RDNA3%20report%20EN.pdf>

30. Department of Sri Lanka Railway. Performance Report 2014. URL: <https://www.parliament.lk/uploads/documents/paperspresented/performance-report-department-of-srilanka-railway-2014.pdf>

Надійшла в редколегію 26.10.2025

Прийнята до друку 14.01.2026

N. CHERNOVA, R. NOVIK

INTERNATIONAL APPROACHES TO THE RECONSTRUCTION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES AFTER ARMED CONFLICTS

Purpose. The article summarizes international approaches to the restoration of railway infrastructure facilities after armed conflicts, focusing on managerial and engineering-organizational solutions that allow combining rapid restoration of traffic with long-term improvement of network stability. **Methodology.** The study was conducted based on a comparative analysis of documents from international organizations (World Bank, European Commission, UN),

materials from financial institutions, and open cases of railway restoration in countries that have experienced armed conflicts (Ukraine, Georgia, Azerbaijan, Iraq, Sri Lanka, and the Western Balkan countries). Content analysis of the approaches of “rapid repair,” “rehabilitation,” and “reconstruction with modernization” was applied, as well as the method of structural synthesis to form a framework for prioritizing objects. A typology of railway infrastructure restoration in post-conflict conditions is proposed, covering three interrelated phases: emergency restoration of traffic capacity and safety; rehabilitation of key corridors with restoration of technical parameters; rebuilding “better than before” with the integration of modern signaling, protection, and digital asset management tools. It is argued that the effectiveness of restoration is determined not only by the volume of investment, but also by prioritization rules, the ability to make rapid purchases, and institutional coordination between the operator, the state, and donors. Based on international examples, it has been shown that in the short term, temporary bridges/bypasses and the rapid restoration of critical nodes are crucial; in the medium term, the restoration of speeds and safety systems is crucial; and in the long term, the modernization of corridors for new logistics and climate resilience is crucial. A matrix of priorities has been developed for the selection of objects (bridges, sections, nodes, signaling and communication systems) based on the criteria of route criticality, security risk, impact on export and import flows, restoration time, and life cycle cost. **Scientific novelty.** An integrated decision-making framework for post-conflict railway restoration has been developed, combining a phased approach, prioritization tools, and sustainability requirements. **Practical significance.** The results can be used by transport authorities, infrastructure operators, and international partners to form a portfolio of restoration projects, define KPIs (restoration time, restored throughput capacity, speed increases, accident reduction), and prepare technical tasks within post-war reconstruction programs.

Keywords: recovery, railway infrastructure, post-conflict reconstruction, resilience, critical infrastructure, prioritization, corridors, asset management, traffic safety, donor coordination.

УДК 621.311:629.4.014.27

С. В. ПЛАКСІН^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{3*}, Ю. В. ШКІЛЬ^{4*}, О. В. КІТАЄВ^{5*}

^{1*} Від. систем кер. транс. засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{2*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта a.m.mukha@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 37-31-537, ел. пошта d.v.ustymenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*} Від. систем кер. транс. засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта siv@westa-inter.com, ORCID 0000 – 0002 – 8684 – 5906

^{5*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ 2-Х РЕЖИМНОГО ТЯГОВО-ЛЕВІТАЦІЙНОГО МОДУЛЯ ШЛЯХОВОЇ СТРУКТУРИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО МАГЛЕВ-ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою роботи є вибір та обґрунтування структури системи живлення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля (ТЛМ) шляхової структури покращеної високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи з урахуванням особливостей генерації, накопичення, зберігання та розподілу енергії з застосуванням в ній фотовольтаїчних перетворювачів. **Методика.** В процесі роботи над матеріалом використовувались методи аналізу і синтезу для вивчення наукових робіт щодо енергозабезпечення транспортних систем на магнітній левітації, електротехніку та електроніку для модифікації структури та параметрів системи електропостачання 2-х режимного тягово-левітаційного модуля. Особливу увагу приділено питанню застосування технології водневих паливних елементів. **Результати.** Короткий 2-х режимний тягово-левітаційний модуль є основним і універсальним модулем для побудови шляхової структури покращеної високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи. Система живлення такого модуля повинна відповідати найвищим вимогам як до енергетичної ефективності так і до надійності та безвідмовності його роботи. В роботі запропоновано автономне джерело живлення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля де в якості первинної енергії використовується енергія сонця. Для вирішення проблеми коливачів сонячної інсоляції на протязі доби, року до структури вводиться гібридний накопичувач енергії, що має дві незалежні системи – основну на літій-іонних акумуляторах в поєднанні з суперконденсатором і резервну з використанням технології водневих паливних елементів. Такий підхід здатен забезпечити: безперебійне живлення ТЛМ не залежно від погодних умов; подачу короткого високоенергетичного імпульсу в котушки ТЛМ в момент, що визначається положенням магнітоплану відносно траси; реконфігурацію котушок ТЛМ у відповідності до режиму роботи (тяга чи левітація); енергоефективність за рахунок живлення тільки тієї ділянки траси над якою в даний момент знаходиться магнітоплан; високу надійність функціонування та відмовостійкість енергосистеми через наявність резервної системи на базі регенеративного паливного елемента. **Наукова новизна.** В роботі обґрунтовано концепцію побудови системи енергозабезпечення траси високошвидкісного маглев-транспорт. Основою покращення енергетичних показників транспортної системи є інтеграція автономного гібридного джерела живлення на фотовольтаїчних перетворювачах в 2-х режимний тягово-левітаційний модуль. **Практична значимість.** Практичним аспектом роботи є розширення області застосування технології водневих паливних елементів системою зберігання енергії автономного джерела живлення траси високошвидкісного маглев-транспорт.

Ключові слова: тягово-левітаційний модуль, фотовольтаїчний перетворювач, енергопостачання, магнітоплан, паливний елемент, електролізер, накопичувач

Вступ

Енергоспоживання високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту є одним з ключових аспектів його економічної ефективності. В роботі [1] показано, що на швидкостях понад

300 км/год Maglev-транспорт стає більш ефективним за традиційні швидкісні поїзди. При цьому встановлено, що на високих швидкостях більша частина енергії (до 80% від спожитої магнітопланом) витрачається на подолання аеродинамічного опору середовища, а не на саму левітацію.

Співробітниками Інституту транспортних систем і технологій НАН України (м. Дніпро) проведено дослідження загальної інсоляції на території України і встановлено, що функціонування Maglev-транспортів, що використовують принцип електродинамічного підвісу, цілком можуть забезпечити фотовольтаїчні енергетичні установки [2].

Розбудова шляхової структури наземного магнітолевітаційного транспорту з живленням від розподіленої системи фотовольтаїчних перетворювачів дозволить уникнути додаткових затрат на доставку електричної енергії до споживача, мати співрозмірні питомі характеристики генерації електричної енергії з питомими характеристиками навантаження, переглянути структуру траси та реалізувати більш ефективні стратегії управління рухом і підвісом транспортного засобу [3].

Постановка задач досліджень

Високошвидкісні транспортні системи на магнітному підвісі, наприклад Transrapid чи JR-Maglev, мають в своїй конструкції дві окремі системи – підвіску, яка забезпечує магнітну левітацію потяга над трасою та привод у вигляді лінійного синхронного двигуна з довгим статором (LSM).

Transrapid (Німеччина) використовує електромагнітну підвіску (EMS). EMS характеризується доступністю левітації у всьому діапазоні швидкостей проте потребує постійного і високоточного контролю за величиною повітряного зазору (близько 10 мм). Система EMS вважається найбільш економічною в енергетичному плані для процесу підвішування. На підтримання магнітоплану в повітрі витрачається лише близько 1...2 кВт потужності на кожну тону його ваги.

В JR-Maglev (Японія) реалізовано електродинамічну підвіску (EDS). EDS на відміну від EMS використовує силу Ленца і взаємодіє з пасивною наземною частиною у вигляді короткозамкнених котушок. Системи EDS характеризуються високою магнітною стабільністю, не потребують контролю за повітряним зазором (в середньому 100 мм) проте мають суттєвий недолік – недостатня величина підйомної сили на низьких швидкостях (приблизно до 150 км/год).

Синхронний двигун з довгим статором в енергетичному плані на сьогодні виглядає не найкращим рішенням. Як ірраціональна обмотка трифазного LSM має значну протяжність (до 40 км) і при русі транспортного засобу вона уся отримує живлення, що негативно впливає на величину споживаної потужності. Зрозуміло, що саме по собі

зменшення довжини секцій LSM не вирішує задачі енергетичних втрат [4]. Для вирішення проблеми запасів реактивної потужності та підвищення енергоефективності LSM потрібно жити окремі короткі тягові модулі від автономного джерела енергії, що знаходиться поряд.

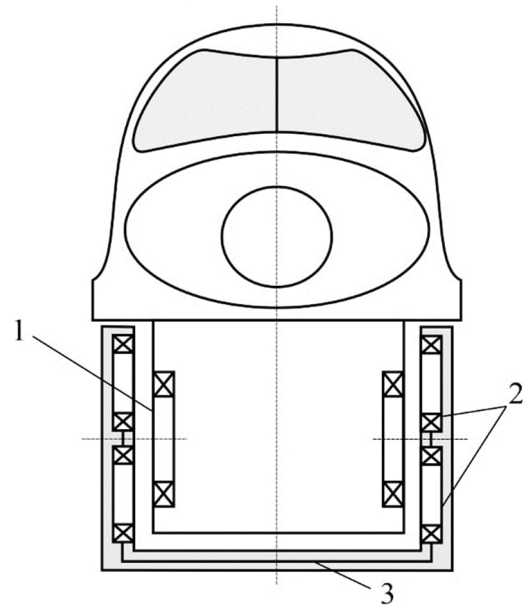


Рис. 1. Магнітолевітаційна транспортна система з 2-х режимним тягово-левітаційним модулем (ТЛМ): 1° – котушки бортового надпровідникового магніту (SC); 2° – подвійні котушки шляхового тягово-левітаційного модуля (NF); 3° – нуль-потоківий контур

Авторами в роботах [4, 5] запропоновано 2-х режимний тягово-левітаційний модуль (ТЛМ), що здатен працювати в режимах тяги і левітації. Силова частина транспортної системи на базі 2-х режимного тягово-левітаційного модуля має наступні основні елементи:

- бортовий надпровідниковий магніт (позиція 1, рис. 1), який створює потужне магнітне поле;
- подвійні котушки (позиція 2, рис. 1), що монтуються на обох стінках шляхопроводу (одна пара навпроти іншої). Кожна пара може перемикатись для утворення відповідної конфігурації магнітного поля з метою формування заданого режиму роботи (тяга, електромагнітна левітація (в зоні малих швидкостей), електромагнітна левітація (на швидкостях понад 150 км/год));
- нуль-потоківий контур (позиція 3, рис. 1), який представляє собою електричну лінію з власним електронним регулятором, що поєднує пари котушок на протилежних стінках в єдиний модуль.

При формуванні траси з таких коротких 2-х режимних тягово-левітаційних модулів з'являється декілька можливостей, що здатні суттєво

покращити характеристики транспортної системи:

- запровадити більш ефективні способи управління магнітопланом;
- реалізувати живлення тільки тієї частини траси де в даний момент знаходиться транспортний засіб;
- відмовитись від централізованого живлення на користь розподіленої системи фотовольтаїчних перетворювачів.

Основна частина

Інтеграція в магнітолевітаційну магістраль розподіленої сонячної електростанції вирішує проблему втрат енергії при транспортуванні її від централізованого джерела до якірних обмоток лінійного двигуна у випадку класичних систем живлення, а використання в якості основного джерела енергії енергію сонця робить транспортну систему енергоефективною та екологічною. Підхід до розбудови наземного високошвидкісного транспорту на основі екологічно раціональних енергетичних систем узгоджується з рекомендаціями Рамковими науковими програмами Євросоюзу [6].

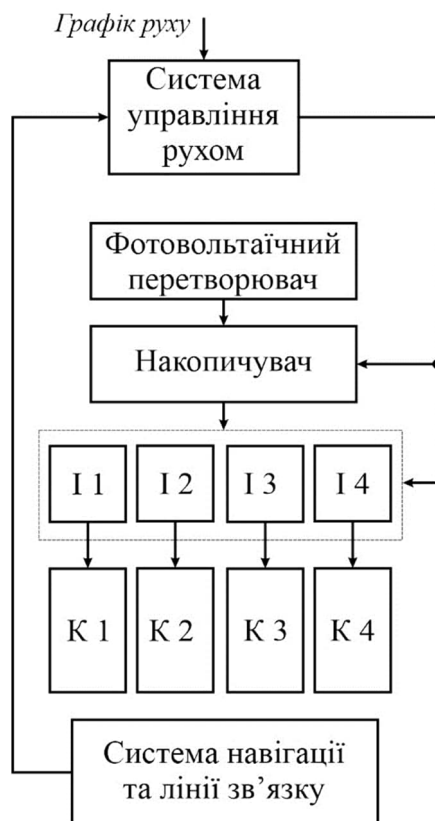


Рис. 2. Енергозабезпечення 2-х режимного ТЛМ на базі фотовольтаїчного перетворювача: І1...І4 – інвертори; К1...К4 – котушки ТЛМ

Вибір саме сонячної енергії пояснюється її доступністю та можливістю виробництва на місці споживання. Тим не менш локальні особливості положення точки прийняття сонячної енергії та реальні погодні умови це ті фактори, які можуть суттєво знижувати показники надходження електричної енергії, що повинно враховуватись при проектуванні систем живлення магнітолевітаційного транспорту.

В результаті вищезазначеного підходу структура енергозабезпечення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля може бути представлена наступною структурою (рис. 2).

2-х режимний ТЛМ має в своєму складі чотири котушки (К1...К4), які попарно розміщені на протилежних стінках магістралі, та отримують живлення від індивідуальних інверторів (І1...І4). Інвертор є універсальним вузлом і побудований за мостовою схемою з використанням чотирьох IGBT-транзисторів (рис. 3).

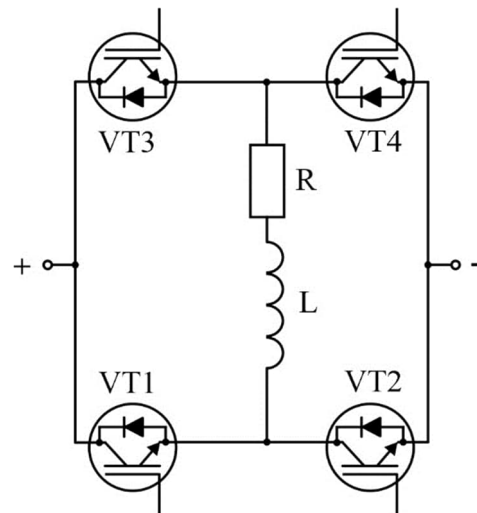


Рис. 3. Схема інвертора: VT1...VT4 – IGBT транзистори; R, L – активний опір і індуктивність котушки 2-х режимного ТЛМ

Чотири інвертори електрично поєднані і за сигналом системи управління рухом дозволяють реконфігурувати ТЛМ для отримання необхідного режиму його роботи. Процес реконфігурації та формування відповідних режимів роботи детально описаний в роботах [5, 7].

Нерівномірність сонячної інсоляції впродовж доби, року (сезонні коливання), а також високі вимоги до безпеки руху вимагають введення до структури енергозабезпечення траси накопичувача енергії. Основні вимоги до накопичувача:

- накопичення такого об'єму енергії, що гарантує роботу 2-х режимного ТЛМ у відповідності з графіком руху;

- наявність резервної системи для забезпечення працездатності ТЛМ у разі відмови основного накопичувача, а також створення запасу енергії для роботи на протязі декількох діб у разі несприятливих погодних умов;
- висока швидкість віддачі електричної енергії на 2-х режимний ТЛМ, що зумовлено високою швидкістю магнітоплану, а значить коротким часом його перебування в зоні конкретного ТЛМ;
- відношення енергії заряду до номінальної ємності накопичувача повинно бути мінімально можливим аби гарантувати прийнятний термін його експлуатації.

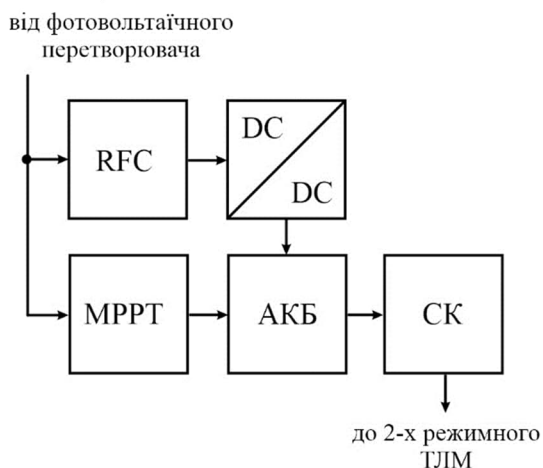


Рис. 4 – Структура гібридного накопичувача: MPPT – контролер заряду; АКБ – акумуляторна батарея; СК – суперконденсатор; RFC – регенеративний паливний елемент; DC-DC – перетворювач

Вказаним вимогам може задовольняти гібридний накопичувач, що має структуру наведену на рис. 4 до складу якої входить дві системи:

- основна система, що складається з MPPT-контролеру заряду, акумуляторної батареї (АКБ) та суперконденсатора (СК);

- резервна система, що має в своєму складі регенеративний паливний елемент (RFC) та електронний перетворювач DC-DC. Резервна система вступає в роботу і заряджає АКБ коли енергії сонця недостатньо.

Оскільки акумуляторні батареї мають електрохімічну природу, то системам накопичення на їх основі притаманні інерційність процесів та більший внутрішній опір. Це б обмежувало можливості джерела живлення формувати високоенергетичний імпульс в котушки 2-х режимного ТЛМ при високих швидкостях руху магнітоплану. Введення в структуру накопичувача суперконденсатора (СК) та поєднання його з АКБ здатне повністю задовольнити вимогам по видачі потужності для функціонування 2-х режимного ТЛМ у всьому діапазоні швидкостей транспортної системи. Крім того в такій схемі суттєво підвищується енергоефективність функціонування гібридного накопичувача та подовжується термін експлуатації його АКБ. Ефективність літій-іонних акумуляторних батарей не перевищує 70% при розряджанні номінальним струмом, в свою чергу, суперконденсатори за пікових навантажень забезпечують ККД на рівні 95% [8].

Основою резервної системи є регенеративний паливний елемент (RFC) схема якого наведена на рис. 5. RFC представляє собою інтегровану систему з електролізера і паливного елемента, яка фактично є системою зберігання енергії на основі водню. Електролізер використовує надлишкову енергію, що надходить від фотовольтаїчного перетворювача, для розщеплення води (H_2O) на водень (H_2) та кисень (O_2) через процес електролізу (зарядка). Отримані водень та кисень зберігаються в спеціальних газонакопичувальних резервуарах. У разі необхідності отримати електричну енергію збережені водень

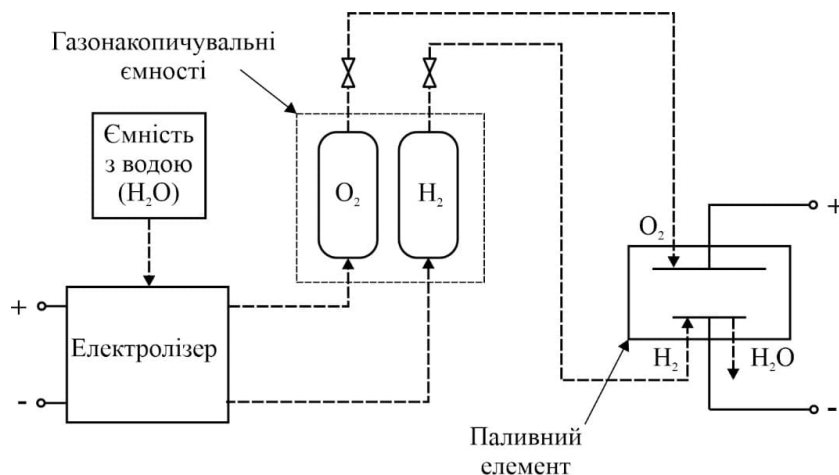


Рис. 5. Схема регенеративного паливного елемента (RFC)

та кисень подаються в паливний елемент. Паливний елемент поєднує водень з киснем, виробляючи електроенергію (розрядка або генерація), тепло та воду як єдиний побічний продукт. Електрична енергія з паливного елемента через DC-DC перетворювач використовується для зарядки АКБ.

Технологія водневих паливних елементів швидко розвивається і на сьогодні перебуває на етапі переходу від демонстраційних прототипів до промислового масштабування. Ідея не є новою, але саме зараз вона отримує колосальні інвестиції через глобальні цілі щодо декарбонізації транспорту та промисловості.

Найбільш перспективним напрямком для впровадження технології водневих паливних елементів вважаються стаціонарні системи резервного живлення та зберігання енергії. Є думка, що ми зараз знаходимося у тій самій точці з воднем, де сонячна енергетика була 15 років тому – на порозі різкого падіння вартості завдяки масовому виробництву.

Висновки

Формування транспортної магістралі з коротких 2-х режимних тягово-левітаційних модулів дозволяє побудувати надійну та енергоефективну систему живлення. Використання фотовольтаїчних перетворювачів, як первинного джерела енергії кардинально змінює логіку і архітектуру системи енергозабезпечення високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, робить його енергетично автономним, децентралізованим, екологічно чистим та ефективним.

В роботі обґрунтовано концепцію побудови системи енергозабезпечення траси високошвидкісного маглев-транспорту. Основою покращення енергетичних показників транспортної системи є інтеграція автономного гібридного джерела живлення на фотовольтаїчних перетворювачах в 2-х режимний тягово-левітаційний модуль.

Запропонована структура енергозабезпечення 2-х режимного ТЛМ з гібридним накопичувачем здатна забезпечити:

- безперебійне живлення ТЛМ не залежно від погодних умов, оскільки гібридний накопичувач має дві незалежні системи накопичення енергії – акумуляторну батарею та систему на основі водню;
- подачу короткого високоенергетичного імпульсу в котушки ТЛМ, основну роль в цьому грає суперконденсатор та швидка електроніка;

- реконфігурацію котушок ТЛМ у відповідності до режиму роботи (тяга чи левітація);
- енергоефективність за рахунок живлення тільки тієї ділянки траси над якою в даний момент знаходиться магнітоплан;
- високу надійність функціонування та відмовостійкість енергосистеми через наявність резервної системи на базі регенеративного паливного елемента.

Практичним аспектом роботи є розширення області застосування технології водневих паливних елементів системою зберігання енергії автономного джерела живлення траси високошвидкісного маглев-транспорту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Energy consumption of track-based high-speed trains: maglev systems in comparison with wheel-rail systems / E. Fritz et al. *Transportation Systems and Technology*. 2018. Vol. 4, no. 3 suppl. 1. P. 134–155. URL: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>.
2. Системи управління і енергозабезпечення магнітолевітаційного транспорту / В. О. Дзензерський та ін. Київ: Наук. думка, 2014. 276 с.
3. Ustymenko D. Prospects of application of photoelectric systems for energy supply of magnetolevitation high-speed transport. *Transport systems and transportation technologies*. 2025. No. 29. P. 66–71. URL: <https://doi.org/10.15802/tst2025/325476>.
4. Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module / A. M. Mukha et al. *Science and Transport Progress*. 2025. No. 2(110). P. 65–75. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332149>.
5. 2-mode traction-levitation module of a promising magnetic-levitation transport system / S. Plaksin et al. *Electromechanical and energy saving systems*. 2022. Vol. 58, no. 2. P. 56–65. URL: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>.
6. FP6 Instruments: Implementing the priority thematic areas of the Sixth Framework Programme of European Community Research. 2002. p. 16.
7. Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module / A. M. Mukha et al. *Science and Transport Progress*. 2025. No. 2(110). P. 65–75. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332149>.
8. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>

Надійшла в редколегію 03.11.2025

Прийнята до друку 28.01.2026

POWER SUPPLY SYSTEM OF A 2-MODE TRACTION-LEVITATION MODULE OF A HIGH-SPEED MAGLEV TRANSPORT ROAD STRUCTURE

Purpose. The purpose of the work is to select and justify the structure of the power supply system of a 2-mode traction-levitation module (TLM) of a road structure of an improved high-speed magnetolevitation transport system, taking into account the features of energy generation, accumulation, storage and distribution with the use of photovoltaic converters in it. **Methodology.** In the process of working on the material, methods of analysis and synthesis were used to study scientific works on the energy supply of magnetic levitation transport systems, electrical engineering and electronics to modify the structure and parameters of the power supply system of a 2-mode traction-levitation module. Particular attention is paid to the issue of using hydrogen fuel cell technology. **Results.** A short 2-mode traction-levitation module is the main and universal module for building the track structure of an improved high-speed maglev transport system. The power supply system of such a module must meet the highest requirements for both energy efficiency and reliability and fault-free operation. The work proposes an autonomous power source for a 2-mode traction-levitation module where solar energy is used as the primary energy. To solve the problem of fluctuations in solar insolation throughout the day and year, a hybrid energy storage system is introduced into the structure, which has two independent systems - the main one on lithium-ion batteries in combination with a Supercapacitor and a backup one using hydrogen fuel cell technology. This approach is able to provide: uninterrupted power supply to the TLM regardless of weather conditions; supply of a short high-energy pulse to the TLM coils at a time determined by the position of the magnetic plane relative to the track; reconfiguration of TLM coils in accordance with the operating mode (traction or levitation); energy efficiency due to powering only the section of the route over which the maglev is currently located; high reliability of operation and fault tolerance of the power system due to the presence of a backup system based on a regenerative fuel cell. **Originality.** The work substantiates the concept of building a power supply system for a high-speed maglev transport route. The basis for improving the energy performance of the transport system is the integration of an autonomous hybrid power source based on photovoltaic converters into a 2-mode traction-levitation module. **Practical value.** The practical aspect of the work is to expand the scope of application of hydrogen fuel cell technology as an energy storage system for an autonomous power source for a high-speed maglev transport route.

Keywords: traction-levitation module, photovoltaic converter, power supply, magneto-plane, fuel cell, electrolyzer, storage device

Наукове видання

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Збірник наукових праць

Випуск 31

(українською та англійською мовами)

*Наукове видання зареєстровано в Національній раді України з питань телебачення і
радіомовлення, рішення №924 від 28.09.2023 р.*

Ідентифікатор медіа: R30-01391 (реєстрація суб'єктів у сфері медіа).

Відповідальний за випуск *М. І. Березовий*

Комп'ютерне верстання *В. В. Малашкін*

Статті в збірнику друкуються в авторській редакції

Формат 60x84¹/₈. Ум. друк. арк. 13,75.

Адреса редакції та видавця:

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 793-19-13, e-mail: m.i.berezovyi@ust.edu.ua

<http://tsstt.ust.edu.ua>