



ISSN 1681-4886 (Print)
ISSN 2413-3833 (Online)

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

№4 2025 р.

4 (163)' 2025

ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

INFORMACIJNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI

Зміст – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту



NERUBATSKYI V. P

Analysis of operating conditions and modes of locomotive
traction motors

..... 3

ЛОМОТЬКО Д. В., АРСЕНЕНКО Д.В., АБОЛОНІН
А.І., КОФАНОВ О.В.

Удосконалення технології доставки термінових
вантажів та багажу залізничним транспортом

.....22

ПРОХОРОВ В.М., ПАРХОМЕНКО Л.А.,
КАЛАШНІКОВА Т.Ю., СЛОБОДЯНЮК О.А.

Формування моделі Transit Network Design для
швидкісного залізничного пасажирського сполучення
в контексті парадігми цифрових двійників
транспортних систем.

.....28

КАНЕВСЬКИЙ М.В., ЗМІЙ С.О., КАНЕВСЬКИЙ Д.С.

Фундаментальні принципи проактивного моніторингу
рейок за допомогою волоконно-оптичних сенсорів

.....36

ЗАЛАТА А.С. Розроблення структурної схеми та бази правил нейро-нечіткої системи керування дизель-генераторною установкою	44
ЄЛІЗАРЕНКО А.О. Розрахунок електромагнітної сумісності в задачах частотно-територіального планування мереж технологічного радіозв'язку	50
МОЙСЕСЕНКО В. І. ГАВРИЛОВ М. О. КОВАЛЬ В. О. Розроблення пристрою для автоматичного регулювання температури електрообігріву контактів автоперемикачів стрілочних електроприводів	56
ГАВРАШЕНКО А.О., БАРКОВСЬКА О.Ю. Інтелектуальна інформаційна система перекладу штучних мов	65
СОТНИК В.О., ХІСМАТУЛІН В.Ш., СІРОКЛИН І.М., ПРИЛИПКО А.А. Створення цифрового двійника залізничної мережі та його інтеграція з автоматизацією реагування на кіберзагрози SOAR на базі штучного інтелекту	74

NERUBATSKYI V. P., Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport

Analysis of operating conditions and modes of locomotive traction motors



Abstract. *Traction motors are a key element of locomotive drive systems, the safety and efficiency of transportation depend on the reliability and stability of their operation. Under intensive operating conditions, motors are exposed to variable mechanical, electrical and thermal loads. Additionally, their operation is affected by environmental factors – temperature, humidity, dust, vibrations. An important component of increasing efficiency is the implementation of modern methods of diagnosing, monitoring and predicting the condition of motors using the Internet of Things and cloud computing. The object of research is the physical processes that occur in locomotive traction motors during their operation in different modes and under different operating conditions. The article analyzes the conditions and operating modes of locomotive traction motors with detailed consideration of the influence of temperature conditions, insulation quality, load modes, operating conditions, electromagnetic interference, and modern cloud monitoring technologies. The features of thermal processes in windings, methods of monitoring the condition of insulation and diagnostics, as well as the implementation of remote monitoring systems are considered. The need for a comprehensive approach to assessing the technical condition of traction motors, based on a combination of traditional control methods with the analytical capabilities of cloud services, is substantiated. The results of the analysis showed that the efficiency and reliability of locomotive traction motors are significantly influenced by external factors. The greatest threats are climatic conditions, electricity quality, vibration levels, electromagnetic interference, and maintenance organization. Their negative impact can be reduced by using modern diagnostic monitoring systems. This, in turn, will help increase motors efficiency, reduce operating costs, and extend the service life of locomotives.*

Keywords: *traction motor, locomotive, heating temperature, cooling, insulation, vibrations, operating modes, electric machine, electromagnetic interference, cloud technologies.*

Relevance of the research topic.

The efficiency of locomotives is largely determined by the condition of their traction motors. Traction motors, as a key element of electric traction, are particularly sensitive to changes in operating conditions, characterized by a wide range of factors that can reduce the efficiency of motors, reduce the service life of their components, and increase the risk of accidents. Therefore, conducting an analysis of the conditions and operating modes of locomotive traction motors with detailed consideration of the influence of temperature conditions,

insulation quality, load modes, operating conditions, electromagnetic interference, and modern cloud monitoring technologies is important for increasing the reliability and efficiency of rail transport.

Introduction.

The traction motor is certainly the main and most important component of a locomotive, and the temperature management of electric motors is attracting increasing attention from both industry and the academic community. This is because the traction motors in modern locomotives need to be more powerful and competitive, so effective temperature management becomes important

to maintain the efficiency, durability and safety of the motors. A thermal management failure can lead to demagnetization of magnets, aging of insulating materials, reduced efficiency, shortened service life, and even burnout of motors.

Locomotive traction motors operate in extremely difficult conditions that are significantly different from the operating conditions of stationary electric machines. Therefore, it is necessary to take into account a number of specific features of their operation. Thus, the ambient temperature during motor operation and idling can vary in the range from -50 to $+50$ °C with relative air humidity up to $(95\pm3)\%$. Under such conditions, the mechanical strength of individual structural elements decreases. At low temperatures, most insulating materials become brittle, with cracks appearing on their surfaces. In the summer, the operation of traction motors is complicated by deteriorating cooling conditions, drying out of insulation, and increased dustiness of the air. Increased humidity, especially during precipitation in the form of rain or snow, contributes to corrosion of metal parts and worsens the condition of insulation.

The traction motor housing is periodically, and in some cases, constantly exposed to accelerations that exceed the acceleration of free fall by 10–20 times. Such dynamic loads acting on traction motor elements can cause various damages: breaks in wires and windings (especially in soldering areas), cracks and insulation destruction, accelerated wear of axles and bearings, as well as disruption of the normal functioning of elastic elements.

The design of the motor and the conditions for its installation on the locomotive [1–3] must provide convenient access to:

- plain bearings with liquid lubricant – to control the sufficiency of the lubricant supply during autonomous lubrication and to check the circulation of lubricant through the bearings during forced lubrication;

- grease-lubricated rolling bearings – for partial replacement or replenishment of grease without the need to disassemble the bearing assembly;

- brush apparatus of DC motor collectors or slip rings of AC motors;

- bolts that fix the main and additional poles of DC motors to the frame;

- air coolers;

- terminal boxes of motor winding ends of all types of current;

- heavy elements – in order to ensure the possibility of using mechanized means for their maintenance and repair.

In some cases, motors are operated on locomotives in enclosed spaces with limited ventilation and no air exchange. Such conditions lead to contamination of the motor with coal dust from the brushes, deterioration of commutation, and increase the risk of arcing from the collector to the housing.

And vice versa: sometimes during movement, traction motors are blown by an oncoming air flow containing dust particles with abrasive properties. These particles damage the insulation of traction motors, impair the operation of bearings, and form conductive paths that can cause short circuits.

The efficiency and reliability of locomotive traction motors depend to a large extent on the electromagnetic environment in which they operate. During the operation of rolling stock, numerous electromagnetic interferences arise, which negatively affect the operation of electrical machines, control systems, and auxiliary equipment [4, 5].

Some of these conditions contradict the basic requirements for locomotive traction motors. For example, to ensure minimal dimensions, the active core of the motor must operate at a high utilization rate, which leads to increased operating temperatures that reach the limit values allowable for heat-resistant insulation. A similar situation is observed with regard to mechanical stresses and structural elements, which, due to increased motor speed, also reach high, and in some cases, maximum permissible levels.

The creation of new, more advanced and reliable motors, as well as their effective operation, is possible only with a deep understanding of the physical processes occurring in similar operating motors [6]. Such processes include wear, relaxation and fatigue of metals, corrosion and erosion of structural elements under the influence of fluid flows, aging of lubricants, thermal destruction of electrical insulation, dusting, as well as prolonged exposure to repetitive overloads, vibrations and other factors [7, 8]. All these phenomena appear only after prolonged motor operation, therefore, reliable information

about wear can only be obtained on the basis of a systematic analysis of the experience of operating equipment in real conditions of moving vehicles.

Analysis of recent research and publications.

References [9] present a comprehensive collection of heat transfer mechanisms for various heat removal methods used in traction electric motors. They provide an overview of different cooling concepts in existing and future traction motors, and compare cooling approaches. Geometric calculation formulas for various cooling heat transfer mechanisms used in motor technology have been collected and general heat transfer phenomena occurring in traction electric motors have been considered. Various specific aspects are analyzed, including rotor shaft cooling, different spray cooling concepts, different air convection phenomena, bearing heat transfer, and stator-housing contact. Thermal analysis and comparison of various cooling methods were carried out. The issue of economic feasibility of applying the proposed approaches to cooling traction motors was left out of consideration.

The paper [10] presents the current state of the art of various thermal management methods for traction motors, including air cooling (natural and forced, air impingement cooling) and liquid cooling (water/oil jacket, jet impingement, spray, immersion, forced convection in slotted channels) for the stator, winding and rotor. However, hybrid thermal management technologies for dealing with extreme conditions have not been fully considered.

The review article [11] mainly focuses on different types of effective thermal design methods that analyze the thermal performance of traction motors. It presents a brief overview of the comparison of different thermal design and analysis methods for different types of traction motors with the aim of showing how improved thermal design can be achieved through optimal electromagnetic and structural design characteristics for different traction motor geometries.

In [12], an analysis of the operating conditions of traction drives of electric locomotives with asynchronous traction motors was conducted. It was found that during operation, defects may occur in the output converter of an asynchronous motor, which leads to asymmetric modes of its operation. Models of the traction drive of an electric locomotive with asynchronous motors with scalar and vector control of the output converter, which take into account asymmetric operating modes, are proposed. As a result of the simulation, the starting characteristics of the

traction drive were obtained for various control methods in both normal and emergency modes of operation of the drive. Comparison of the simulation results showed that in emergency modes of the traction drive, the torque pulsations on the motor shaft in the drive with vector control are 13 % smaller, and with scalar control, the phase current asymmetry coefficient is 22 % smaller. Among the shortcomings of the study, it is worth noting that it does not take into account the impact of digital technologies and Smart Grid systems on the development of electric drives.

In the article [13], the operating modes of the traction asynchronous drive of a diesel locomotive are optimized according to the efficiency criterion and the optimal control modes of the autonomous voltage inverter at different temperatures of the traction motor windings are identified. In addition, the optimal operating modes of the traction drive of a diesel locomotive and a tram were analyzed, which allowed us to establish the differences in the location of the transition point from space-vector to single-phase PWM depending on the motor temperature. The disadvantage of the article is that it does not present a comprehensive approach to the analysis of the system «asynchronous motor – converter – load – control system».

Publications [14, 15] are devoted to determining additional heat losses from higher harmonics in the windings of electric motors. And materials [16, 17] consider the influence of higher harmonics of rotating electric machines on the operating modes of active-adaptive networks and their power equipment. This influence depends on the energy level of higher harmonics and the operating modes of active-adaptive networks. A method is proposed that allows determining the levels of slot harmonic components in the phase windings of electrical machines. The calculation of the energy level of higher harmonics was carried out taking into account the electromagnetic asymmetry of rotating electrical machines and asymmetric operating modes of three-phase electrical networks using the phase coordinate method.

In [18], a thermal model is presented that can be used to estimate the resulting temperatures in PMSM components for different operating points and duty cycles. The model is used to compare two cooling systems for electric motors: frame cooling and direct winding cooling. Both systems can be equipped with additional rotor cooling. It is claimed that direct winding cooling instead of frame cooling provides significant advantages in terms

of resulting continuous torque and power at the assumed manufacturing costs. A limitation of the work is the insufficient attention to the adaptability and self-updating of the proposed thermal model.

The publications [19, 20] consider the application of the finite element method for thermal calculations of electrical equipment of diesel locomotives. A solid-state model of an asynchronous traction motor was built using the SolidWorks program. The developed finite element model of the elements of an asynchronous traction motor allows determining the thermal state of the elements of the rotor and stator of the electric machine of a diesel locomotive. The disadvantage of the study can be considered the limited feasibility of the experimental conditions.

In [21], a practical approach to modeling and analyzing transient thermal effects in air-cooled traction motors is presented. The developed thermal modeling method allows for accurate estimation of the temperature in critical parts of the motor, including the winding and bearing. In addition, the developed model provides an opportunity to study the effect of stator and rotor air duct clogging on the thermal characteristics of the motor, which is a common cause of failures in traction systems during operations in a polluted environment. A limitation of the study is the insufficient consideration of spatial and temporal temperature gradients.

The study [22] is devoted to the improvement of the method of protection of traction motors based on the use of programmable logic controllers. In addition to the voltage and current parameters, the proposed method involves monitoring the magnetic field. It also provides the possibility of adjusting the protection response time. As a result, in the event of overload, short circuit and other non-standard situations, the improved method provides the system with the ability to make more accurate and reliable decisions. However, little attention has been paid in the work to the influence of operating conditions on the performance of traction motors.

In [23], an innovative system combining a machine learning model with Internet of Things (IoT) technology for real-time diagnostics of the technical condition of traction motors is presented. This allows for rapid monitoring of changes in the motor condition. The developed system generates recommendations on the appropriate time for maintenance based on actual motor performance indicators. This approach allows you to move from traditional scheduled maintenance to

predictive maintenance based on real-time diagnostic results. As a result, reliability is increased and motor service life is extended, as well as the number of unplanned downtimes is reduced. However, the issue of interaction of the system presented in the work with motor control systems or SCADA in order to provide remote monitoring and control of its operation through integration with IoT technology is not fully disclosed.

Defining the purpose and objectives of the research.

The purpose of the article is to conduct a comprehensive analysis of the conditions and operating modes of locomotive traction motors, which, under the conditions of implementing an integrated approach to the issue of effective operation of traction motors, which includes monitoring the temperature state and insulation of windings, adaptive control of operating modes, protection against electromagnetic interference, the use of cloud monitoring and diagnostic technologies, etc., will contribute to increasing reliability, extending the life of motors and reducing operating costs. To achieve the goal, the following tasks were set:

- analyze the heating and cooling processes of traction motors, identifying the main causes of motor overheating;
- consider the effect of heating temperature on the aging of motor insulation;
- identify the main causes of traction motors vibration;
- to review the nominal operating modes of traction motors;
- to investigate the effect of electromagnetic interference on the operation of locomotive traction motors;
- to learn about the use of cloud technologies in traction drives control systems.

The main part of the research.

Analysis of heating and cooling processes of traction motors. The operation of locomotive traction motors is accompanied by the conversion of electrical energy into mechanical energy, which is always associated with the appearance of energy losses in the form of heat. Heating and cooling processes determine the thermal state of the machine, which directly affects the

reliability, durability and efficiency of the traction motor. Therefore, their analysis is a necessary component in the design, operation and diagnostics of traction rolling stock.

The load capacity of electric motors mainly depends on their heating conditions, since it is the temperature increase that is the main factor limiting the motor power under both long-term and short-term loads. As the load increases, energy losses increase and, accordingly, the amount of heat released. With excessive load, the temperature of individual elements, especially insulation, may exceed permissible values.

At the beginning of operation, the temperature of the electric motor practically coincides with the ambient temperature. At this stage, all the heat released in the motor is spent on heating its parts. Gradually, the intensity of heat transfers to the environment increases. After some time, the motor heats up to such an extent that the amount of heat released by it per unit of time is completely balanced by the amount of heat transferred to the environment. At this point, the temperature increase stops, and thermal equilibrium is established, in which all the heat generated in the motor is dissipated through its surface.

The motor heat balance equation has the form:

$$C \frac{dT}{dt} = P_{\text{losses}} - k \cdot (T - T_{cm}), \quad (1)$$

where C is the heat capacity of the motor;

T is the current temperature;

T_{cm} is the temperature of the cooling medium;

P_{losses} is the total power losses;

k is the heat transfer coefficient.

Equation (1) describes the change in temperature over time under the influence of internal heat sources and external cooling.

An electric machine consists of many elements (windings, parts of the magnetic circuit, structural parts) that differ in thermal conductivity, heat capacity, and cooling conditions [24]. As a result, the temperatures of individual parts of the machine also differ. Despite the

complexity of the distribution of heat flows inside the motor and the limited accuracy of thermal calculations based on this approximation, it is possible to identify general patterns of temperature changes in the processes of heating and cooling the motor. The temperature of the traction motor during heating and cooling changes according to an exponential law. During heating, the temperature rise of the motor above the ambient temperature gradually increases and asymptotically approaches a value corresponding to a certain current level. This behavior is observed with increasing power losses (load) of the motor or a decrease in its cooling efficiency [25].

By increasing the cooling intensity or reducing the load current, the temperature rise decreases to a new steady-state level corresponding to the changed current values. After disconnecting the motor from the mains, the load current becomes zero and the motor gradually cools down to ambient temperature.

During sufficiently long operation, the temperature rise reaches an almost constant level. In this state, the motor is in a practically stable thermal mode, which is called continuous.

The main reasons for overheating of electric motors can be as follows:

- motor contamination and dust deposition on the windings and active steel of the machine, which leads to deterioration of heat transfer;

- the fan with inclined blades rotates in the wrong direction, which causes it to supply insufficient air to the motor and the cooling system to operate inefficiently;

- increased ambient temperature (over +35 °C), at which the motor heating temperature exceeds permissible values;

- reduction of the armature or rotor speed below nominal, which causes reduced air circulation and poor motor cooling;

- interturn short circuits in the motor windings, as a result of which an electromotive force is induced in the short-circuited circuit, and due to the low resistance of this circuit, significant short-circuit currents flow through it, which cause the motor to overheat;

– reducing the armature rotation frequency, due to which, to ensure the nominal voltage, a current of a greater magnitude than the nominal is supplied to the excitation winding in order to create a more powerful magnetic flux, which leads to overheating of the excitation winding.

Motor overheating can also be caused by increased bearing temperature, which is usually caused by insufficient lubrication or an overly tight belt.

In DC motors, collector overheating occurs when there is strong sparking under the brushes, which occurs due to poor commutation, the use of brushes that are too hard, or excessive pressure on the collector.

In synchronous generators, the rotor excitation winding overheats at low power factor. This is because to compensate for the demagnetizing effect of the armature reaction, the current in this winding must exceed the nominal value when the generator is operating at rated load.

For asynchronous motors, in addition to the causes of overheating common to all electric machines, an additional temperature increase can occur for the following reasons:

– increasing the voltage in the network above the nominal value leads to increased losses in the steel;

– operation of the motor on only two phases while maintaining the rated load causes the rated current in these phases to exceed approximately $\sqrt{3}$ times;

– a decrease in voltage at the motor terminals causes its current overload under rated load conditions;

– connecting the stator windings in a “delta” instead of a “star” configuration leads to a significant excess of the rated current in the stator windings.

To maintain an acceptable thermal regime in locomotive traction motors, various cooling systems are used, depending on the type of motor and operating conditions:

– natural (self-cooling) – used in low-power or auxiliary machines. Heat is removed through convection and thermal conductivity from the surface of the housing to the environment;

– forced air cooling is the most common method for DC and AC traction motors. The air flow is supplied

by fans or turbines built into the motor or locomotive design [26]. The system can be open, when air is drawn from the environment, closed, when recirculation flow through heat exchangers is used;

– liquid cooling – used in powerful traction motors of modern electric and diesel locomotives. Water, oil or antifreeze are used as a coolant, which circulates through the cooling jackets of the body and windings;

– combined systems – combine air and liquid cooling for different components (e.g. winding – liquid, collector – air).

To ensure optimal thermal conditions of traction motors, the following technical measures are used:

– use of materials with increased thermal conductivity for housings and winding elements;

– optimization of aerodynamic channels in the motor design to improve cooling air flow;

– use of modern heat-resistant insulating materials of classes *F* and *H* (up to 155–180 °C);

– the use of intelligent temperature control systems that provide automatic adjustment of fan or pump speed depending on the load;

– periodic cleaning of channels and checking the condition of cooling systems during maintenance.

For heating and cooling analysis, thermal equivalent models are used, where individual parts of the motor are represented as elements of an electrical circuit:

– thermal resistances – as an analogue of electrical resistances;

– heat capacities – as capacities;

– heat sources – like current generators.

Solving such models allows you to determine the dynamics of temperature changes under different loads and cooling modes, as well as evaluate transient processes after start-up, stop, or short-term overloads.

Effect of heating temperature on motor insulation aging. The operating temperature is one of the determining factors affecting the durability and reliability of the insulation systems of locomotive traction electric motors. During operation, motors operate in difficult conditions characterized by variable loads, high humidity,

vibrations, and the effects of electromagnetic fields. The combination of these factors causes accelerated aging of insulating materials, especially when the permissible temperature limits are exceeded: mechanical strength decreases, insulation becomes brittle, cracks form [27]. The presence of cracks in insulation reduces its electrical strength. The main causes of insulation aging include the following:

- high temperature;
- large temperature differences between individual motor parts;
- electric field;
- high humidity;
- mechanical loads.

An increase in temperature causes an intensification of physicochemical processes in the structure of insulating materials, such as [28]:

- oxidation of organic compounds, which leads to loss of elasticity, formation of microcracks and reduction of dielectric strength;
- evaporation of plasticizers and moisture, as a result of which the insulation becomes brittle and less resistant to mechanical stress;

– acceleration of polymerization and thermal degradation processes, which change the molecular structure of the material and worsen its operational properties.

Increased temperature leads to oxidation of the components of the insulating varnishes. Therefore, to ensure the specified service life of the traction motor, the heating temperature of individual components must not exceed the permissible values. Thus, the maximum permissible operating temperature of the motor is determined by the thermal resistance of the insulation used. At the same time, increasing the permissible temperature of motor parts allows for increased load, but at the same time accelerates the aging processes of insulation and reduces the service life of the machine [29]. Electrical insulating materials used in electric motors are classified by the level of thermal resistance into seven classes, the temperature limits of which are given in Table 1.

Table 1 – Thermal resistance classes of electrical insulating materials used in electric motors

Insulation class	Y	A	E	B	F	H	C
Permissible overheating temperature, °C	80	105	120	130	155	180	Above 180

The most vulnerable to the effects of elevated temperatures are materials based on cellulose, paper, silk and similar substances, which are used in class *A* and *E* insulation. In class *B* insulation, the binding components and impregnating varnishes are primarily subject to oxidation when heated. Class *F* and *H* insulation, like class *B*, is made using mica, asbestos and fiberglass, but they use binders that are more heat-resistant. Class *C* insulation, made of ceramic and mica, is resistant to high temperatures.

The duration of insulation aging (in years) under the influence of temperature can be roughly calculated using the following expression:

$$t = e^{-\alpha\theta}, \quad (2)$$

where α is a coefficient depending on the insulation class;

θ is temperature, °C.

From expression (2) it is clear that with increasing temperature the aging process of insulation is significantly accelerated. For example, for class *A* insulation at a temperature of 95 °C its service life is about 16 years, at 110 °C it decreases to 4 years, and at 150 °C it is reduced to only a few days. In approximate calculations, the so-called «eight degree rule» is usually used: each increase in insulation temperature by 8 °C above the permissible level reduces the service life of class *A* insulation by half. For class *B* insulation, the temperature dependence of service life is similar, but reduced by approximately 20 °C towards higher temperatures. Therefore, the above patterns and the eight-degree increment can be applied to other types of insulation. Although it is difficult to practically determine

the actual overheating of the insulation, it is always necessary to consider its effect on the durability of the electrical machine.

Table 2 shows the maximum permissible temperature excesses of some parts of electric machines of rolling stock, the service life of which is 8–15 years.

Table 2 – Overheating of electric machine elements

Parts of an electric machine	Maximum permissible temperature, °C				
	Insulation classes				
	A	E	B	F	H
Armature windings connected to the collector and AC windings	60	75	80	100	125
Multilayer excitation windings of DC and AC machines	60	75	80	100	125
Single-row excitation windings with bare surfaces	65	80	90	110	135
Cores and other steel elements in contact with insulated windings	60	75	80	110	125
Collectors and slip rings	60	70	80	90	100

In locomotive traction motors operating in severe conditions with frequent starts, braking, and short-term overloads, the winding temperature often exceeds the nominal values. This leads to accelerated aging of impregnating varnishes, resins, and insulating tapes, and subsequently to interturn short circuits or insulation breakdowns on the housing.

The maximum permissible winding temperature is determined by adding the maximum permissible temperature rise to the nominal ambient temperature, which is assumed to be 40 °C. If the actual ambient temperature is higher than this limit, the permissible winding temperature rise must be reduced so that the actual winding temperature does not exceed the set limit.

If the ambient temperature is lower than the standard, then during operation it is allowed to proportionally increase the maximum permissible excess of the winding temperature, but not more than by 10 °C compared to the value established by standards or technical specifications. When operating the machine in areas where low barometric pressure reduces heat transfer efficiency, it is necessary, on the contrary, to slightly reduce the permissible temperature excesses.

In some cases, for special-purpose electric machines, their service life is reduced by allowing higher insulation heating values than those specified in Table 2. This allows for increased power with the same dimensions or to produce a machine of the required power with a smaller mass and dimensions.

The average excess of the winding temperature over the temperature of the cooling medium is usually determined based on the change in the resistance of the winding or conductor:

$$r_2 = r_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)], \quad (3)$$

where r_1 and r_2 is the active resistance of the winding in the cold and heated state, respectively, Ohm;

α is the temperature coefficient (for copper $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$);

θ is the winding temperature, °C;

θ_0 – is the ambient temperature, °C.

To minimize the negative impact of temperature on insulation in traction motor designs, the following technical solutions are used:

– use of heat-resistant materials of heat resistance classes F , H or higher;

– implementation of efficient cooling systems (forced ventilation, liquid or combined cooling);

– monitoring the temperature state of windings using temperature sensors and automatic control systems;

– preventive cleaning of ventilation ducts to ensure proper heat exchange.

The main causes of traction motors vibrations.

During operation of traction motors, their parts vibrate, which is called vibration. Vibration leads to disruption of connections in the motor, increased wear and overheating of bearings [30–32]. Vibration is considered permissible if the doubled amplitude of vibrations does not exceed the limits specified in Table 3.

Table 3 – Permissible vibration limits

Motor revolutions per minute	Permissible vibration, mm
750	0.12
1000	0.10
1500	0.08
3000	0.05

The occurrence of vibration of traction motors is caused by various factors of both mechanical and electrical nature [33–35].

The main mechanical causes of traction motor vibration include the following:

– rotor imbalance – occurs due to uneven mass distribution or wear of parts, which leads to the appearance of centrifugal forces during rotation;

– shaft or rotor deformation – even a slight shaft distortion can cause beating and vibrations;

– rotor and stator misalignment – misalignment during installation or operation leads to an uneven gap in the air gap;

– wear or damage to bearings – increased backlash, misalignment or destruction of separators cause vibrations and noise;

– unreliable fastening of the motor to the locomotive frame – loose bolts, deformation of supporting elements or metal fatigue cause additional vibrations.

Electromagnetic causes of traction motor vibration are:

– unevenness of the magnetic field in the gap – may be a consequence of winding asymmetry or stator displacement;

– electromagnetic forces that vary with the network frequency – in DC or AC traction motors they can cause periodic torque pulsations;

– poor commutation (for DC motors) – sparking on the collector creates pulsed electromagnetic disturbances;

– power asymmetry or winding defects – unequal current in the phases causes electromagnetic imbalance.

In addition, there are also structural, operational and external factors, which should be included:

– mismatch of the geometry of the connection with the gearbox or chassis – misalignment of couplings or gears can transmit vibrations to the motor housing;

– wear of the gear teeth – causes periodic shocks and vibrations during operation;

– operation under excessive load or abnormal conditions – overloading of the rotor or stator windings increases dynamic forces;

– Insufficient or uneven lubrication – increases friction in bearings, causing vibrations;

– the impact of vibrations from wheelsets and track – especially when driving on uneven or worn track.

Thus, the main cause of vibrations of electrical origin is interturn short circuits in the windings. As a result, magnetic asymmetry occurs in the motor, due to which the attraction between the stator and rotor becomes uneven, which causes oscillations of the machine elements. Magnetic asymmetry can also occur due to eccentricity of the rotor relative to the stator, which is a consequence of bearing wear or uneven air gap between the rotor and stator. In DC motors, magnetic asymmetry rarely causes vibration, while in AC motors, even a slight asymmetry of the magnetic field can cause severe oscillations.

To determine what exactly is causing the vibration – magnetic asymmetry or a mechanical fault – the excitation is removed while the generator is running, the electric motor is disconnected from the mains and its vibration is observed while it continues to rotate by inertia. If the vibration stops after the voltage is turned

off, then the cause is magnetic asymmetry. If the vibration does not disappear, then the source of the malfunction is mechanical defects.

Traction motors operating modes. Depending on the characteristics of load changes, locomotive traction motors can operate in different nominal modes: long-term, short-term, repeated short-term, and others, which mainly take into account frequent starts, braking, reverses, and intermittent operation [36–38].

Long-term mode. A continuous motor operation mode is considered to be a mode in which the motor operates at a constant load for a sufficiently long time for the motor temperature to reach a set value that exceeds the ambient temperature. This means that for a given cooling surface size and cooling intensity, the electric motor can only operate at a power level at which losses do not exceed the level corresponding to the maximum permissible heating. The amount of permissible overheating is determined by the thermal resistance of the winding insulation used in this type of motor.

The power at which the overheating limit temperature is set (rated power or continuous power) is the main indicator that determines the ability of a traction motor to operate under load in continuous mode. In order for the motor temperature to not exceed the permissible limit at a given load, it is necessary that the dimensions of the cooling surface are large enough. If the cooling area is given, the permissible overheating temperature can be ensured by increasing the cooling intensity.

The characteristic features of long-term motor operation are that:

– the temperature of the windings and magnetic core reaches a constant (nominal) value;

– stability of parameters (resistance, torque, current) is ensured;

– mode promotes reliable and safe operation if permissible temperatures are not exceeded;

– insulation wear is minimal, which increases motor life.

An example of a long-term motor operation is the movement of a locomotive along a flat section of track at a constant speed.

Short-term mode. In short-time operation, the electric motor operates at a constant load, alternating

periods of operation with shutdowns. In this case, the time of operation under load is not long enough for the motor temperature to reach the set value, and the pauses between switching on are long enough for the motor to cool completely to ambient temperature. For general-purpose electric motors, the standards provide for the following values for the duration of the operating period: 10, 30, 60 and 90 minutes.

Prolonged motor operation in overload mode is unacceptable and should be limited in time. As the power output increases, and therefore losses, motor overheating increases – the temperature rises more and more intensively as it heats up. Therefore, as the motor load increases, the operating time before reaching the limit overheating temperature decreases.

During short-term overloads lasting 2–3 minutes, it can be assumed that the heating process proceeds without heat transfer, that is, adiabatically.

An example of a short-term motor operation mode is the movement of a heavy train or movement on a short slope.

Repeated short-term mode. In rolling stock, electric motors often operate in a repetitive short-term mode. In this mode, intervals of motor operation under load alternate with pauses when the motor is off, as a result of which the entire operating time is divided into regularly repeating cycles. At times of load, the motor temperature does not reach a stable value, and during periods of pauses the motor does not cool down to ambient temperature. The cycle duration in this mode of operation should not exceed 10 minutes. The characteristic of the repeated short-term mode is given by the fraction of the on-time, expressed as a percentage of the total cycle duration.

During the operating cycle, the motor temperature increases according to its heating curve, and during pauses it decreases according to the cooling curve. In repeated short-term operation, higher loads are possible compared to long-term operation. The ratio of power losses in the motor in repeated short-term and long-term modes, which ensure the same temperature excess, depends on the duration of switching on.

An example of repeated short-term motor operation is frequent stops and starts during maneuvering or driving in urban conditions.

Intermittent mode. In this mode, short periods under load (working intervals) alternate with periods of idling (pauses). The intermittent mode is defined by the relative duration of the load, expressed as a percentage, the standard values of which are 15, 25, 40 and 60 %. The duration of one cycle is usually taken to be 10 minutes. The nature of the changes in parameters in this mode is similar to the changes observed in the repeated short-term mode. During the operating period, the motor temperature and the temperature rise do not have time to reach the set values.

Additional nominal modes. In addition to the main nominal operating modes, additional (recommended) modes are established in which the load is cyclic in nature:

- 1) repeated short-term mode with frequent starts and a duty cycle of 15, 25, 40 or 60 %;
- 2) repeated short-term with frequent starts and electric braking with a duty cycle of 15, 25, 40 and 60 %;
- 3) interspersed with frequent reverses and electric braking;
- 4) interleaved with two speeds.

The following parameters are set for additional nominal modes:

- for modes 1) and 2) – standard number of starts per hour;
- for mode 3) – number of reverses per hour;
- for mode 4) – the number of cycles per hour is 30, 60, 120 and 240.

Work under variable load. During the operation of electric motors, modes may occur that differ from those listed earlier. The most characteristic is the mode with a rapidly changing load, similar to repeated short-term, in which the temperature of the motor parts practically does not change during the cycle. If an electric motor operates continuously but under varying loads, different power losses occur at different times. The equivalent current method is usually used to assess the motor's ability to withstand a given load schedule. It is based on the assumption that the variable losses in the machine are proportional to the square of the load current.

Operation under alternating current load. When operating traction motors, operation in modes other than

those specified above is possible. Such machines are characterized by conditions with rapidly changing current and power. If the motor operates for a long time at constant power, but with currents of different magnitude, then the thermal process in it should be considered as not steady, since a change in current leads to a change in losses.

The influence of electromagnetic interference on the operation of locomotive traction motors. The operation of modern locomotives is closely related to the widespread use of powerful traction motors [39, 40], semiconductor converters [41, 42], microprocessor-based control systems [43–45], and numerous auxiliary electronic devices. Under such conditions, a complex electromagnetic environment arises in which electromagnetic interference can significantly affect the operation of traction motors and related systems.

Electromagnetic interference is unwanted electrical or magnetic influences that cause electrical current or voltage parameters to deviate from their nominal values. Their occurrence is caused by both internal and external factors.

The main internal sources of electromagnetic interference in locomotive traction drives are:

- switching processes in power circuits (operation of thyristors, transistors, contactors, relays);
- sparking on the collector-brush assembly of the traction motor;
- operation of power frequency converters, rectifiers and inverters;
- inductive and capacitive coupling between power and signal circuits.

External sources of electromagnetic interference include:

- electromagnetic influences from the contact network;
- interference from other locomotives or electric vehicles;
- lightning pulses and other natural electromagnetic phenomena.

As a result of the action of electromagnetic interference in the power supply circuits of traction

motors, short-term overvoltage pulses occur, which can significantly exceed operating values. This leads to:

- partial or complete breakdown of the insulation of the stator and rotor windings;
- accelerated aging of insulating materials;
- the appearance of local partial discharges that destroy the insulating coating;
- the occurrence of eddy currents in ferromagnetic parts of the motor, which increases heating and power losses.

Particularly dangerous are high-frequency pulses of short duration that act adiabatically – without heat removal, which causes a local increase in temperature and can lead to insulation degradation.

Modern locomotives are equipped with microprocessor control systems that are highly sensitive to electromagnetic interference [46, 47]. Electromagnetic interference can cause:

- distortion of signals from measuring sensors (current, voltage, temperature, speed);
- false triggering of automatic control and protection systems;
- controller software failures;
- disruption of data exchange between system units via CAN or RS-485 interfaces.

Such deviations reduce the stability of traction modes, can cause spontaneous shutdown or incorrect operation of the electric motor, which directly affects the safety of train movement.

High-frequency electromagnetic interference causes additional energy losses in the form of eddy currents in the ferromagnetic parts of the machine (yoke, cores, housing), which, in turn, leads to local overheating of structural elements, increased bearing temperature and increased friction, reduced motor efficiency, and the possibility of resonance phenomena when the frequencies of electromagnetic interference coincide with the natural oscillation frequencies of the electric drive elements, which enhances their destructive effect. In addition, electromagnetic emissions from traction motors and converters can extend beyond the power circuits and affect locomotive systems, the contact network and

adjacent tracks, creating interference for other means of transport [48, 49]. Such effects are critical because they can cause loss of communication between the driver and the dispatcher, failures in signaling, centralization and blocking systems or even incorrect indication of signals.

To ensure reliable operation of traction electric drives, it is necessary to implement a set of measures aimed at ensuring electromagnetic compatibility of systems. The main methods for reducing the impact of electromagnetic interference include:

1) electromagnetic shielding and filtering:

– application of high-pass filters in power circuits;

– use of metal screens and grounded cable sheaths;

– separation of signal and power wires in space;

2) optimization of control and switching circuits:

– using smooth (soft) switching methods for power elements;

– limiting the rate of rise of current (di/dt) and voltage (du/dt);

– application of damping circuits and interference suppression filters;

3) improvement of the grounding system:

– correct organization of grounding of electrical equipment;

– eliminating ground loops that can act as antennas for interference;

– use of symmetrical cable routes;

4) constructive solutions:

– increasing the electrical strength of insulating materials;

– use of materials with high magnetic characteristics to reduce losses;

– temperature control and timely equipment maintenance;

5) diagnostics and monitoring:

– regular measurement of electromagnetic radiation levels;

– checking the condition of screens, filters and contacts;

– computer diagnostics of the state of control systems for the presence of interference.

Using cloud technologies in traction drive control systems. The modern development of railway transport is characterized by the widespread introduction of digital technologies [50–53], among which cloud computing occupies a special place. The use of cloud technologies in traction electric drive control systems [54, 55] opens up new opportunities for monitoring, diagnostics, condition prediction, and optimization of locomotive traction motor operating modes.

Cloud technologies involve storing, processing, and analyzing large amounts of data on remote servers accessible via the Internet. In transport infrastructure, they are used for:

– collection and analytical processing of information about equipment operation in real time;

– centralized storage of technical data and operation history;

– remote control and adjustment of electronic locomotive systems;

– implementation of the principles of «predictive maintenance».

In the context of traction motors, cloud technologies allow for the creation of an intelligent control system that integrates data from the locomotive into a single information transport network [56–58].

A typical architecture for interacting with cloud services and traction drives includes three levels:

– field level (on-board layer) – sensors, controllers and microprocessor units that directly capture data from traction motors: current, voltage, temperature, vibration, rotation speed, load, etc.;

– communication layer (edge layer) – data transmission via wireless networks (LTE, 5G, Wi-Fi, radio channel) to pre-processing servers, where information filtering, normalization and encryption are performed;

– cloud layer – an analytical platform that stores large data sets (Big Data), performs real-time analysis, models the technical condition of motors, and generates recommendations to optimize their operation.

The use of cloud technologies provides a number of advantages that significantly increase the efficiency of locomotive traction drives:

– improved maintenance – cloud systems allow for continuous monitoring of motor parameters, which allows for timely detection of deviations, prediction of malfunctions and planning of repairs based on the actual condition of the equipment;

– energy consumption optimization – data analysis in the cloud helps determine the most efficient motor operating modes depending on the load, track profile, temperature conditions and the driver's driving style;

– increasing the service life of electrical machines – thanks to precise adjustment of control parameters, peak currents, heating and mechanical loads are reduced, which has a positive effect on the durability of windings and bearings;

– remote diagnostics and software updates – updates to control algorithms and protection parameters can be carried out without physical intervention in the locomotive, via secure communication channels;

– improving traffic safety – artificial intelligence systems integrated into cloud platforms are able to predict emergency situations by analyzing historical data from numerous locomotives and issuing warnings about possible failures.

Despite significant advantages, the integration of cloud services into the traction motor control system is accompanied by a number of challenges:

– data transmission delays (latency) – the operation of a traction electric drive requires high-speed control systems, so even minor signal delays can affect the accuracy of regulation;

– dependence on the quality of communication – in the case of an unstable or absent Internet connection (especially on remote sections of the track), data exchange between the locomotive and the cloud may be disrupted;

– cybersecurity issues – data transmission over public or corporate networks requires reliable encryption and protection against unauthorized access;

– difficulty of integration with existing systems – many older locomotives do not have compatible interfaces and require modernization to connect to cloud platforms;

– increased requirements for technical personnel – the operation of such systems requires special training of engineers and drivers capable of working with digital services and remote monitoring interfaces.

In the coming years, a transition to integrated cyber-physical traction control systems is expected, where cloud platforms will be closely linked to artificial intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) systems. Such solutions provide a complete digital model of the traction motor («digital twin»), adaptive real-time control, automatic optimization of energy consumption, synchronization of locomotives in trains («smart train» technology). As a result, cloud technologies will contribute to increasing the efficiency, reliability and environmental friendliness of the new generation of locomotives.

Conclusions.

Based on the research conducted, the following conclusions can be drawn:

– analysis of the heating and cooling processes of traction motors shows that the thermal state is one of the main factors determining their reliability and service life. Increasing the temperature of the windings beyond permissible limits leads to insulation degradation, increased electrical losses and reduced mechanical strength of the elements. Ensuring effective cooling, using modern heat-resistant materials and temperature monitoring systems can significantly increase the durability and efficiency of locomotive traction motors in various operating conditions;

– heating temperature is a critical parameter that determines the intensity of aging processes of insulating materials in locomotive traction motors. Maintaining the optimal thermal operating mode contributes to increasing the reliability, durability and energy efficiency of railway rolling stock;

– traction motor vibration is the result of a combination of factors, most often combining mechanical

imbalances with electromagnetic asymmetries. To reduce it, rotor balancing, bearing and mounting inspection, motor alignment control, and winding and electrical parameter diagnostics are required;

– the influence of operating modes (long, short-term, repeated short-term, etc.) on locomotive traction motors is decisive for their reliability, durability and efficiency. Each mode is characterized by its own loading conditions, thermal processes and operating characteristics;

– electromagnetic interference is one of the most significant factors affecting the efficiency, reliability and durability of locomotive traction motors. Its impact manifests itself in the form of overvoltages, failures in control systems, increased heat losses and electrical interference in adjacent devices. To ensure stable operation of electric traction systems, it is necessary to provide for electromagnetic protection measures that comply with electromagnetic compatibility requirements at the design stage, and during operation, to carry out systematic monitoring and prevention of sources of interference;

– cloud technologies are an important direction in the digital transformation of rail transport. Their use in traction motor control systems provides a new level of intellectualization of operational processes, allowing for real-time monitoring, diagnostics, analysis, and optimization of motor operation. At the same time, the effective use of cloud solutions requires addressing cybersecurity issues, standardization of data exchange protocols, and technical compatibility with existing equipment. In the future, the integration of cloud technologies with artificial intelligence systems and the Internet of Things will become a key factor in increasing the efficiency of electric traction drives and the development of «smart railway transport».

motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 14623–14642.

<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411>.

3. Панченко С. В., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Нерубацький В. П. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.

4. Garczarek A., Stachowiak D. Measurements and analysis of electromagnetic compatibility of railway rolling stock with train detection systems using track circuits. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 11. 2705. <https://doi.org/10.3390/en18112705>.

5. Afanasov A. M. Regulation of unbalanced electromagnetic moment in mutual loading systems of electric machines of traction rolling stock and multiple unit of mainline and industrial transport. *Science and Transport Progress*. 2014. No. 6(54). P. 70–77. <https://doi.org/10.15802/stp2014/32965>.

6. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Y. Q., McSweeney T. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains. CRC Press, 2016. 477 p.

7. Nerubatskyi V. P. Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. *Матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Людина, суспільство, комунікативні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–25 жовтня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 217.

8. Стадній О. Ю., Васюра А. С., Дорощенко Г. Д. Аварійні ситуації в роботі асинхронних двигунів, заходи та засоби їх запобігання. *Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях*. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–115. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115>.

9. Gronwald P.-O., Kern T. A. Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. Vol. 7, Iss. 4. P. 2892–2913. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3075844>.

10. Wang X., Li B., Gerada D., Huang K., Stone I., Worrall S., Yan Y. A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars. *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 201, Part A.

Reference

1. Nategh S., Boglietti A., Liu Y., Barber D., Brammer R., Lindberg D. A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56, Iss. 3. P. 2148–2157. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2968414>.

2. Paul S., Han P.-W., Chang J., Chun Y.-D., Lee J.-G. State-of-the-art review of railway traction

117758.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>.

11. Roy P., Towhidi M., Ahmed F., Bourgault A. J., Mukandan S., Balamurali A. A comprehensive review of thermal design and analysis of traction motors. *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2019.8781230>.

12. Goolak S., Tkachenko V., Šťastniak P., Sapronova S., Liubarskyi B. (2022). Analysis of control methods for the traction drive of an alternating current electric locomotive. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, Iss. 1. 150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.

13. Liubarskyi B., Petrenko A., Shaida V., Maslii A. Analysis of optimal operating modes of the induction traction drives for establishing a control algorithm over a semiconductor transducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, No. 8(88). P. 65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109179>.

14. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Determination of additional thermal losses from higher harmonics in AC motors windings. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (Харків, УкрДУЗТ, 29 жовтня 2021 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3 (додаток). С. 18–19.

15. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Method of determining additional thermal losses in the windings of electric motors. *Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці»* (Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 16–17 травня 2024 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. С. 68–69.

16. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012040.

17. Нерубацький В., Хоменко І., Гордієнко Д.

Дослідження та розрахунок рівнів вищих гармонік обертальних електричних машин в активно-адаптивних мережах. *Матеріали тез доповідей IV всеукр. наук.-техн. інтернет-конф. «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем»* (Рівне, НУВГП, 26–27 квітня 2023 р.). Рівне: НУВГП, 2023. С. 131–134.

18. Hemsén J., Eckstein L. A thermal model for the comparison of cooling concepts of synchronous machines for traction applications. *SAE Technical Paper*. 2022. 2022-24-0005. <https://doi.org/10.4271/2022-24-0005>.

19. Grishchenko A. V., Shrajber M. A. Simulation of thermal processes in asynchronous traction electric motor of a locomotive. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2131. 042088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042088>.

20. Shrajber M. A. Thermal calculations of asynchronous traction engines of diesel locomotives. *In Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference on Transport: Logistics, Construction, Maintenance, Management (TLC2M 2022)*. 2022. P. 120–123. <https://doi.org/10.5220/0011580000003527>.

21. Nategh S., Zhang H., Wallmark O., Boglietti A., Nassen T., Bazant M. Transient thermal modeling and analysis of railway traction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, Iss. 1. P. 79–89. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2821619>.

22. Manafov E. K., Huseynov F. H. Modeling of an integrated traction motor protection system. *Science and Transport Progress*. 2024. No 1(105). P. 51–61. <https://doi.org/10.15802/stp2024/303181>.

23. Manafov E. K., Guliyev H. B., Huseynov F. H. Real-time assessment of the technical condition of traction motors using machine learning and IoT technologies. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2 (110). С. 50–64. <https://doi.org/10.15802/stp2025/331096>.

24. Nategh S., Lindberg D., Brammer R., Boglietti A., Aglen O. Review and trends in traction motor design: electromagnetic and cooling system layouts. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2018.

<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506817>.

25. Chang H., Yu X. M., Qu X., Liu Y. J. Measure and study on heat balance of engine. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 563. P. 149–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.563.149>.

26. Петренко О. М., Любарський Б. Г. Оптимізація режимів роботи охолодження тягового двигуна електровоза. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2017. Т. 6, № 46. С. 251–254.

27. Shrajber M. Fatigue aging of insulation of traction motors of diesel locomotives. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 383. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338301011>.

28. Shrayber M. Investigation of fatigue aging of insulation of traction electric motors of diesel locomotives under cyclic load. *Bulletin of scientific research results*. 2023. No. 4. P. 27–35. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-4-27-35>.

29. Zhang J., Wang J., Li H., Zhang Q., He X., Meng C., Huang X., Fang Y., Wu J. A review of reliability assessment and lifetime prediction methods for electrical machine insulation under thermal aging. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 3. 576. <https://doi.org/10.3390/en18030576>.

30. Wang B., Liu Y., Yang S., Liao Y., Wang M. Characteristics analysis on bearing rotor system of high-speed train with track irregularity. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 221. 111674. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111674.

31. Wang P., Yang Y., Ma H., Xu H., Li X., Luo Z., Wen B. Vibration characteristics of rotor-bearing system with angular misalignment and cage fracture: Simulation and experiment. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 182. 109545. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109545.

32. Finley W., Loutfi M., Sauer B. J. Motor vibration problems – Understanding and identifying. *2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*. 2013. DOI: 10.1109/CITCON.2013.6525282.

33. Wu P., Song C., Wang X., Qu S., Wu H. Vibration analysis of traction drive system components based on the field test for high-speed train. *Journal of*

Advanced Transportation. 2023. Vol. 2023. 6682699. <https://doi.org/10.1155/2023/6682699>.

34. Mao L., Wang W., Liu Z., Yang G., Song C., Qu S. Research on causes of fatigue cracking in the motor hangers of high-speed trains induced by current fluctuation. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 127. 105508. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105508>.

35. Sathyan S., Belahcen A., Lehtikoinen A., Aydin U., Boxberg F. Investigation of the causes behind the vibrations of a high-speed solid-rotor induction motor. *Journal of Sound and Vibration*. 2019. Vol. 463. 114976. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114976>.

36. Голошапов С. С., Колебанов О. К. Взаємозв'язок навантажувальних режимів роботи асинхронного електроприводу. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 2. С. 26–30. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/05>.

37. Єнікєєв О., Куц Ю., Ткаченко А., Щербак Л. Фазовий метод виявлення обривів в статорних обмотках асинхронних двигунів. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. Вип. 4 (80). С. 98–109. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.098>.

38. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії : підручник. Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2019. 286 с.

39. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Розробка тривимірної моделі системи «рама візка – тягові електродвигуни» для електровоза ЧС4 за допомогою програмного продукту Solidworks. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4. С. 21–29. DOI: 10.18664/ikszt.v0i4.141926.

40. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Increasing energy efficiency of asynchronous electric drive by optimization of switching frequency in frequency converter. Reports of the IX International Scientific-Practical Conference «A Person, a Society, Communicative Technologies» (Kharkiv, USURT, October 21–22, 2021). Kharkiv: TOV «Disa plyus», 2021. P. 320–324.

41. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in

semiconductor devices. 2022 *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Proceedings.* 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.

42. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph. Kharkiv: Publisher Machulin L., 2023. 220 p. ISBN 978-617-8195-29-8.

43. Jamilov S., Ergashev O., Abduvaxobov M., Azimov S., Abdurasulov S. Improving the temperature resistance of traction electric motors using a microprocessor control system for modern locomotives. *V International Scientific Conference «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» (CONMECHYDRO – 2023). E3S Web of Conf.* 2023. Vol. 401. 03030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103030>.

44. Дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2022. Вип. 202. С. 62–77. DOI: 10.18664/1994-7852.2022.273622.

45. Щербак Я. В., Нерубацький В. П., Івакіна К. Я. Мікросхемотехніка електромеханотронних систем: підручник / за заг. ред. Я. В. Щербака. Харків: Видавець Мачулін Л. І., 2024. 260 с.

46. Kornaszewski M. Microprocessor technology and programmable logic controllers in new generation railway traffic control and management systems. *Archives of Transport System Telematics.* 2018. Vol. 11, Iss. 2. P. 18–23.

47. Feng J., Xu J., Liao W., Liu Y. Review on the traction system sensor technology of a rail transit train. *Sensors.* 2017. Vol. 17, Iss. 6. 1356. <https://doi.org/10.3390/s17061356>.

48. Fan Y., Zhang L., Li K. EMI and IEMI impacts on the radio communication network of electrified railway systems: A critical review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2023. Vol. 72, Iss. 8. P. 10409–10424. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3260582>.

49. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Improvement of electromagnetic compatibility in power

converters of electric rolling stock. *Зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії»* (Харків, ХНАДУ, 11–12 березня 2024 р.). Харків: ФОП Бровін О. В., 2024. С. 48–49.

50. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of modern technological possibilities for information transmission in railway rolling stock. *Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві»* (Кропивницький, ЦНТУ, 10–11 листопада 2022 р.). Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2022. С. 184–185.

51. Laiton-Bonadiez C., Branch-Bedoya J. W., Zapata-Cortes J., Paipa-Sanabria E., Arango-Serna M. Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry: A systematic review. *Sensors.* 2022. Vol. 22, Iss. 7. 2491. <https://doi.org/10.3390/s22072491>.

52. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Philipjeva M. V. Prospects for the application of satellite navigation technologies in railway transport. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (Харків, УкрДУЗТ, 11 листопада 2022 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2022. № 3 (додаток). С. 26–27.

53. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Application of fiber-optic sensors in traffic control systems of rolling stock. *Матеріали 19-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика»* (Харків, УкрДУЗТ, 1–2 червня 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 91–93.

54. Gozali A. A., Ruriawan M. F., Alamsyah A., Purwanto Y., Romadhony A., Wijaya F. P., Nugroho F., Husna D. N., Kridanto A., Fakhruddin A., Itqon M., Widiyanesti S. Smart train control and monitoring system with predictive maintenance and secure communications features. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.* 2025. Vol. 31. 101409. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101409>.

55. Kunthong J., Sapaklom T., Konghirun M., Prapanavarat C., Ayudhya P. N. N., Mujjalinvimut E. IoT-based traction motor drive condition monitoring in electric vehicles: Part 1. *2017 IEEE 12th International*

Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). 2017.
<https://doi.org/10.1109/PEDS.2017.8289143>.

56. Chu W., Wuniri Q., Du X., Xiong Q., Huang T., Li K. Cloud control system architectures, technologies and applications on intelligent and connected vehicles: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 34. 139.
<https://doi.org/10.1186/s10033-021-00638-4>.

57. Chougule S. B., Chaudhari B. S., Ghorpade S. N., Zennaro M. Exploring computing paradigms for electric vehicles: from cloud to edge intelligence, challenges and future directions. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, Iss. 2. 39.
<https://doi.org/10.3390/wevj15020039>.

58. Yang H., Wang C., Zhang K., Dong S. End-edge-cloud collaborative learning-aided prediction for high-speed train operation using LSTM. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 160. 104527.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104527>.

Нерубацький В. П. Аналіз умов і режимів роботи тягових двигунів локомотивів.

Анотація. Тягові електродвигуни є важливим елементом систем привода локомотивів, від надійності і стабільності роботи яких залежить безпека і ефективність перевезень. В умовах інтенсивної експлуатації двигуни зазнають дії змінних механічних, електричних і теплових навантажень. Додатково на їхню роботу впливають фактори зовнішнього середовища – температура, вологість, запиленість, вібрації. Важливою складовою підвищення ефективності є впровадження сучасних методів діагностики, моніторингу та прогнозування стану двигунів із використанням Інтернету речей і хмарних обчислень. Об'єктом дослідження є фізичні процеси, що протікають у тягових двигунах локомотивів під час їхньої роботи в різних режимах і за різних умов експлуатації. У статті проаналізовано умови та режими роботи тягових електродвигунів локомотивів із детальним урахуванням впливу температурного стану, якості ізоляції, режимів навантаження, умов експлуатації, електромагнітних завад і сучасних хмарних технологій моніторингу. Розглянуто особливості теплових процесів в обмотках, методи контролю стану ізоляції та діагностики, а також

впровадження систем дистанційного моніторингу. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу для оцінювання технічного стану тягових двигунів, що базований на поєднанні традиційних методів контролю з аналітичними можливостями хмарних сервісів. Результати аналізу показують, що на ефективність і надійність тягових двигунів локомотивів визначально впливають зовнішні фактори. Найбільшу загрозу становлять кліматичні умови, якість електроенергії, рівень вібрацій, електромагнітні завади та організація технічного обслуговування. Зменшити їхній негативний вплив можна за рахунок застосування сучасних діагностичних систем моніторингу. Це, зокрема, сприятиме підвищенню коефіцієнта корисної дії двигунів, скороченню експлуатаційних витрат і подовженню строку служби локомотивів.

Ключові слова: тяговий двигун, локомотив, температура нагрівання, охолодження, ізоляція, вібрації, режими роботи, електрична машина, електромагнітні завади, хмарні технології.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Проф. ЛОМОТЬКО Д. В.,
доц. АРСЕНЕНКО Д. В.,
асп. АБОЛОНІН А. І., КОФАНОВ О. В.

Український державний університет залізничного транспорту



Удосконалення технології доставлення термінових вантажів і багажу залізничним транспортом

Анотація. У статті розглянуто проблеми організації доставлення термінових вантажів і багажу на залізничному транспорті України. Проаналізовано сучасний стан пасажирських перевезень і якість сервісного обслуговування на прикладі роботи вокзалу пасажирської станції Х. Встановлено основні недоліки існуючої системи обробки багажу та вантажобагажу. Запропоновано удосконалити технологію трансферу багажу з використанням досвіду авіаційного транспорту і логістичних операторів. Обґрунтовано доцільність впровадження автоматизованих поштоматів для обробки термінових відправлень. Розраховано необхідну кількість комірок поштоматів і TVM-автоматів для продажу квитків на основі аналізу пасажиропотоків. Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів, яке підтвердило їхню економічну доцільність із терміном окупності два роки.

Ключові слова: залізничний транспорт, пасажирські перевезення, багаж, вантажобагаж, поштомат, транспортні технології, сервісне обслуговування, автоматизація.

Вступ.

Сучасні умови експлуатації вітчизняних залізниць демонструють, що пасажирські перевезення залишаються одним з основних напрямів діяльності, забезпечуючи потреби населення не лише в пересуванні, але і перевезенні багажу та вантажобагажу [1]. Проте деякі напрямки залізничних пасажирських перевезень мають збитковий характер, що обумовлено застарілим технічним оснащенням, недостатнім фінансуванням і низькою якістю обслуговування.

Актуальність дослідження підтверджена тим, що пасажирські перевезення залізничним транспортом на сьогодні є збитковою сферою діяльності через низький рівень доходів, відсутність достатніх інвестиційних ресурсів і неефективну систему організації [2]. Залучення нових клієнтів непільгових категорій може допомогти збільшити дохід у напрямі пасажирських перевезень. Для цього необхідно підвищити зацікавленість населення користуватися залізничним транспортом.

Розширення та покращення якості транспортних послуг є невід'ємною складовою підвищення конкурентоспроможності та рентабельності залізничного транспорту [3]. У цьому сенсі розвиток послуг із доставлення термінових вантажів і багажу залізничним транспортом є актуальним і затребуваним населенням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями пасажирських перевезень і підвищення рівня сервісу займаються науковці Красноштан А. М., Бутко Т. В., Панченко С. В., Прохорченко А. В. та інші [4-8]. У роботі [6] запропоновано методи удосконалення технології мультимодальних залізничних пасажирських перевезень за участю автотранспорту через узгодження графіків руху. У дослідженні [9] розглянуто необхідність підвищення ефективності роботи залізниць через вдосконалення технології обробки та перевезення вантажів, багажу та пошти.

Аналіз наукових праць показує, що основну увагу приділяють загальним питанням організації пасажирських перевезень, тоді як технологічні аспекти обробки термінових вантажів і багажу з використанням сучасних автоматизованих систем висвітлені недостатньо.

Мета роботи полягає в удосконаленні сервісу пасажирських перевезень за рахунок впровадження технології трансферу термінових вантажів і багажу у поїздах Intercity з використанням автоматизованих поштоматів і TVM-автоматів.

Методика дослідження.

Під час дослідження використовували методи, характерні для транспортних технологій. Первинні методи включали збір інформації про роботу залізничного вокзалу та багажного відділення,

© ЛОМОТЬКО Д. В., АРСЕНЕНКО Д. В., АБОЛОНІН А. І., КОФАНОВ О. В. 2025

вивчення технологічного процесу, аналіз нормативних актів [2, 3].

Для обробки даних застосовували вторинні методи: аналіз кількості перевезених пасажирів за 2023-2025 роки пасажирської станції X, аналіз погодинного коливання пасажиропотоків, оцінювання якості надання послуг. Метод порівняння використано для вибору оптимального методу автоматизації роботи багажного відділення. Необхідну кількість комірок поштоматів розраховували на основі теорії систем масового обслуговування за формулою Ерланга

$$E_c(m, A) = \frac{\frac{A^m}{m!}}{\frac{A^m}{m!} + \left(1 - \frac{A}{m}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{A^k}{k!}}, \quad (1)$$

де m – кількість комірок поштомата;

A – навантаження на багажне відділення відповідно до закону Ерланга,

$$A = T_s \lambda, \quad (2)$$

де T_s – середній час обробки запиту, хв;

λ – кількість запитів за одиницю часу, од/хв.

Результати дослідження. Аналіз пасажиропотоків станції X показав, що математичне очікування середньодобової кількості пасажирів транспортно-пересадочного вузла (ТПВ) станції X у приміському сполученні складає 7865 пас/доба, а в далекому сполученні – 8147 пас/доба (без

евакуаційних поїздів). Коефіцієнти варіації показників склали відповідно 0,3644 і 0,3326, що свідчить про відносну стабільність пасажиропотоку та його середню внутрішньорічну нерівномірність.

Аналіз погодинного коливання показав, що найінтенсивніший пасажиропотік із прибуття припадає на ранковий час із 5:00 до 11:00, максимум – 105 пасажирів – о 6:00. Із відправлення пік спостерігають у вечірній час із 17:00 до 22:00.

Аналіз роботи логістичних операторів показав, що лідером ринку доставлення є «Нова Пошта» із понад 5000 відділень. Основними трендами ринку є:

- зростання e-commerce до 21 % роздрібно торгівлі до кінця 2025 року;
- регіональна експансія;
- розширення фулфілмент-сервісів;
- цифровізація логістики;
- широка автоматизація процесів.

Порівняльний аналіз тарифів показав, що найдешевше доставлення в «Укрпошти» (~55 грн за відправлення до 2 кг), найшвидша – у «Нової Пошти» (один-два дні). Середній тариф встановлено на рівні 80 грн з урахуванням конкуренції.

Удосконалену технологію обробки багажу запропоновано на основі досвіду авіаційного транспорту з технологією трансферу багажу для міжнародних і внутрішньодержавних перевезень. Структурно-логічну схему обробки багажу (термінових вантажів) після прибуття на кінцеву станцію або станцію пересадки у випадку сканування та перевірки багажу під час перевантаження з вагона на засоби механізації наведено на рисунку.



Рис. Структурно-логічна схема обробки багажу (термінового вантажу) у випадку сканування та перевірки багажу

Основні етапи обробки багажу (термінового вантажу) включають:

1. Приймання багажу (термінового вантажу) від пасажирів з оформленням трансферної бирки.
2. Завантаження у спеціалізований поштомат у багажному відсіку поїзда.
3. Транспортування до станції пересадки.

4. Автоматизована ідентифікація та перевантаження.

5. Доставлення до пункту призначення.

6. Видача пасажирів через поштомат або доставлення оператором.

Запропоновано використання мобільних поштоматів Loko моделі Logis 17 із 17 комірками (розмір 2050×1000×500 мм) безпосередньо в багажних

відсіках швидкісних поїздів ЕКр1 «Тарпан» і HRCS2 «Hyundai».

Розрахунок необхідної кількості комірок поштоматів на маршруті від станції Х до станції К. Вихідні дані для розрахунку:

- максимальна кількість пасажирів за годину: 105 осіб;
- частка пасажирів із багажем: 10 %;
- середній час обробки: 240 с;
- допустимий час очікування: 7 с;

- відсоток заявок у межах норми: 85 %.

За результатами розрахунків за формулами (1), (2) із використанням онлайн-сервісу [7] визначено, що максимально необхідна кількість комірок поштомата становить 13 одиниць у піковий час (6:00). Розподіл за годинами доби наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Необхідна кількість комірок поштомата

Години	Після прибуття	Після відправлення	Разом
0:00	2	5	7
6:00	10	3	13
11:00	4	6	10
17:00	4	4	8
22:00	4	8	12

Кількість TVM-автоматів для продажу квитків та оплати послуги з термінового доставлення багажу (вантажу) розрахована за формулою

$$n = \frac{\lambda t_{\text{обсл.}} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda(T - t_{\text{обсл.}})}} \right]}{2}, \quad (3)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку пасажирів вокзалу, осіб/хв;

$t_{\text{обсл.}}$ – середній час, який витрачають на обслуговування одного пасажирів, с;

T – максимально припустимий час знаходження пасажирів в черзі, $T \leq 10$ хв.

Вихідні дані:

- інтенсивність потоку: $\lambda = 4,55$ пас/хв;
- час обслуговування: $t_{\text{обсл.}} = 110$ с = 1,83

хв;

- максимальний час очікування: $T = 10$ хв;
- коефіцієнт нерівномірності: $K_n = 2,82$.

Результат розрахунку показав, що оптимальним є $n = 5$ од. Отже, пропонуємо розмістити 5 TVM-автоматів у місцях масового проходження пасажирів у головному залі вокзалу. Це

дасть змогу скоротити кількість традиційних квиткових кас із 20 до 9.

Техніко-економічне обґрунтування. Економічна ефективність проекту розрахована на основі показників, наведених у табл. 2.

Вихідні дані для розрахунку

Показник	Значення
Вартість поштомата Loko Logis 17	290 795 грн
Підготовлення місця	15 000 грн
Монтаж і налагодження	30 000 грн

Транспортні витрати	3 300 грн
Разом капітальні витрати	339 095 грн
Витрати на експлуатацію	139 982 грн/р.
Економія ФОП	326 040 грн/р.
Дохід від послуг ($365 \times 80 \text{ грн} \times 13 \text{ комірок}$)	379 600 грн/р.

Коефіцієнти приведення до розрахункового року розраховані за формулою

$$a_t = \left(\frac{1+E}{1+I+R} \right)^{tp-t_k}, \quad (4)$$

де $E = 0,13$ (ставка депозиту);

$I = 0,09$ (інфляція);

$R = 0,02$ (ризик).

Результати розрахунку економічного ефекту наведено в табл. 3.

Економічний ефект від впровадження проєкту

Рік	Капітальні витрати, грн	Економія, грн	Додаткові витрати, грн	Дохід, грн	Коефіцієнт приведення	Ефект, грн	Наростаючим підсумком, грн
I	339 095	326 040	139 982	379 600	1,074	-120 864	-120 864
II	-	326 040	139 982	379 600	1,055	239 032	118 168
III	-	326 040	139 982	379 600	1,036	234 801	352 969
IV	-	326 040	139 982	379 600	1,018	230 645	583 614
V	-	326 040	139 982	379 600	1,000	226 563	810 177

Запропонована технологія доставлення термінових вантажів і багажу має ряд переваг порівняно з існуючою системою:

1. Підвищення швидкості обробки. Використання автоматизованих поштоматів дає змогу скоротити час на приймання та видачу багажу з 3 до 1 хв.

2. Покращення якості сервісу. Пасажири отримують можливість цілодобового доступу до своїх відправлень без очікування в чергах.

3. Зменшення втрат багажу. Автоматизована система обліку з QR-кодуванням мінімізує ризик втрати або помилкової видачі багажу.

4. Економічна ефективність. Термін окупності проєкту становить два роки, сумарний економічний ефект за п'ять років – 810 177 грн.

5. Конкурентоспроможність. Середній тариф 80 грн конкурентний порівняно з «Новою Поштою» (85 грн за доставлення аналогічним напрямком) за швидшого доставлення залізницею на довгі відстані.

Порівняння з досвідом інших країн показує, що аналогічні системи успішно функціонують на

залізницях Німеччини, Франції та Японії [11]. Особливістю запропонованої технології є адаптація до умов швидкісних поїздів з обмеженим багажним простором.

Обмеженням дослідження є те, що розрахунки виконані для однієї станції. Для масштабування на мережу необхідне додаткове дослідження особливостей різних типів станцій і напрямків руху.

Висновки. Проведений аналіз показав, що існуюча система обробки багажу на залізничному транспорті України має значні недоліки: застаріле обладнання, ручна праця, відсутність автоматизації і трекінгу.

1. Запропоновано удосконалену технологію трансферу термінових вантажів і багажу з використанням мобільних поштоматів у складі швидкісних поїздів, що дає змогу підвищити швидкість обробки та якість сервісу.

2. На основі аналізу пасажиропотоків визначено, що для станції Х необхідно 13 комірок поштомата і 5 TVM-автоматів для забезпечення належного рівня обслуговування.

3. Техніко-економічні розрахунки підтвердили доцільність впровадження проєкту з терміном окупності два роки та сумарним економічним ефектом 810 177 грн за п'ять років експлуатації.

4. Впровадження запропонованої технології дасть змогу підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту на ринку експрес-доставлення та залучити додаткових клієнтів.

Перспективи подальших досліджень включають розроблення алгоритмів оптимізації розміщення поштоматів на мережі залізниць і створення єдиної цифрової платформи для управління доставленням термінових відправлень.

Список використаних джерел

1. Ломотко Д. В., Анісімова В. С. Формування інноваційної технології обробки багажу на залізничному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3 (додаток). С. 29-31.
2. Про затвердження правил перевезення пасажирів, багажу, вантажобагажу та пошти залізничним транспортом України: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 09.04.2019 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0310-07>.
3. Про порядок обслуговування громадян залізничним транспортом: Постанова Кабінету Міністрів України від 19.03.1997 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/252-97-п>.
4. Ломотко Д. В., Філіпський О. В., Кравченко Д. М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезень за участю залізниць та автотранспорту. *Наукові праці ВНТУ*. 2019. № 4. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/579/549>.
5. Формування узгодженого графіку руху для мультимодальних пасажирських перевезень за участю залізничного транспорту / Д. В. Ломотко, О. В. Філіпський, М. Д. Ломотко, О. М. Красноштан. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 2(135). С. 49-58. DOI: 10.18664/ikszt.v0i2.164954
6. Ломотко Д. В., Даценко Г. Г. Аналіз рівня сервісу в умовах транспортно-пересадочних вузлів на високошвидкісних залізничних магістралях. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 161. С. 25-35.
7. Удосконалення технології і умов перевезення багажу та поштових відправлень залізницею / С. В. Панченко та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 159. С. 10-16.
8. Вернигора Р. В. Мультимодальні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. *Збірник наукових праць ДНУЗТ*. Дніпро, 2017. Вип. 14. С. 20-29.
9. Обухова А. Л., Мар'юшкіна Є. Ю. Удосконалення технології обслуговування вантажобагажів при здійсненні швидкісного руху. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2015. Вип. 154. С. 29-33.
10. Прохорченко А. В., Паламарчук В. В. Удосконалення системи орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах України в умовах упровадження швидкісного руху пасажирських поїздів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169. С. 213-224.
11. Погоріла Ю. В. Інформаційно-комунікативна діяльність підприємств поштового зв'язку України. *Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса*. 2020. Т. 2, № 12. С. 45-49.
12. Компанія HOLD. Офіційний сайт. URL: <https://hold.com.ua/ua/loko-logis-26-1>.

Prof. Lomotko D. V., Assoc. Professor
Arsenenko D. V., postgraduate students Abolonin A. I.,
Kofanov O. V.
Ukrainian State University of Railway Transport

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR DELIVERY OF URGENT CARGO AND BAGGAGE BY RAIL TRANSPORT

Abstract. The article considers problems of organizing delivery of urgent cargo and baggage by railway transport in Ukraine. The current state of passenger transportation and quality of service at station X terminal has been analyzed. Main shortcomings of existing baggage handling system have been identified. An improved baggage transfer technology using aviation transport experience and logistics operators practices has been proposed. An analysis of scientific works shows that the

main attention is paid to general issues of organizing passenger transportation, while the technological aspects of processing urgent cargo and baggage using modern automated systems are not sufficiently covered.

The feasibility of implementing automated parcel lockers for processing urgent shipments has been substantiated. Calculations of required number of locker cells and TVM ticket vending machines based on passenger flow analysis have been performed. Technical and economic justification of proposed measures confirmed their economic feasibility with 2-year payback period.

Secondary methods were used for data processing: analysis of the number of passengers transported for 2023-2025 at passenger station X, analysis of hourly fluctuations in passenger flows, assessment of the quality of service provision. The comparison method was used to select the optimal method for automating the operation of the baggage compartment. The calculation of the required number of mailboxes was performed based on the theory of mass service systems using the Erlang formula.

The implementation of the proposed technology will increase the competitiveness of rail transport in the express delivery market and attract additional customers. Prospects for further research include the development of algorithms for optimizing the placement of post offices on the railway network and the creation of a single digital platform for managing the delivery of urgent shipments.

Keywords: railway transport, passenger transportation, baggage, cargo, parcel locker, transport technologies, service, automation.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Арсененко Данило Володимирович, кандидат технічних наук, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>.

Аболонін Андрій Ігорович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: abloshas@gmail.com. ORCID iD: 0009-0009-5999-8382.

Кофанов Олександр Володимирович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою,

Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: alex.vonafo@gmail.com. ORCID iD: 0009-0005-3277-3731.

Lomotko Denis, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Arsenenko Danylo, Candidate of Technical Sciences, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>.

Abolonin Andriy, Postgraduate Student, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: abloshas@gmail.com. ORCID iD: 0009-0009-5999-8382.

Kofanov Oleksandr, postgraduate student of the Department of Operational Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: alex.vonafo@gmail.com. ORCID iD: 0009-0005-3277-37

ПРОХОРОВ В.М., к.т.н., доцент,
ПАРХОМЕНКО Л.А., д.т.н., доцент,
КАЛАШНІКОВА Т.Ю., к.т.н., доцент,
СЛОБОДЯНЮК О.А., магістрант
(Український державний університет залізничного транспорту)



Формування моделі Transit Network Design для швидкісного залізничного пасажирського сполучення в контексті парадигми цифрових двійників транспортних систем.

У статті розглянуто формування моделі Transit Network Design для оптимізації маршрутів швидкісних пасажирських поїздів на залізничній мережі з урахуванням прогнозованого попиту на перевезення між станціями. Основну увагу приділено побудові математичного апарату, що дозволяє генерувати маршрути без заздалегідь заданого їх переліку, використовуючи лише топологію мережі та матрицю очікуваного попиту. Запропонована модель відходить від статичного планування, враховуючи не лише базові значення попиту, але й функцію зниження привабливості поїздки залежно від кількості проміжних зупинок між станцією відправлення та призначення. Це дозволяє об'єктивно оцінювати гіпотетичні маршрути та формувати раціональну мережу руху швидкісних поїздів з погляду як операційної ефективності, так і пасажирської привабливості.

У моделі запропоновано цільову функцію, спрямовану на максимізацію сумарного реалізованого попиту або доходу оператора транспортних послуг, забезпечуючи оцінку впливу топологічних рішень (конфігурації маршрутів, розміщення зупинок, довжини поїздок) на економічну ефективність системи. Цей підхід забезпечує наукову обґрунтованість і прозорість процесу проектування мережі руху. Також детально розглянуто можливість застосування парадигми цифрових двійників для симуляційного відтворення функціонування мережі, що дозволяє аналізувати альтернативні варіанти розкладів, топологій і політики маршрутизації у масштабі, близькому до реального часу. Це забезпечує основу для подальшої автоматизації формування мережі руху та її відтворюваності в сучасному цифровому середовищі.

Ключові слова: оптимізація маршрутів, швидкісні перевезення, Transit Network Design, попит на пасажирські перевезення, цифровий двійник, математичне моделювання, залізничний транспорт.

Постанова проблеми.

Сучасні пасажирські залізничні перевезення функціонують в умовах високої конкуренції з іншими видами транспорту та зростаючих вимог до швидкості, регулярності та комфорту подорожей. Одним із ключових факторів,

що визначає привабливість маршруту для пасажирів, є кількість проміжних зупинок між пунктами відправлення та призначення. Надмірна кількість зупинок збільшує час поїздки та може призводити до втрати частини пасажиропотоку, що безпосередньо знижує економічну ефективність та завантаженість поїздів.

© ПРОХОРОВ В.М., ПАРХОМЕНКО Л.А., КАЛАШНІКОВА Т.Ю., СЛОБОДЯНЮК О.А., 2025

Разом з тим реальна експлуатаційна ситуація ускладнюється невизначеністю попиту, варіативністю інтенсивності руху, зміною розкладів та іншими динамічними чинниками, які важко точно врахувати на етапі планування. Традиційні підходи до моделювання часто спираються на усереднені або спрощені параметри та не дозволяють оперативно адаптувати маршрутну політику до змін реального середовища.

У цьому контексті актуальним стає впровадження цифрових двійників транспортної системи, які забезпечують синхронізацію моделей з даними реального часу, дозволяють моделювати альтернативні варіанти маршрутів та оцінювати наслідки для пасажиропотоку, навантаження інфраструктури та якості обслуговування. Використання цифрового двійника створює можливість оцінювати вплив зміни кількості зупинок ще до їх впровадження, мінімізувати ризики неефективних рішень та підвищити точність прогнозування.

Отже, виникає науково-практична задача розроблення підходу до оцінки та оптимізації маршрутної політики з урахуванням реакції пасажирського попиту на кількість зупинок та можливості інтеграції отриманої моделі у середовище цифрового двійника для підтримки адаптивного та обґрунтованого управління залізничними перевезеннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У статті [1] запропоновано багаторівневу архітектуру цифрового двійника залізничної мережі, що включає підсистеми інфраструктури, рухомого складу та пасажиропотоків. Автори показують, що така модель дозволяє здійснювати моніторинг і прогнозування стану мережі в реальному часі. Проте в роботі не враховано обмеження на масштабування для великих мереж.

У статті [2] розглянуто інтеграцію цифрового двійника з моделями прогнозування пасажиропотоків за допомогою глибинного навчання. Результати демонструють підвищення точності прогнозів та ефективності планування руху швидкісних поїздів. Недоліком є брак довготривалих даних для тренування моделей.

У статті [3] запропоновано підхід до спільної оптимізації «маршрут + зупинки + seat-allocation / ціноутворення» для високошвидкісних залізниць, з урахуванням еластичного (залежного від ціни) попиту. Автори демонструють, що інтеграція рішення про трасування поїздів, їх зупинки, розподілу місць і ціни дає змогу краще узгодити пропозицію з попитом, підвищити заповнюваність та дохід.

У статті [4] побудовано модель «stop-plan + timetable + seat allocation» з урахуванням стохастичного (часовозалежного) пасажиропотоку — з метою адаптації курсування до динаміки попиту. Це дозволяє краще підлаштовувати розклад до реального попиту та зменшувати невикористані місця.

У статті [5] запропоновано метод гібридної періодичності + додавання позаперіодичних поїздів (hybrid periodic timetable) з урахуванням варіативності попиту та обмежень на рухомий склад — для підвищення гнучкості та орієнтації на пасажирів. Це дозволяє змінювати розклад залежно від часу доби / дня / попиту.

У статті [6] розглянуто оптимізаційні рішення щодо перепланування розкладу (rescheduling) у разі збоїв або зміни умов з розглядом ресурсних обмежень мережі. Це дає змогу швидко адаптувати рух, зберігаючи якість обслуговування та пропускну здатність.

У статті [7] досліджено оптимізацію потужності поїздів щодо попиту: наприклад, використання меншої кількості вагонів у години з меншим попитом і більше — у пікові, щоб ефективно використовувати ресурси та зменшити невикористані місця.

Таким чином, основними викликами залишаються інтеграція різнорідних даних, масштабування моделей на рівень мережі, прогнозування динамічних змін у пасажиропотоках та врахування зовнішніх факторів для підвищення точності і надійності цифрових двійників у високошвидкісних залізничних системах.

Формулювання цілей. Метою дослідження є розробка математичної моделі для оптимізації маршрутної політики швидкісних пасажирських перевезень на залізничній мережі з урахуванням впливу кількості проміжних зупинок на попит пасажирів та загальну економічну ефективність роботи перевізника. Основне завдання полягає у створенні інструменту, який дозволить автоматично генерувати можливі маршрути руху на основі топології мережі, оцінювати їх з точки зору завантаження, доходності та привабливості для пасажирів, а також забезпечувати відбір оптимальних рішень.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- сформулювати математичний опис пасажирського попиту на основі базових прогнозних даних та функції зниження попиту залежно від кількості зупинок між станціями;

- розробити механізм генерації маршрутів без заздалегідь фіксованого набору варіантів;

– запропонувати цільову функцію, яка максимізує сумарний дохід або обсяг задоволеного попиту на мережі;

– забезпечити можливість реалізації моделі в середовищі цифрового двійника для адаптивного аналізу маршрутних рішень у реальному або наближеному до реального масштабі часу.

Реалізація зазначених завдань дозволить підвищити точність прогнозування, скоротити ризики неефективних рішень та забезпечити науково обґрунтовану підтримку процесів планування швидкісних пасажирських перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Поставлені цілі практично повністю відповідають класу задач, які формуються як задачі дизайну мережі (англ. Transit Network Design, TND) [8]. Проблеми проектування мережі маршрутів транспорту (в першу чергу пасажирського і громадського) охоплюють комплексне математичне завдання оптимізації, що полягає у визначенні ідеального набору маршрутів, їхньої частоти та розкладу. Основна мета полягає у знаходженні найкращого балансу між мінімізацією експлуатаційних витрат і максимізацією прибутків для транспортного оператора та максимізацією рівня обслуговування (швидкість, зручність, мінімум пересадок) для пасажирів.

Як було зазначено вище, проблеми проектування мережі маршрутів транспорту (TND) охоплюють комплексне математичне завдання оптимізації, що полягає у визначенні ідеального набору маршрутів, їхньої частоти та розкладу з метою досягнення найкращого балансу між мінімізацією витрат оператора та максимізацією рівня обслуговування пасажирів. Парадигма цифрових двійників (англ. Digital Twins) виводить вирішення цього завдання на новий рівень, оскільки віртуальна копія системи, що отримує дані в реальному часі, дозволяє динамічно коригувати та прогнозувати вплив змін у мережі маршрутів, забезпечуючи безперервну оптимізацію транспортної системи.

Розглянемо математичну постановку задачі оптимізації схем оберту швидкісних пасажирських поїздів шляхом максимізації задоволення попиту на швидкісні пасажирські перевезення. Нехай задана залізнична мережа як неорієнтований граф $G = (V, E)$, де V — множина станцій, E — множина ділянок між станціями. Для ребра $(u, v) \in E$ відома довжина $l_{uv} > 0$ (у км).

Матриця базового прогнозного попиту:

$$D = [d_{ij}], \quad d_{ij} \geq 0, \quad i, j \in V, i \neq j, \quad (1)$$

де d_{ij} — кількість пасажирів, які бажають за період (наприклад, за добу) їхати з i в j .

Параметри моделі:

C — місткість одного поїзда (пасажирів);

N_{sets} — кількість доступних составів;

v — типова крейсерська швидкість (км/год);

τ_{stop} — середній час стоянки на зупинці (год);

T_{buffer} — технологічний буфер на оборот (год);

ρ_0 — базова допустима щільність зупинок (остановок на км);

$\beta > 0$ — параметр чутливості попиту до перевищення щільності.

Далі розглянемо формалізацію маршрутів. Маршрут r — простий шлях у графі:

$$r = (v_0, v_1, \dots, v_k), \quad v_s \in V, \text{ ці } v_s \text{ різні.} \quad (2)$$

Множина кандидатних маршрутів (після генерації з графа) позначимо $\mathcal{R}$.

Для маршруту r і для пари станцій i, j (які лежать на маршруті r у правильному порядку) визначаємо:

$n_{ij}(r)$ — кількість проміжних зупинок між пунктами i і j на маршруті r (тобто число станцій між i і j);

$L_{ij}(r)$ — довжина підшляху від i до j по маршруту r :

$$L_{ij}(r) = \sum_{(u,v) \in P_{ij}(r)} l_{uv}, \quad (2)$$

де $P_{ij}(r)$ — множина ребер на підшляху $i \rightarrow j$ у маршруті r .

Повна довжина маршруту:

$$\ell_r = \sum_{s=0}^{k-1} l_{v_s v_{s+1}}; \quad (3)$$

загальна кількість зупинок маршруту n_r (наприклад, кількість вузлів у списку зупинок мінус 1);

Час одного повного обороту (туди й назад):

$$\tau_r^{\text{turn}} = 2 \cdot \frac{\ell_r}{v} + n_r \cdot \tau_{\text{stop}} + T_{\text{buffer}}. \quad (4)$$

Щільність зупинок для пари i, j на маршруті r :

$$\rho_{ij}(r) = \frac{n_{ij}(r)}{L_{ij}(r)}. \quad (5)$$

Важливим елементом моделі повинна стати функція коригування попиту. Для більшої реалістичності моделі доцільно застосувати плавну функцію множника $k_{ij}(r) \in (0, 1]$, яка при $\rho_{ij}(r) \leq \rho_0$ близька до 1, а при зростанні $\rho_{ij}(r)$ меншає. З метою гладкості та диференційовності доцільно використати *softplus*-аппроксимацію для від'ємної частини:

$$\text{softplus}(x) = \ln(1 + e^x). \quad (6)$$

Тоді рекомендований множник:

$$k_{ij}(r) = \exp(-\beta \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0)). \quad (7)$$

Ця формула задає однолінійний вираз (без кускових визначень) і задовольняє інтуїтивним вимогам:

$$\begin{array}{ll} \text{якщо} & \rho_{ij}(r) \ll \rho_0, & \text{то} \\ \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0) \approx 0 & \text{і} & k_{ij}(r) \approx 1; \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{якщо} & \rho_{ij}(r) \gg \rho_0, & \text{то} \\ \text{softplus}(\rho_{ij}(r) - \rho_0) \approx \rho_{ij}(r) - \rho_0 & & \\ k_{ij}(r) \approx \exp(-\beta(\rho_{ij}(r) - \rho_0)). & & \end{array}$$

Скоригований попит, який забезпечує маршрут r для пари $i \rightarrow j$:

$$\tilde{d}_{ij}(r) = d_{ij} k_{ij}(r). \quad (8)$$

Змінні моделі

Для кожного маршруту $r \in \mathcal{R}$ вводимо:

$x_r \in \{0, 1\}$ — індикатор запуску маршруту r (1 — запускаємо, 0 — ні);

$f_r \geq 0$ — частота рейсів маршруту r за період (наприклад, рейсів на добу);

$z_{r,ij} \in \{0, 1\}$ — індикатор: маршрут r обслуговує пару $i \rightarrow j$ як обрана альтернатива (1 — так);

$\tilde{S}_{ij} \geq 0$ — реально перевезена кількість пасажирів з i в j .

Параметри, що передобчислюються:

$\delta_{r,ij} \in \{0, 1\}$ — індикатор того, що маршрут r проходить через i та j у правильному порядку;

$\tilde{d}_{ij}(r)$ — скоригований попит (як вище);

C — місткість поїзда;

$f_r^{\max}$ — максимальна допустима частота маршруту r .

Цільова функція

Базова задача — максимізація сумарного перевезеного (скоригованого) попиту або доходу. Запишемо загальну форму з урахуванням доходу:

$$\max Z = \sum_{i \neq j} p_{ij} \tilde{S}_{ij} - \sum_{r \in \mathcal{R}} (c_r^{\text{var}} f_r + c_r^{\text{fix}} x_r), \quad (9)$$

де p_{ij} — середній дохід з одного пасажирів на парі $i \rightarrow j$, c_r^{var} — змінні витрати на один рейс маршруту r (наприклад, пропорційні пробігу), c_r^{fix} —

фіксовані витрати на запуск маршруту r . Для простоти можна взяти $p_{ij} \equiv 1$ і відкинути витрати, якщо мета — максимізація покриття.

Problem, MILP) при умові попереднього обчислення параметрів $\tilde{d}_{ij}(r)$.

Перш за все необхідно ввести технічні обмеження, які забезпечують коректність запуску та обслуговування маршрутів:

$$z_{r,ij} \leq x_r, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall i \neq j. \quad (10)$$

$$z_{r,ij} \leq \delta_{r,ij}, \quad \forall r, i, j. \quad (11)$$

(тобто $z_{r,ij}$ може бути 1 лише якщо маршрут запущено і маршрут проходить через пару.)

Наступне обмеження необхідне для забезпечення коректності вибору альтернатив.

Опціонально моделюємо, що для кожної пари $i \rightarrow j$ вибирається не більше однієї швидкісної альтернативи:

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} z_{r,ij} \leq 1, \quad \forall i \neq j. \quad (12)$$

(Як альтернатива, дозволяємо розподіл пасажирів між кількома маршрутами, вводячи частки).

Наступне обмеження повинне забезпечити коректне врахування реалізованих пасажиропотоків. Потенційне покриття (якщо вибрана альтернатива):

$$S_{ij}^{\text{pot}} = \sum_{r \in \mathcal{R}} \tilde{d}_{ij}(r) z_{r,ij}. \quad (13)$$

Реально перевезена кількість:

$$\tilde{S}_{ij} \leq S_{ij}^{\text{pot}}, \quad \forall i \neq j. \quad (14)$$

Розглянемо також місткість рейсів. Якщо маршрут r обрано для пари $i \rightarrow j$, реальний перевіз не може перевищувати сумарної місткості рейсів:

$$\tilde{S}_{ij} \leq \sum_{r \in \mathcal{R}} C f_r z_{r,ij}, \quad \forall i \neq j. \quad (15)$$

Далі введемо необхідні обмеження, які накладаються на змінні моделі. Нижче наведено набір обмежень, що перетворюють дану задачу на задачу змішаного-цілочисельного лінійного програмування (англ. Mixed Integer Linear Programming). Наступне обмеження спрямоване на коректне врахування ресурсів составів:

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} f_r \tau_r^{\text{turn}} \leq N_{\text{sets}}. \quad (16)$$

при цьому повинні забезпечуватись наступні межі та типи змінних:

$$0 \leq f_r \leq f_r^{\text{max}} x_r, \quad f_r \in \mathbb{R}_{\geq 0}; \quad (17)$$

$$x_r \in \{0,1\}, \quad z_{r,ij} \in \{0,1\}, \quad \tilde{S}_{ij} \geq 0. \quad (18)$$

Розглянемо також додаткові умови та зауваження щодо реалізації запропонованої моделі:

1. Якщо множина всіх простих шляхів $\mathcal{R}$ генерується заздалегідь (наприклад, алгоритмом k-shortest paths), то всі параметри $n_{ij}(r), L_{ij}(r), \rho_{ij}(r), k_{ij}(r), \tilde{d}_{ij}(r), \ell_r, \tau_r^{\text{turn}}$ можна передобчислити. Тоді задача зводиться до MILP (за умови, що f_r можуть бути неперервними або цілочисельними).
2. Якщо ж потрібно, щоб модель сама синтезувала маршрути без попередньої генерації, то застосовують колонну генерацію або комбінаторні підходи; це значно ускладнює модель і потребує субзадач для пошуку шляхів з позитивними зведеними цінами.

3. Параметри β і ρ_0 слід калібрувати на історичних даних або встановлювати експертно. Для чутливого аналізу рекомендовано проводити варіацію $\beta \in [0.1, 5]$ та ρ_0 у розумних межах відповідно до мережі.

Наведемо схему обчислення для однієї пари $i \rightarrow j$ і одного кандидата r :

$$\rho_{ij}(r) = \frac{n_{ij}(r)}{L_{ij}(r)}, \quad k_{ij}(r) = \exp(-\beta \ln(1 + e^{\rho_{ij}(r)})) \quad (19)$$

$$\tilde{d}_{ij}(r) = d_{ij} k_{ij}(r), \quad S_{ij}^{\text{pot}} = \sum_r \tilde{d}_{ij}(r) z_{r,ij}. \quad (20)$$

Наведена схема обчислень демонструє послідовність кроків, за якою модель визначає, яку

частину попиту між конкретною парою станцій може потенційно забезпечити кожний кандидатний маршрут. Спершу оцінюється щільність зупинок на маршруті — показник, що характеризує рівень його прямої та відповідності вимогам швидкісного руху.

Далі визначається скоригований попит для конкретного маршруту, який відображає реалістичний обсяг пасажирів, що оберуть даний напрямок за умови його фактичної конфігурації. Потенційно можливий обсяг обслуговування формується шляхом підсумовування внесків усіх маршрутів, що підходять для даної пари станцій, з урахуванням бінарного вибору маршруту в оптимізаційній моделі. Таким чином, модель оцінює не лише якість кожного окремого маршруту, а й його роль у загальній конфігурації мережі.

У підсумку така схема дозволяє чітко структурувати взаємозв'язок між топологічними характеристиками маршрутів, їх привабливістю для пасажирів, можливими обсягами перевезень і подальшим вибором частот курсування. Запропонований підхід забезпечує узгодженість між рішеннями щодо відкриття маршрутів і параметрами їх експлуатації. Завдяки згладженому коефіцієнту зниження попиту модель уникає різких стрибків у поведінці цільової функції, що робить її більш стабільною для чисельної оптимізації та придатною для масштабування на мережевому рівні.

Фінальна MILP-постановка, яка отримується після генерації набору маршрутів, дозволяє одночасно обирати маршрути, визначати частоти курсування та розподіляти попит між ними з урахуванням пропускнуої спроможності інфраструктури та обмежень щодо рухомого складу. Таким чином, модель забезпечує комплексний опис організації швидкісного пасажирського руху, поєднуючи геометрію мережі, поведінку пасажирського попиту та експлуатаційні рішення в єдиній формалізації.

Висновки.

Сформовано концепцію моделі організації швидкісного пасажирського руху на залізничній мережі в контексті парадигми цифрових двійників транспортних систем. На відміну від традиційних підходів до формування маршрутної мережі, запропонована модель одночасно визначає як топологію маршрутів, так і частоти їх курсування, що забезпечує узгодженість між обсягом попиту, пропускнуою спроможністю інфраструктури та очікуваним економічним результатом. Включення частот у якості оптимізаційних змінних відповідає сучасним тенденціям у задачах Transit Network Design та дозволяє врахувати, яка частина попиту реально буде задоволена.

На основі цієї характеристики отримується коефіцієнт зниження попиту, який плавно модифікує вихідний обсяг пасажирів, враховуючи погіршення привабливості маршруту зі збільшенням кількості проміжних зупинок.

Особливістю моделі є використання плавного коефіцієнта зниження попиту залежно від щільності зупинок, що усуває недоліки кусково-визначених функцій попиту й забезпечує коректнішу поведінку при порівнянні маршрутів різної структури. Це дозволяє адекватно моделювати компроміс між швидкістю та охопленням пасажирського ринку.

Ще однією перевагою є формулювання задачі у вигляді MILP після попередньої генерації кандидатних маршрутів. Такий підхід робить практично здійсненою оптимізацію навіть на мережевому рівні, забезпечуючи відтвореність і можливість інтеграції з цифровим двійником для подальших сценарних досліджень.

Разом з тим, модель має низку обмежень. По-перше, використання добових пасажиропотоків не дозволяє врахувати пікові коливання попиту, що може впливати на точність оцінки необхідної частоти курсування. По-друге, генерація кандидатних маршрутів задає верхню межу на різноманітність конфігурацій мережі, а якість рішення залежить від повноти цього набору. По-третє, поточна постановка не враховує можливих технологічних обмежень, пов'язаних із перетинами потоків, конфліктами розкладу або особливостями швидкісних ділянок.

Перспективи подальших досліджень передбачають:

- включення часової динаміки попиту та використання прогностичних моделей для різних сценаріїв розвитку ринку;
- інтеграцію моделі з модулем імітаційного моделювання для автоматичного оновлення параметрів цифрового двійника;
- розширення набору обмежень та критеріїв з урахуванням розкладів, інтервалів, технічних регламентів та чутливості до зовнішніх чинників;
- застосування методів робастної оптимізації для роботи з невизначеними або неповними даними про попит.

Запропонована модель є вагомим кроком до створення інтелектуального інструменту підтримки рішень у проєктуванні мережі високошвидкісного руху, здатного адаптуватися до умов реального попиту й взаємодіяти з цифровим двійником транспортної системи.

1. 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*. 2025. 3(3), 238–250.
2. Ou, Y., Mihăiță, A.-S., Ellison, A., Mao, T., Lee, S., Chen, F. Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data. *Electronics*. 2025. 14(12), 2359. <https://doi.org/10.3390/electronics14122359>.
formation of a rational high-speed train network in terms of both operational efficiency and passenger appeal.
3. Shi, X., Zhou, W., & Li, X. Optimization of Line Planning by Integrating Ticket Pricing and Seat Allocation Decisions for High-Speed Railway. *Mathematics*. 2025. 13(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/math13071073>
4. Xu, R., Wang, F., Zhou, F. Train Stop Schedule Plan Optimization of High-Speed Railway Based on Time-Segmented Passenger Flow Demand. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Transportation Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1061/9780784482742.103>.
5. Yao, Z., Schöbel, A., Nie, L., Jäger, S. Benders Decomposition for Passenger-Oriented Train Timetabling with Hybrid Periodicity. *arXiv preprint*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.09892>.
6. Bafandkar, S., Shafahi, Y., Eslami, A., Yazdiani, A. (). Digitalizing Railway Operations: An Optimization-Based Train Rescheduling Model for Urban and Interurban Disrupted Networks. *arXiv preprint*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.14671>.
7. Zhong, L., Liu, Y., Xu, G., Liu, W., Yang, H. Train capacity optimization under stochastic demand: A flexible composition strategy with extra-long trains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. 204, 104430. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104430>.
8. Guihaire, V., Hao, J.-K. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008. 42(10), 1251–1273. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.03.011>.

Prokhorov V.M., Parkhomenko L.O., Kalashnikova T.Yu., Slobodianiuk O.A. Development of a Transit Network Design Model for High-Speed Rail Passenger Transport within the Digital Twin Paradigm of Transportation Systems.

The article discusses the development of a Transit Network Design (TND) model for optimizing the routes of high-speed passenger trains on a railway network, considering the predicted demand for transportation between stations. Primary attention is given to the construction of a mathematical apparatus that allows for the generation of routes without a predefined list, utilizing only the network topology and the expected demand matrix. The proposed model moves beyond static planning by accounting not only for baseline demand values but also for a function modeling the decrease in travel attractiveness depending on the number of intermediate stops between the origin and destination stations. This approach allows for an objective evaluation of hypothetical routes and the

The model proposes an objective function aimed at maximizing the total realized demand or the revenue of the transport service operator. This approach enables the assessment of the influence of topological decisions (route configuration, stop placement, trip lengths) on the economic and operational efficiency of the system. The paper also thoroughly examines the potential application of the Digital Twin paradigm for the simulation-based reproduction of network functioning, which allows for the analysis of alternative schedules, topologies, and routing policies on a near-real-time scale. This provides a foundation for the subsequent automation of network formation and its reproducibility within a modern digital environment.

Keywords: route optimization, high-speed transport, Transit Network Design, passenger transport demand, Digital Twin, mathematical modeling, railway transport.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Слободянюк Олена Анатоліївна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-0085-8225>.

E-mail: elena14152629@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail:

prokhorov@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail:

parhomenko@kart.edu.ua.

Parkhomenko Larysa, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail:

bulavina_tv@ukr.net.

Slobodianiuk Olena, master's student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0009-0007-0085-8225>.

E-mail:

elena14152629@gmail.com.

здобувач другого рівня вищої освіти, М. В. КАНЄВСЬКИЙ,
кандидат технічних наук, С. О. ЗМІЙ,
(Український державний університет залізничного транспорту)
Д. С. КАНЄВСЬКИЙ



Фундаментальні принципи проактивного моніторингу рейок за допомогою волоконно-оптичних сенсорів

Анотація. Дослідження присвячене розробленню і теоретичному обґрунтуванню фундаментальних принципів створення проактивної системи моніторингу цілісності залізничних рейок на основі технології розподіленого акустичного зондування (DAS). Проаналізовано критичні недоліки існуючих методів інспектування, що функціонують у реактивній парадигмі і створюють «сліпі зони» між перевітками. Обґрунтовано, що DAS є оптимальним технологічним рішенням завдяки нечутливості до електромагнітних завад, можливості контролю ділянок до 100 км та економічності за рахунок використання сучасних волоконно-оптичних кабелів. Досліджено фізику поширення пружних хвиль у рейці, що дало змогу встановити компроміс між дальністю (низькі частоти) і деталізацією (високі частоти) моніторингу. Сформульовано головний науковий внесок — теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «з випередженням» через аналіз вібрацій, що поширюються рейкою попереду поїзда.

Ключові слова: залізничні рейки, моніторинг, розподілене акустичне зондування, DAS, волоконно-оптичні сенсори, проактивне виявлення, цілісність колії, пружні хвилі, безпека руху.

Вступ.

Дослідження, наведене у статті, належить до галузі залізничного транспорту, а саме інженерії та моніторингу колійної інфраструктури. Актуальність розглянутої проблеми обґрунтована кількома критичними факторами. По-перше, залізничні мережі є основними артеріями світової економіки, і надійність і безпека перевезень безпосередньо залежать від цілісності колії. З огляду на постійне зростання швидкостей та осьових навантажень напруження, що діють на рейки, експоненційно підвищуються, через що навіть незначний дефект може швидко призвести до катастрофічних наслідків [1].

Важливість цієї проблеми підтверджена статистикою: лише у США у 2018 році дефекти колії стали причиною 546 інцидентів, що завдали збитків на понад 97 мільйонів доларів [2]. Це підкреслює, що раннє виявлення пошкоджень є не просто питанням оптимізації обслуговування,

а фундаментальною вимогою для запобігання аваріям і збереження людських життів.

Сучасні методи контролю, такі як візуальні огляди та неруйнівний контроль, мають суттєві обмеження. Вони є переважно реактивними або періодичними, що створює небезпечні «сліпі зони» в часі, протягом яких дефекти можуть розвиватися непоміченими. Візуальні огляди є суб'єктивними і трудомісткими, тоді як інструментальні методи за допомогою повільних дефектоскопних вагонів залишають значні проміжки часу між перевітками.

Найгострішою є системна прогалина безпеки, що виникає внаслідок модернізації залізничних сигнальних систем. Традиційні рейкові кола, хоч і ненадійно, але виконували вторинну функцію виявлення повних розривів рейки. Сучасні системи, такі як лічильники осей, що впроваджувалися в рамках переходу до європейської системи управління рухом поїздів (ETCS), є значно надійнішими для виявлення поїздів, але мають фундаментальний недолік — вони абсолютно нездатні виявляти злами рейок.

Отже, модернізація ненавмисно усуває вторинний механізм безпеки, створюючи нагальну потребу в новій, спеціалізованій технології, яка б цілеспрямовано забезпечувала надійний моніторинг цілісності колії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема моніторингу стану залізничної інфраструктури є предметом інтенсивних досліджень як вітчизняних, так і закордонних учених. Аналіз наукових публікацій останніх років свідчить про стійкий тренд переходу від традиційних періодичних методів інспектування до систем безперервного моніторингу в реальному часі.

Традиційні методи неруйнівного контролю (NDT), такі як ультразвуковий і вихрострумний контроль, продовжують вдосконалювати. Останні дослідження зосереджені на підвищенні точності та швидкості інспекції за допомогою нових типів датчиків, таких як фазовані антенні решітки в ультразвукових системах (PAUT) і техніка вимірювання поля змінного струму (ACFM) як альтернатива магнітопорошковому контролю [3]. Однак, незважаючи на ці вдосконалення, фундаментальна проблема періодичності таких перевірок залишається нерозв'язаною, що не дає змогу виявляти дефекти, які виникають між інспекціями.

Також значну увагу приділяють волоконно-оптичним сенсорам (FOS), які розглядають як технологію, здатну здійснити парадигмальний зсув у моніторингу. В оглядовій статті [4] підтверджено, що FOS є потужним інструментом для моніторингу залізничних систем завдяки їхній стійкості до електромагнітних завад, довговічності та можливості розподілених вимірювань.

Особливе місце серед FOS-технологій займає розподілене акустичне зондування (DAS). Дослідження останніх п'яти років демонструють його високий потенціал для вирішення широкого спектра завдань. У дослідженні [5] наведено результати польових випробувань в Австрії, які підтверджують, що DAS здатна ефективно виявляти розриви рейок, аналізуючи вібраційні сигнатури від проїжджаючого поїзда, але не перед ним.

Однак впровадження DAS створює нову проблему. У роботі [6] показано, що технологія генерує величезні обсяги складних, зашумлених даних, ручний аналіз яких неможливий. Це визначило наступний напрям досліджень – застосування штучного інтелекту (ШІ) і машинного навчання (МН) для автоматичної інтерпретації даних. Дослідження [7] демонструє високу ефективність гібридної моделі на основі МН точності в класифікації таких подій, як камінепади та падіння дерев, за даними DAS.

Отже, аналіз публікацій показує, що наукова спільнота активно працює над застосуванням DAS і ШІ для моніторингу стану елементів залізниць. Проте більшість існуючих досліджень зосереджені на

вирішенні конкретних прикладних завдань, таких як виявлення сторонніх вторгнень або відстеження поїздів. Невирішеною частиною загальної проблеми залишається глибоке розуміння фундаментальних фізичних принципів, що лежать в основі взаємодії поїзд-колія-дефект і її прояву у вібраційних даних, отриманих за допомогою DAS. Стаття присвячена цій невирішеній частині – аналізу фізики поширення пружних хвиль у рейках і їхньої модуляції дефектами для створення саме проактивної, а не просто реактивної системи моніторингу.

Мета дослідження

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розроблення фундаментальних принципів для створення проактивної системи моніторингу цілісності залізничних рейок, що базовано на технології розподіленого акустичного зондування. Дослідження спрямоване на доведення можливості виявлення дефектів колії, аналізуючи вібраційні хвилі, що поширюються рейкою попереду рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести критичний аналіз існуючих методів інспектування залізничної інфраструктури, виявити їхні фундаментальні обмеження та обґрунтувати необхідність переходу до проактивної парадигми моніторингу;
- описати фізичні принципи та переваги волоконно-оптичних сенсорів, зокрема технології розподіленого акустичного зондування, як основного інструменту для розв'язання поставленої проблеми;
- дослідити фізику генерації та поширення пружних хвиль у системі «рейка-шпала-баласт» за дією рухомого складу, включаючи аналіз типів хвиль і закономірностей їхнього згасання;
- сформулювати теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «із випередженням», визначивши фізичний компроміс між дальністю і деталізацією моніторингу.

Основна частина дослідження

1. Критичний огляд традиційних парадигм інспектування

Існуючі методи контролю, незважаючи на десятиліття вдосконалень, мають фундаментальні обмеження, які роблять їх недостатньо ефективними для сучасних вимог. Їхній головний недолік полягає в тому, що вони є переважно реактивними або періодичними, залишаючи небезпечні «сліпі зони» в часі, протягом яких можуть виникати і розвиватися критичні дефекти до моменту їх виявлення.

Фундаментальним методом контролю залишається візуальний огляд, виконуваний кваліфікованим персоналом. Інспектори шукають видимі дефекти, такі як тріщини, знос, пошкодження кріплень і просідання баласту [8]. Однак цей підхід є вкрай суб'єктивним і значною мірою залежить від досвіду, кваліфікації та пильності конкретного інспектора, а також зовнішніх умов, як-от погода та

освітлення. Для сучасних розгалужених залізничних мереж, що простягаються на тисячі кілометрів, часто через важкодоступну місцевість такий метод є логістично нестійким через високі витрати, значні трудові ресурси та небезпеку для самого персоналу [9].

Для об'єктивнішого оцінювання стану рейок застосовують інструментальні неруйнівні методи контролю (NDT), які допомагають виявляти приховані дефекти.

Метод ультразвукового контролю (УЗК) є ефективним для виявлення глибоких внутрішніх дефектів, таких як тріщини втоми. Однак потрібні висококваліфіковані оператори для інтерпретації сигналів, ретельної підготовки поверхні рейки, бо цей метод може бути «засліплений» поверхневими дефектами, які перешкоджають проникненню ультразвуку.

Вихрострумний контроль (ВСК) прийнятний для виявлення поверхневих і неглибоких підповерхневих дефектів у провідних матеріалах, але його глибина проникнення обмежена, а результати можуть залежати від геометрії рейки.

Магнітопорошковий контроль (МПК) високоточний для поверхневих тріщин у феромагнітних сталях, але потребує прямого контакту з рейкою і не виявляє внутрішніх пошкоджень.

Інші методи (радіографічний, капілярний) через високу вартість, вимоги щодо безпеки та низьку швидкість не прийнятні для широкомасштабного та безперервного моніторингу мережі [8].

Спільним і головним недоліком усіх методів NDT є їхня періодичність. Їх зазвичай застосовують за допомогою спеціалізованих, повільних дефектоскопних вагонів, що створює значні проміжки часу між перевірками, протягом яких дефект може досягти критичних розмірів.

Системи залізничної автоматики призначені в першу чергу для контролю руху, але і традиційно виконували вторинну функцію виявлення деяких типів пошкоджень колії. Основними такими елементами є рейкові кола та лічильники осей. Основною функцією рейкових кіл є виявлення поїздом замикання електричного кола через колісні пари. Повний розрив рейки також розриває це коло,

що система може інтерпретувати як зайнятість ділянки, створюючи «відмовостійкий» сигнал. Однак ця здатність є ненадійною. Рейкові кола вразливі до електромагнітних завад (ЕМІ), поганого стану баласту, затоплення та, що найважливіше, поганого електричного контакту (шунтування) через іржу, листя або мастило на рейках. Системи лічення, що побудовані на основі лічильників осей, є більш сучасними та надійними для виявлення поїздів, оскільки менш чутливі до стану рейок і баласту. Вони просто рахують кількість колісних пар, що в'їжджають і виїжджають із ділянки. Однак вони мають фундаментальний недолік – лічильники осей абсолютно нездатні виявляти обриви рейок, що створює серйозну прогалину в безпеці [10].

Отже, у процесі модернізації залізничної інфраструктури виникає критична «прогалина безпеки». Перехід від старих рейкових кіл до більш надійних лічильників осей (наприклад у рамках впровадження систем ETCS) ненавмисно усуває вторинний, хоч і недосконалий, механізм виявлення обривів рейок. Це створює нагальну системну потребу в новій, спеціалізованій технології, яка б цілеспрямовано заповнила цю прогалину, забезпечуючи надійне виявлення порушень цілісності колії.

Перехід від реактивного до проактивного та предиктивного обслуговування

Аналіз традиційних методів (таблиця) показав, що вони належать до реактивної («знайшов-відремонтував») або періодичної («перевірив-запланував») парадигми. Сучасні вимоги щодо безпеки та економічної ефективності потребують переходу до проактивної та предиктивної моделі, яка дає змогу безперервно відстежувати стан інфраструктури та прогнозувати потенційні відмови ще до їх виникнення [11]. Такий підхід допомагає оптимізувати графіки ремонтів, мінімізувати простой, знизити експлуатаційні витрати і, найголовніше, запобігти аварійним ситуаціям.

Таблиця 1
Порівняльний аналіз технологій інспектування залізниць

Метод контролю	Основний об'єкт виявлення	Основні переваги	Критичні обмеження	Операційний режим	Вартість
Візуальний огляд	Видимі дефекти (великі тріщини, знос, пошкодження кріплень)	Простота, низька вартість обладнання	Суб'єктивність, трудомісткість, залежність від умов, невиявлення внутрішніх дефектів	Періодичний	Низька
Ультразвуковий контроль	Внутрішні дефекти (тріщини,	Висока чутливість до внутрішніх дефектів	Потребує спецобладнання та персоналу, повільний,	Періодичний	Висока

	порожнини)		може бути «засліплений» поверхневими дефектами		
Рейкові кола	Присутність поїзда (ненадійно), повний обрив рейки	Відмовостійка логіка для виявлення поїздів	Чутливість до ЕМІ та стану колії, помилки шунтування	Безперервний	Середня
Лічильники вісей	Присутність поїзда	Надійність у складних умовах, нечутливість до стану рейок	Нездатність виявляти обриви рейок	Безперервний	Середня
Розподілений акустичний сенсор (DAS)	Дефекти рейок, сторонні об'єкти, рух поїздів, несанкціонована діяльність	Безперервний моніторинг на великих відстанях, проактивність, багатофункціональність	Складність обробки даних, потреба в інтелектуальному аналізі	Безперервний	Низька (із використанням існуючих кабелів)

2. Волоконно-оптичні сенсори

Волоконно-оптичні сенсори (ВОС) працюють на основі аналізу змін у світловому сигналі, що поширюється через оптичне волокно, під впливом зовнішніх фізичних факторів, таких як деформація, температура або вібрація. Основою для розподілених сенсорних систем є природні явища розсіювання світла, що виникають через мікроскопічні неоднорідності в структурі скла. До них належать релєївське, бріллюєнівське та раманівське розсіювання. Аналізуючи характеристики зворотного розсіяного світла, можна з високою точністю визначити величину та місцезнаходження зовнішнього впливу вздовж усього волокна [12].

Для комплексного моніторингу залізничної інфраструктури можна використовувати різні типи ВОС, які ефективно доповнюють один одного.

Точкове зондування за допомогою волоконно-брегівських решіток (FBG)

FBG є точковими сенсорами, що являють собою ділянку волокна зі спеціально нанесеною періодичною структурою («решіткою») (рис. 1). Ця решітка відбиває світло лише на певній, чітко визначеній довжині хвилі (довжина хвилі Брега). Ця довжина хвилі змінюється пропорційно до механічної деформації або зміни температури. FBG ідеальні для високоточних вимірювань напружень у критично важливих точках інфраструктури, таких як мости, стрілочні переводи або зварні стики [12].



Рис. 1. Принцип роботи волоконного сенсора на основі решітки Брега

Розподілене температурне зондування (DTS)

Системи DTS використовують раманівське розсіювання, інтенсивність якого залежить від температури. Це дає змогу створювати безперервну

температурну карту вздовж усього кабелю, що є надзвичайно корисним для виявлення перегрівів, пожеж у тунелях, на станціях або в силових кабельних лініях.

Розподілене акустичне зондування (DAS)

Технологія DAS перетворює стандартний одномодовий телекомунікаційний кабель на суцільний масив із тисяч віртуальних мікрофонів або вібродатчиків (рис. 2). Принцип роботи базований на фазочутливій оптичній рефлектометрії в часовій області (Ф-OTDR). Високотехнологічний пристрій, що називають опитувачем (interrogator), посилає в оптоволокну когерентні лазерні імпульси та аналізує релєйське зворотне розсіювання. Будь-яка акустична або вібраційна хвиля, що діє на кабель (наприклад від руху поїзда, копання або деформації ґрунту), викликає мікроскопічні зміни у волокні. Ці зміни модулюють фазу розсіяного світла. Аналізуючи ці фазові зсуви та час повернення сигналу, система може з високою точністю виявити, класифікувати і локалізувати джерело вібрації. Головною перевагою DAS є здатність контролювати величезні відстані (до

100 км і більше) з одного опитувального блока, забезпечуючи безперервний моніторинг у реальному часі [13].

Застосування ВОС у залізничній галузі відкриває можливість для безперервного структурного моніторингу. Такі системи допомагають виявляти ледь помітні зміни в напружено-деформованому стані колії, що можуть свідчити про розвиток тріщин, просідання баласту чи ризик викривлення колії. Вони також ефективні для моніторингу природних небезпек, як-от зсуви ґрунту, фіксуючи вібрації, що передують катастрофічним подіям.

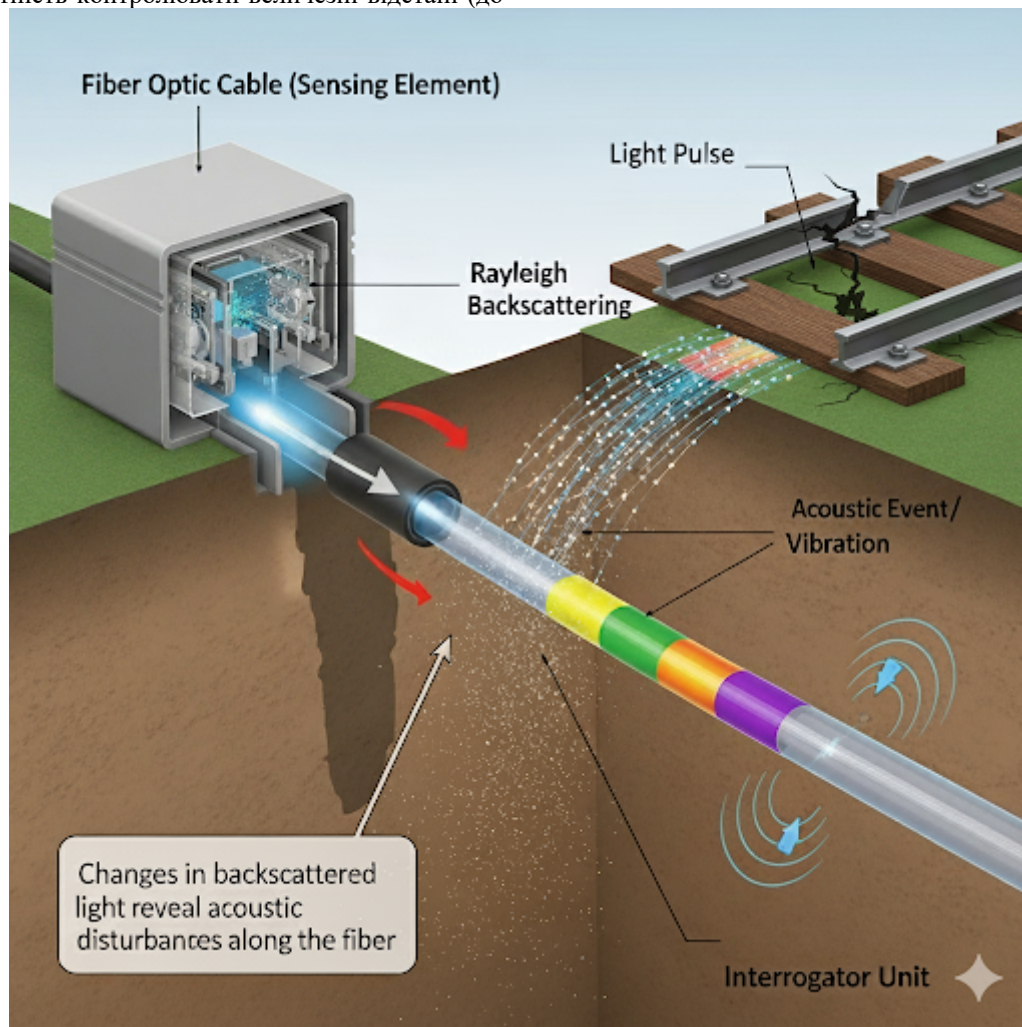


Рис. 2. Принцип роботи акустичного сенсора DAS

Волоконно-оптичні сенсори мають унікальні властивості, що роблять їх ідеальними для використання на залізницях.

Головною перевагою всіх волоконно-оптичних систем є їхня повна нечутливість до електромагнітних завад (ЕМІ). Оскільки сенсором є

діелектричне скляне волокно, а сигналом – світло, системи ВОС повністю несприйнятливі до електромагнітних полів від контактної мережі, силових кабелів і двигунів локомотивів. Це є вирішальною перевагою порівняно з будь-якими електронними датчиками.

Здатність DAS контролювати десятки кілометрів колії з метровою роздільною здатністю з однієї точки підключення є революційною для широкомасштабного моніторингу [12].

Найбільш значуща перевага полягає в можливості використання існуючих телекомунікаційних волоконно-оптичних кабелів, які вже прокладені вздовж більшості залізничних магістралей. Це радикально знижує вартість розгортання системи. Пасивна природа самого волокна забезпечує тривалий термін служби та мінімальні вимоги щодо обслуговування.

Технологія DAS пропонує не просто новий тип сенсора, а нову парадигму зондування. Замість розгортання тисяч окремих датчиків, кожен із яких потребує живлення, передавання даних та обслуговування, DAS дає змогу «активувати» уже існуючу пасивну інфраструктуру – телекомунікаційні кабелі. Один опитувальний блок, підключений до кінця такого кабелю, миттєво перетворює десятки кілометрів пасивного скла на щільну сенсорну мережу з тисячами віртуальних датчиків [14]. Цей перехід від «розгортання сенсорів» до «активації інфраструктури» є фундаментальним зрушенням, що робить економічно доцільним щільний, безперервний моніторинг усієї залізничної мережі.

3. Фізика вібрацій, що генеровані поїздом, і поширення хвиль у рейках

Основним джерелом вібрацій є динамічна взаємодія між колесами та рейками. Ця взаємодія як генерує вібрації під час нормального кочення через мікронерівності поверхонь, так і, що більш важливо, створює виразні, високоенергетичні перехідні процеси за наявності дефектів, таких як «повзуні» на колесах, тріщини, нерівності на зварних швах або стиках рейок. Додатковими, менш значущими, джерелами є силові установки та гальмівні системи поїзда.

Порівняльний аналіз вібраційних спектрів

Різні типи поїздів генерують вібраційні «сигнатури» з різними характеристиками, що є важливим для налаштування алгоритмів виявлення. Вантажні поїзди мають великі навантаження на вісь і відносно низькі швидкості. Це призводить до генерації потужних, низькочастотних вібрацій, які завдяки низькому коефіцієнту згасання можуть поширюватися на значні відстані вздовж рейки. Пасажирські та високошвидкісні поїзди мають менші навантаження на вісь, але значно вищі швидкості. Вони створюють вібрації з ширшим спектром, що включає значні високочастотні компоненти. Ці високочастотні коливання несуть детальну інформацію, але згасають значно швидше.

Динаміка поширення хвиль у системі рейка-шпала-баласт

Вібрації поширюються вздовж рейки у вигляді пружних хвиль. Розуміння їхньої поведінки є основним для інтерпретації даних. У рейці одночасно

поширено кілька типів хвиль, кожна з яких несе різну інформацію:

– поздовжні хвилі (Р-хвилі) – хвилі стиснення-розтягування, що є найшвидшими, швидкість їх поширення в сталі становить приблизно 5780 м/с;

– поперечні хвилі (S-хвилі) – хвилі зсуву, повільніші за поздовжні, зі швидкістю близько 3140 м/с у сталі;

– згинальні (флексуральні) хвилі виникають внаслідок вигину рейки під навантаженням і сильно залежать від жорсткості рейки та підтримки шпал.

Інтенсивність вібрації експоненційно зменшується з відстанню від джерела. Цей процес описано відомим законом експоненційного згасання

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

де I_0 – початкова інтенсивність;

x – відстань;

α — коефіцієнт згасання.

Критично важливо, що коефіцієнт згасання α сильно залежить від частоти. Ця залежність є фундаментальним фізичним обмеженням системи, що визначає компроміс між дальністю виявлення та деталізацією інформації.

Використовуючи вираз (1), можна розрахувати максимальну теоретичну відстань, на якій сигнал від поїзда може бути надійно виявлений сенсором. Ця відстань залежить від початкової потужності сигналу (P_0), чутливості сенсора (P_{sensor}) і коефіцієнта згасання (α). Максимальну відстань виявлення (L_{max}) визначають як

$$L_{\text{max}} \leq \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{P_0}{P_{\text{sensor}}}\right).$$

Наприклад, для низькочастотних вібрацій вантажного поїзда (із $\alpha \approx 0.0005$ 1/м) сигнал може поширитися на відстань до 9.21 км, перш ніж його інтенсивність впаде до 1 % початкової. Для високочастотних вібрацій пасажирського поїзда (із $\alpha \approx 0.002$ 1/м) ця відстань становить лише близько 2.3 км.

4. Теоретична основа для проактивного виявлення «із випередженням»

Синтез вищезазначених пунктів формулює центральну гіпотезу дослідження: сталева рейка діє як хвилевід, по якому вібрації, що генеровані поїздом, поширюються вперед на значну відстань. Аналізуючи ці вібрації за допомогою системи DAS, можна діагностувати стан колії на кілька кілометрів попереду поїзда, що надає критично важливий час для реагування на загрози.

Фізика поширення хвиль накладає фундаментальний компроміс між дальністю

виявлення та його деталізацією. Низькочастотні компоненти вібрації, що генеровані великою масою поїзда, поширюються на великі відстані (понад 9 км для вантажних поїздів), що дає змогу виявляти присутність поїзда здалеку. Однак високочастотні компоненти, які несуть детальну інформацію про гострі, короткочасні події, такі як удар колеса об мікротріщину, загасають набагато швидше (у межах 1-2 км). Це означає, що система має багаторівневу здатність до виявлення: дальня зона для виявлення присутності та великих перешкод, середня зона для виявлення значних розривів і ближня зона для діагностики дрібних дефектів.

Висновки

Проведене дослідження обґрунтовує фундаментальні принципи для створення проактивної системи моніторингу цілісності рейок на основі технології розподіленого акустичного зондування (DAS), що заповнює існуючу наукову прогалину. Доведено, що сучасні методи контролю є реактивними і створюють небезпечні «сліпі зони» між перевірками, а модернізація сигнальних систем поглиблює «прогалину безпеки». Обґрунтовано, що DAS є оптимальним рішенням завдяки нечутливості до електромагнітних завад, можливості контролю ділянок до 100 км та економічності за рахунок використання існуючих кабелів. Досліджено фізику поширення пружних хвиль у рейці, що дало змогу встановити компроміс між дальністю (низькі частоти, > 9 км) і деталізацією (високі частоти, < 2 км) моніторингу. Сформульовано головний науковий внесок — теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «із випередженням», аналізуючи вібрації, що поширюються рейкою попереду поїзда. Це закладає теоретичну базу для переходу від реактивного реагування до предиктивного контролю. Перспективи подальших робіт включають розроблення алгоритмів машинного навчання для аналізу даних і проведення польових випробувань для валідації моделі.

Список використаних джерел

1. Xiong L., Jing G., Wang J., Liu X., Zhang Y. Detection of Rail Defects Using NDT Methods. *Sensors (Basel)*. 2023 May. 10;23(10):4627. doi: 10.3390/s23104627. PMID: 37430540; PMCID: PMC10220630.
2. Yu Qian. Intelligent railroad inspection and monitoring. *Front. Built Environ.*, 12 April 2024 Sec. *Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fbuilt.2024.1389092>.
3. Rail Testing - Non-Destructive Testing for Railways — Eddyfi. URL: <https://www.eddyfi.com/en/application/railway-testing>.
4. Sasy Chan Y. W., Wang H.-P., Xiang P. Optical Fiber Sensors for Monitoring Railway Infrastructures: A Review towards Smart

- Concept. *Symmetry*. 2021. 13. 2251. <https://doi.org/10.3390/sym13122251>.
5. Wagner A., Nash A., Michelberger F., Grossberger H., Lancaster G. The Effectiveness of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Broken Rail Detection. *Energies*. 2023. 16. 522. <https://doi.org/10.3390/en16010522>.
 6. Md Arifur Rahman, Hossein Taheri, Fadwa Dababneh. A review of distributed acoustic sensing applications for railroad condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 15 February 2024. Vol. 208. 110983. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110983>.
 7. Wu D., Liang Q.-Q., Hu B.-X., Zhang Z.-T., Wang X.-F., Jiang J.-J., Yi G.-W., Zeng H.-Y., Hu J.-Y., Yu Y. et al. Research Progress of Event Intelligent Perception Based on DAS. *Sensors*. 2025. 25. 5052. <https://doi.org/10.3390/s25165052>.
 8. Essential Guide to Railway Track Inspection - FlyPix AI. URL: <https://flypix.ai/blog/railway-track-inspection/> (дата звернення: 01.09.2025).
 9. Gong W., Akbar M. F., Jawad G. N., Mohamed M. F. P., Wahab M. N. A. Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*. 2022. 12. 1790. <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>.
 10. Автоматизовані системи керування рухом поїздів на станціях : навч. посіб. / В. І. Мойсеєнко, В. О. Сотник, С. О. Змій, О. В. Щєбликіна. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 184 с.
 11. Railway Defect Detection Methods | ADORTEch. URL: <https://adortech.com/blog/railway-defect-detection-methods-part1> (дата звернення: 01.09.2025).
 12. Castillo-Mingorance J. M., Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C. A Critical Review of Sensors for the Continuous Monitoring of Smart and Sustainable Railway Infrastructures. *Sustainability*. 2020. 12. 9428. <https://doi.org/10.3390/su12229428>.
 13. Du T. L., Hartog A., Hilton G., Didelet R. An Analysis of Railway Activity Using Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing. *Sensors*. 2025. 25. 4180. <https://doi.org/10.3390/s25134180>.
 14. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A., Wuilpart M., Korobko D. A., Zhirnov A. A., Stepanov K. V., Turov A. T., Konstantinov Y. A., Lobach I. A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective. *Sensors*. 2022. 22. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>.
- FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF PROACTIVE RAIL MONITORING USING FIBRE OPTIC SENSORS**
second-level higher education student, Ukrainian State University of Railway Transport M. V. Kanevskyy, candidate of Technical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport S. O. Zmii, D. S. Kanevskyy

Abstract. *This research is dedicated to the development and theoretical substantiation of the fundamental principles for creating a proactive system for monitoring the integrity of railway rails based on Distributed Acoustic Sensing (DAS) technology. The study addresses the critical shortcomings of existing inspection methods, which are predominantly reactive or periodic, leading to dangerous «blind spots» in time during which critical defects can emerge and develop unnoticed. A key issue highlighted is the systemic «safety gap» arising from the modernization of signaling systems, where the replacement of traditional track circuits with more reliable axle counters inadvertently eliminates a secondary, albeit imperfect, mechanism for detecting complete rail breaks. The paper substantiates that DAS is the optimal technological solution to fill this gap. Its key advantages are analyzed in detail: complete immunity to electromagnetic interference (EMI) from power lines and traction motors, the ability to monitor vast track sections (up to 100 km) from a single interrogator unit, and significant economic efficiency achieved by leveraging existing telecommunication fiber-optic cables already laid along most railway lines. This approach signifies a paradigm shift from «deploying sensors» to «activating infrastructure». The physics of the generation and propagation of elastic waves in the «rail-sleeper-ballast» system under the influence of rolling stock is thoroughly investigated. It is established that the rail acts as an effective waveguide for longitudinal, transverse, and flexural waves. A crucial finding is the strong frequency dependence of the attenuation coefficient, which defines a fundamental trade-off between the range and detail of monitoring. Low-frequency components propagate over long distances (> 9 km), enabling early train detection, while high-frequency components, which carry detailed diagnostic information about localized defects, attenuate rapidly (< 2.3 km). The main scientific contribution of this work is the formulation of a theoretical basis for proactive, «look-ahead» defect detection. The central hypothesis is that a moving train can be considered a mobile source of acoustic energy, and by analyzing the vibrational waves propagating ahead of it, it is possible to diagnose the condition of the track several kilometers in advance, providing critical time to respond to threats. This moves the state of the art from reactive analysis of past events to the pre-emptive identification of hazards. Future research directions are outlined, emphasizing the need for advanced machine learning algorithms for real-time data analysis and extensive field trials to validate the theoretical model.*

Keywords: *railway rails, monitoring, distributed acoustic sensing, DAS, fiber optic sensors, proactive detection, track integrity, elastic waves, traffic safety.*

Maksym Kanevskiy, second-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0007-6284-0311>.

Serhii Zmii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

David Kanevskyy, student of Ardrey Kell High School, Charlotte, USA. E-mail: tarassekanev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0005-7461-337>

ЗАЛАТА А. С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення структурної схеми та бази правил нейро-нечіткої системи керування дизель-генераторною установкою



Анотація. У статті подано комп'ютерну модель інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою, реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink. Описано формування структурної схеми, що поєднує фізичні моделі силових підсистем і модулі нейро-нечіткого керування. Особливу увагу приділено побудові бази правил, створеної на основі кластеризації Fuzzy C-Means і подальшого нейронного навчання, що забезпечує адаптацію системи до зміни маси поїзда, профілю колії та довжини ділянки руху. Продemonстровано аналітичні залежності керувального коефіцієнта для різних експлуатаційних умов і показано здатність моделі прогнозувати оптимальні керувальні дії в режимі реального часу. Результати підтверджують ефективність поєднання нечіткої логіки та машинного навчання в системах керування дизель-генераторними установками.

Ключові слова: дизель-генераторна установка, інтелектуальне керування, нейро-нечіткі системи, машинне навчання, автономний рухомий склад.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах експлуатації дизель-генераторних установок необхідно підвищити енергоефективність, екологічну стабільність і адаптивність режимів роботи силових агрегатів за значної варіативності зовнішніх умов. Традиційні системи керування не забезпечують достатнього рівня адаптації до зміни профілю колії, маси поїзда і довжини ділянки руху, що призводить до підвищених витрат пального, нестабільності параметрів і погіршення динамічних характеристик. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні інтелектуальної системи керування, здатної інтегрувати методи штучного інтелекту і забезпечувати оптимізацію керуючих впливів у режимі реального часу. Реалізація такої системи потребує формування комп'ютерної моделі, що відображає фізичні процеси роботи дизель-генераторної установки та містить адаптивні модулі нейро-нечіткого керування. Саме тому актуальним завданням є побудова моделі інтелектуальної системи керування в середовищі Simulink із подальшою її перевіркою.

Аналіз останніх досліджень.

У науковій літературі питання підвищення ефективності керування дизель-генераторними установками розглядають у контексті вдосконалення алгоритмів регулювання подачі пального, збудження генератора і адаптивного налаштування режимів роботи [1 – 3].

Значну увагу приділяють застосуванню математичних моделей, що описують динаміку дизельного двигуна, моделі електричних машин змінного струму і теплових процесів системи охолодження [4, 5]. У дослідженнях також простежують тенденцію щодо активного використання технологій штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж і нечітких систем, які допомагають реалізувати нелінійні закони регулювання та забезпечувати адаптивність до змінних умов навантаження [6 – 8].

Методологія нейро-нечітких систем, наведена в роботах, що стосуються ANFIS-архітектури, визначає можливості комбінування експертних правил із механізмами машинного навчання для підвищення точності моделі [9]. У низці публікацій розглянуто використання еволюційних алгоритмів, таких як оптимізація рою частинок, для налаштування параметрів нечітких множин і вагових коефіцієнтів [10].

Незважаючи на наявні дослідження, проблема інтеграції фізичних моделей дизель-генераторної установки з інтелектуальними регуляторами в єдиному середовищі моделювання залишається недостатньо розкритою, особливо щодо побудови повної структурної схеми та відпрацювання взаємодії між модулями керування в Simulink [11]. Це формує підґрунтя для подальшого розроблення комплексної моделі, у межах якої реалізовано адаптивні алгоритми прогнозування і регулювання робочих параметрів.

Виділення невирішених питань. Незважаючи на значний обсяг досліджень, спрямованих на підвищення ефективності керування дизель-генераторними установками, низка аспектів залишається невирішеною. Насамперед це

стосується створення єдиної інтегрованої моделі, у якій фізичні процеси та інтелектуальні регулятори взаємодіють у режимі реального часу та забезпечують динамічну адаптацію до змін зовнішніх умов.

В опублікованих роботах часто розглядають локальні задачі, такі як оптимізація певного вузла або формування окремого регулятора, проте відсутні комплексні моделі, що охоплюють повний цикл роботи дизель-генераторної установки. Недостатньо розробленими залишаються алгоритми узгодження різних частот дискретизації в багаторівневих системах керування, а також механізми інтеграції модулів оптимізації, зокрема модифікованого алгоритму рою частинок, з нейро-нечіткими регуляторами.

Також не повністю вирішено питання побудови універсальної бази правил, яка б забезпечувала коректну роботу системи для широкого діапазону експлуатаційних параметрів, таких як профіль колії, маса поїзда і довжина маршруту. У наявних дослідженнях бракує моделей, здатних забезпечити безперервний перехід від дискретних значень бази даних до аналітичних залежностей, що застосовувані для фазифікації та дефазифікації в нечітких системах.

Усе це потребує створення узагальненої комп'ютерної моделі інтелектуальної системи керування, здатної поєднати фізичну динаміку дизель-генераторної установки, інтелектуальні модулі прогнозування та оптимізаційні механізми в єдиному середовищі Simulink.

Постановка задачі дослідження.

Метою статті є розроблення, реалізація та валідація комп'ютерної моделі інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою в середовищі MATLAB/Simulink із використанням нейро-нечітких методів та оптимізаційних алгоритмів.

У межах сформульованої мети необхідно відтворити фізичну архітектуру дизель-генераторної установки з урахуванням динамічних, теплових та електромагнітних процесів, створити інтегровані підсистеми

інтелектуального керування, сформувати універсальну базу правил і забезпечити її використання для адаптивного регулювання вхідних параметрів.

Завдання полягає також у побудові структурної схеми, що дає змогу моделювати взаємодію між сенсорними вузлами, нейро-нечіткими регуляторами, оптимізаційними модулями та виконавчими механізмами. Особливу увагу приділено синхронізації процесів у межах єдиної частоти дискретизації та забезпеченню можливості віртуальних випробувань, які дають змогу оцінити ефективність запропонованих алгоритмів керування в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Реалізація зазначених завдань спрямована на створення універсальної та адаптивної системи, здатної підвищувати енергоефективність, стабільність і екологічні показники роботи дизель-генераторної установки.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для побудови моделі інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою в середовищі Simulink було створено структурну основу, що відтворює реальну фізичну архітектуру силового комплексу. У межах базового рівня були реалізовані моделі дизельного двигуна, системи наддуву, охолодження, підсистеми впорскування палива, генератора змінного струму та навантажувального модуля. Для забезпечення адекватного відображення процесів кожний елемент формували на основі фізично коректних математичних залежностей, що описують нелінійну динаміку відповідних підсистем. Модель дизельного двигуна охопила зміну тиску в камері згорання залежно від циклової подачі пального та значення наддуву, інерційні властивості колінчастого вала, теплові втрати і часову динаміку вихлопних газів. Модель електрогенератора відтворювала електромагнітні процеси у статорі та роторі, зміну вихідної напруги за дії струму збудження та навантаження, а також теплові характеристики, що визначають зміну параметрів у динаміці.

На цьому етапі сформовано структурну схему системи керування (рис. 1), у межах якої передбачено включення нейро-нечіткого модуля, датчиків стану та підсистеми зворотних зв'язків.

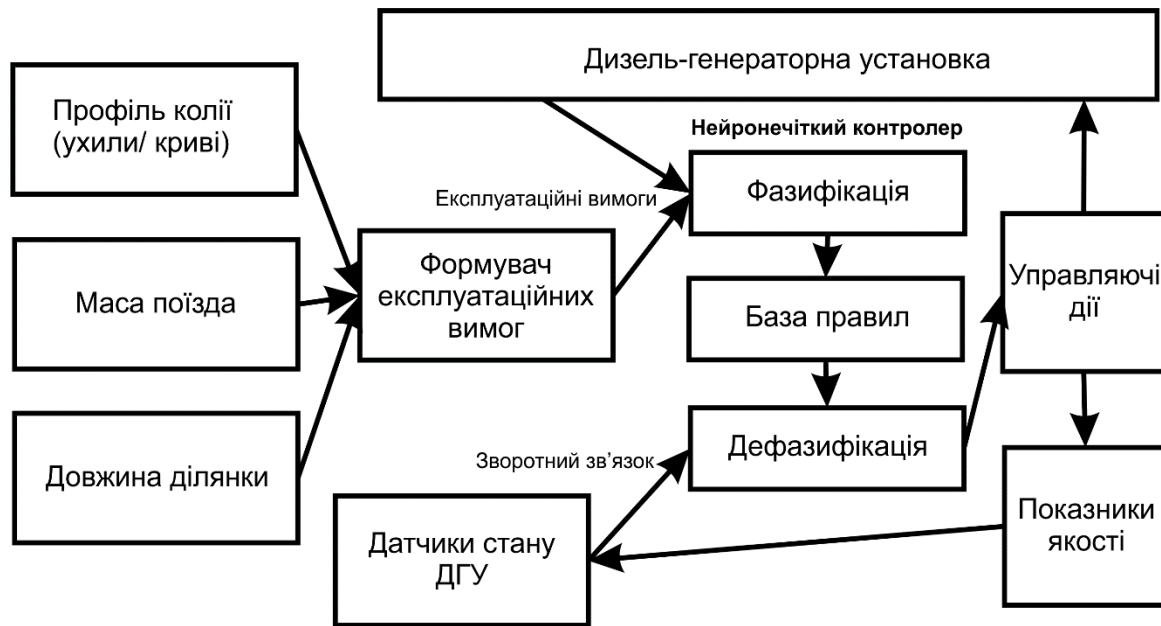


Рис. 1. Структурна схема нейро-нечіткої системи керування ДГУ з урахуванням вхідних умов

На рисунку показано узагальнену структурну схему інтелектуальної нейро-нечіткої системи керування дизель-генераторною установкою, яка забезпечує адаптивне формування керувальних дій залежно від зовнішніх і внутрішніх параметрів роботи енергетичного комплексу. Схема демонструє логічні взаємозв'язки між блоками, що беруть участь у процесі ухвалення рішень, і відображає взаємодію між експлуатаційними умовами руху, вимірювальними підсистемами та нейро-нечітким контролером, відповідальним за обчислення оптимальних сигналів керування.

Зліва відображено три основні зовнішні параметри, які визначають умови експлуатації дизель-генераторної установки. До них належать профіль колії, що включає ухили та криві; маса поїзда, яка впливає на тягове навантаження; довжина ділянки руху, що визначає тривалість дії конкретного режиму. Ці параметри є вхідними змінними верхнього рівня та визначають характер режиму роботи силового агрегату. Вони надходять до формувача експлуатаційних вимог, який виконує перетворення зовнішніх техніко-експлуатаційних умов у стандартизовану форму, придатну для дальшої обробки нейро-нечітким контролером.

Формувач експлуатаційних вимог забезпечує створення множини параметрів, які відображають необхідний режим роботи дизель-генераторної установки. До таких параметрів може належати бажана зміна потужності, допустимі межі навантаження, вимоги щодо стабільності частоти обертання вала та інші характеристики, що впливають на якість функціонування дизель-генераторної установки. Сформовані експлуатаційні вимоги

надходять до нейро-нечіткого контролера, що складається з трьох базових елементів: фазифікації, бази правил і дефазифікації.

Процес фазифікації передбачає перетворення числових експлуатаційних вимог у нечіткі змінні на основі функцій належності. У межах цього етапу відбувається подання реальних значень у формі нечітких термів, що забезпечує можливість подальшої інтерпретації інформації за допомогою логічних правил. База правил виконує логічні операції відповідно до закладеної в систему бази знань, яка сформована за допомогою кластеризації даних і корегована в процесі навчання нейронної складової. Кожне правило описує залежність між умовами руху та бажаною керувальною дією, що забезпечує можливість адаптивного регулювання в умовах невизначеності.

На етапі дефазифікації нечіткі результати логічного висновку перетворені на конкретні числові керувальні дії для відповідних виконавчих механізмів дизель-генераторної установки. До таких дій можуть належати корекція подачі пального, зміна струму збудження генератора, регулювання частоти обертання та інші впливи, що безпосередньо визначають стан енергетичного агрегату.

У нижній частині рисунка наведено блок датчиків стану дизель-генераторної установки, які забезпечують зворотний зв'язок. Вони вимірюють основні параметри, такі як температура, тиск, частота обертання, електричні навантаження та інші показники, що формують оцінку якості керування. Показники якості надходять до нейро-нечіткого контролера, забезпечуючи можливість корекції дій, а також до формувача експлуатаційних вимог, що дає змогу адаптувати систему для змінних умов руху.

Подана структурна схема демонструє повний цикл взаємодії між зовнішніми експлуатаційними умовами, внутрішнім станом дизель-генераторної установки та нейро-нечітким контролером, який забезпечує адаптивне формування керувальних сигналів для підтримання оптимального режиму роботи енергетичного комплексу.

Створена структура забезпечує базу для наступної інтеграції інтелектуальних компонентів і формування механізмів адаптивного керування дизель-генераторною установкою у змінних експлуатаційних умовах.

Після формування фізичної моделі дизель-генераторної установки наступним етапом стало інтегрування до неї інтелектуальних модулів керування. Для реалізації нейро-нечітких регуляторів були використані засоби бібліотек Neural Network Toolbox і Fuzzy Logic Toolbox, які забезпечують можливість поєднання механізмів машинного навчання з експертними правилами. Кожен регулятор реалізований як автономний підсистемний блок, що містить рівні фазифікації, нормалізації, бази знань і дефазифікації. Механізм побудови регуляторів ґрунтований на принципах архітектури ANFIS, яка забезпечує формування гібридної системи, здатної адаптуватися до змін зовнішніх параметрів і корегувати керувальні дії відповідно до поточного стану установки.

На основі побудованої нейро-нечіткої системи було виконано формування та подальший аналіз бази правил (рис. 2), яка відображає залежність між масою поїзда, профілем колії та довжиною ділянки руху. На рисунку подано узагальнене зображення цієї бази правил для трьох характерних довжин ділянок, а саме 100, 200 і 300 км. Кожна

матриця демонструє зміну відносного приросту керувального коефіцієнта ΔP у відсотковому вираженні залежно від поєднання факторів, що визначають експлуатаційні умови роботи дизель-генераторної установки. У межах такого зображення база правил набуває інтерпретованої форми, що дає змогу оцінити характер впливу окремих параметрів на формування оптимальних керувальних дій.

Для ділянки довжиною 100 км спостерігають чітку тенденцію зростання керувального коефіцієнта на підйомах і відповідного його зменшення під час руху на спусках. Так, для поїзда масою 1000 т зміна ΔP становить від -6 % на спуску до +6 % на підйомі, що свідчить про потребу збільшення потужності в умовах зростаючого опору та, навпаки, її зменшення з рухом ухилом. Для маси 3000 т характер змін збережений, однак амплітуда варіювання зростає, що обумовлено збільшенням впливу маси на тягове навантаження. Отримані залежності відображають здатність моделі коректно враховувати співвідношення між масою та профілем колії в межах коротких ділянок руху.

Для довжини ділянки 200 км структура бази правил зберігає загальні закономірності, однак зміни показників ΔP стають більш вираженими. Це свідчить про накопичувальний ефект профілю колії зі збільшенням довжини маршруту, коли регулятор враховує не лише миттєві параметри, а й їхній інтегральний вплив на навантаження дизель-генераторної установки. Так, для маси 3000 т із рухом на підйомі приріст становить до +11 %, а на спуску значення досягає -11 %, що відображає більш суворі вимоги щодо компенсації зміни тягового режиму.

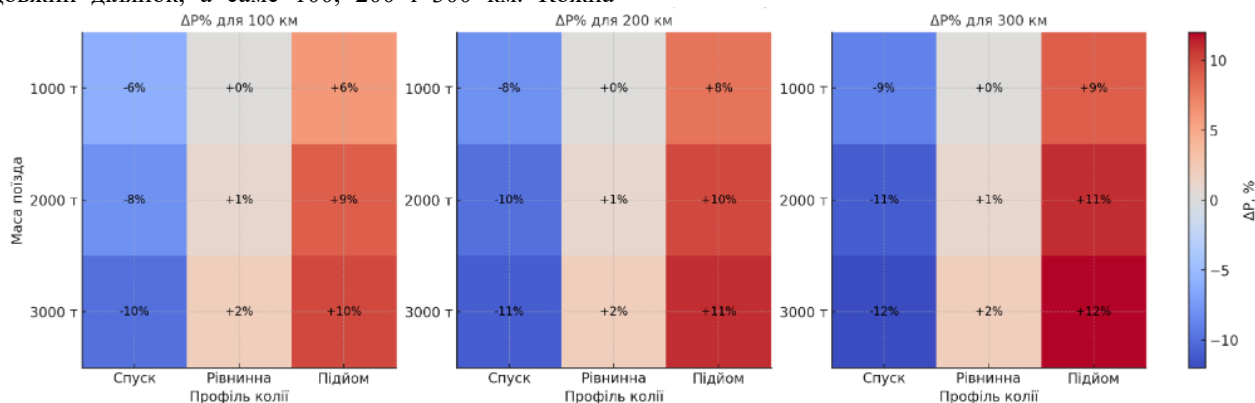


Рис. 2. База правил корекції потужності ДГУ

Для ділянки 300 км відмічено подальше посилення асиметрії між режимами підйому та спуску. Значення ΔP для максимальної маси поїзда досягають +12 % і -12 % відповідно, що пов'язано зі збільшенням енергетичних втрат за тривалого руху у складних умовах профілю колії. Така поведінка свідчить про те, що нейро-нечітка система не лише адаптує керування під параметри маси поїзда та

профілю колії, а й враховує їхню інтегральну дію на всій довжині ділянок. Усі три матриці демонструють структурну узгодженість і логічну завершеність бази правил, що підтверджує коректність її побудови за допомогою FCM-кластеризації та подальшого нейронного навчання.

Подана база правил є основою для формування адаптивних керувальних дій, оскільки вона забезпечує чітке відображення залежностей між

зовнішніми факторами та оптимальними значеннями керувального впливу. Наявність узгоджених закономірностей для різних довжин ділянок свідчить про здатність моделі забезпечувати стабільність і передбачуваність роботи дизель-генераторної установки в разі впливу широкого спектра експлуатаційних умов. Отже, результати аналізу підтверджують валідність побудованої **нейро-нечіткої** системи та її здатність до адекватного узагальнення вхідних даних, що є необхідною умовою для практичного застосування в адаптивних системах керування тяговими енергетичними установками.

На етапі навчання формували набір даних, що включав вхідні параметри, такі як навантаження на колінчастому валу, тиск наддуву, температура охолоджувальної рідини, і відповідні керувальні впливи. Вхідні дані підлягали нормалізації для уникнення дисбалансу масштабів сигналів і підвищення ефективності навчання. На основі методів кластеризації, зокрема алгоритму Fuzzy C-Means, визначали початкові функції належності та кількість правил, після чого виконано процес навчання з використанням комбінованих методів зворотного поширення помилки і градієнтного спуску.

Отже, забезпечено створення адаптивного регулятора, який формує оптимальні керувальні дії, виходячи з даних датчиків і визначених експлуатаційних вимог.

Висновки.

Розроблена в середовищі MATLAB/Simulink модель інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою забезпечує комплексне відтворення фізичних процесів і алгоритмів адаптивного регулювання. Створена структура охоплює моделі дизельного двигуна, системи наддуву, електрогенератора, теплових підсистем, а також інтелектуальних модулів, реалізованих на основі нейро-нечіткої логіки та оптимізаційних методів. Інтеграція цих компонентів у єдине середовище дала змогу сформувати систему, здатну корегувати роботу силового агрегату відповідно до змін експлуатаційних умов, що проявляється в підвищенні енергоефективності, стабільності динамічних показників і зменшенні витрат пального.

Запропонована модель демонструє ефективність інтелектуальних методів у сферах керування дизель-генераторними установками і тяговими енергетичними комплексами загалом. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі за рахунок урахування додаткових фізичних процесів, збільшенні точності моделей згоряння та електромагнітної динаміки, інтеграції більш складних нейронних архітектур, зокрема глибинних моделей або рекурентних мереж, а також у застосуванні алгоритмів багатокритеріальної оптимізації для досягнення балансу між енергоефективністю, екологічністю і динамічною стабільністю. Подальше вдосконалення системи може

включати створення реального стенда апаратно-програмної симуляції та розроблення алгоритмів, здатних функціонувати в режимі оновлення параметрів на основі потокових даних, отриманих під час експлуатації.

Список використаних джерел

1. Fu J., Gu S., Wu L., Wang N., Lin L., Chen Z. Research on Optimization of Diesel Engine Speed Control Based on UKF-Filtered Data and PSO Fuzzy PID Control. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 3. Article 777.
2. Qin H., Wang L., Wang S., Ruan W., Jiang F. A Fuzzy Adaptive PID Coordination Control Strategy Based on Particle Swarm Optimization for Auxiliary Power Unit. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 21. Article 5311.
3. Gharib H., Gkasperis A., Svarnas P. Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Early Fault Detection in Marine Diesel Engines. *Machines*. 2024. Vol. 12, No. 6. Article 425.
4. Saadat M., Feszty D., Liem R. Energy-efficient operation of diesel–electric locomotives with fuzzy look-ahead control. *Control Engineering Practice*. 2016. Vol. 54. P. 129–142.
5. Jafari Kaleybar H., Brenna M., Li H., Zaninelli D. Fuel Cell Hybrid Locomotive with Modified Fuzzy Logic Based Energy Management System. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 14. Article 8336.
6. Horobchenko O., Hryniv A., Zaitsev S. Creation of a model of automated traction control of shunting locomotive using fuzzy logic and expert evaluation methods. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 1 (22). P. 37–48.
7. Goolak S., Shykora I., et al. Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Rolling Stock Using MATLAB/Simulink. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2647. Article 060018.
8. Jurado F., Carpio J. Neuro-fuzzy control for autonomous wind–diesel systems. *Renewable Energy*. 2002. Vol. 27, No. 3. P. 413–422.
9. Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 614 p.
10. Bose B. K. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Oxford: Butterworth–Heinemann, 1997. 711 p.
11. MathWorks. Neuro-Adaptive Learning and ANFIS – Fuzzy Logic Toolbox Documentation. MATLAB & Simulink, 2023. URL: Neuro-adaptive learning and ANFIS (дата звернення: 27.10.2025).

Development of the structural scheme and rule base of a neuro-fuzzy control system for a diesel-unit

Abstract. *This article presents the development and validation of an intelligent control model for a diesel-generator unit implemented in MATLAB/Simulink, integrating physical dynamics with adaptive neuro-fuzzy regulation. The study addresses the limitations of traditional control systems that fail to ensure sufficient adaptability under varying operational conditions such as track profile, train mass and section length. A comprehensive mathematical representation of the diesel engine, turbocharging, cooling, fuel injection and synchronous generator subsystems is constructed to reproduce nonlinear thermodynamic and electromechanical processes. On this foundation, a hybrid neuro-fuzzy controller based on ANFIS principles is introduced, combining data-driven learning with an interpretable rule base formed through Fuzzy C-Means clustering and refined via a hybrid backpropagation and gradient-descent training procedure.*

The paper analyses the resulting rule base, which captures the dependence of the corrective power coefficient on mass, gradient and route length, demonstrating stable and logically consistent behavior across 100, 200 and 300 km sections. The model ensures adaptive modification of fuel supply, excitation current and rotational speed based on sensor feedback and external requirements. Simulation results confirm the capability of the developed system to maintain energy efficiency, stabilise dynamic parameters and decrease fuel consumption under various traction scenarios. The model provides a unified computational environment for studying real-time interaction between physical processes and intelligent regulators, offering a basis for further extensions including more detailed combustion and electromagnetic models, deep neural architectures and multi-criteria optimisation frameworks. The proposed approach can serve as a foundation for advanced adaptive control of traction power systems and real-time hardware-in-the-loop implementations aimed at improving performance, ecological sustainability and operating stability of diesel-generator units.

Keywords: *diesel-generator unit, intelligent control, neuro-fuzzy systems, machine learning, autonomous rolling stock.*

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

ЄЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Розрахунок електромагнітної сумісності в задачах частотно-територіального планування мереж технологічного радіозв'язку

У роботі розглянуто комплекс питань частотно-територіального планування мереж залізничного технологічного радіозв'язку. Для розрахунків запропонована модель поширення радіохвиль на залізницях, яка дає змогу виконувати розрахунки просторового і частотного рознесення радіозасобів за виконання умов забезпечення електромагнітної сумісності. Розроблено методичку, яка може бути покладена в основу відомчої нормативної бази.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, електромагнітна сумісність, просторове і частотне рознесення радіозасобів, багатосигнальна вибірковість.

Вступ

Із частотно-територіальним плануванням необхідно забезпечити розрахунки зон обслуговування радіомереж та умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів.

Частотно-територіальний план вирішує основні питання проектування мереж у конкретних умовах організації радіозв'язку. Для планування визначають зони радіопокриття роботи мереж із заданою якістю і надійністю, частотні обмеження роботи на підходах залізничних ліній до вузлів або в прикордонних смугах, перевіряють зовнішню електромагнітну сумісність планованої системи з РЕЗ інших систем.

Планування мереж технологічного радіозв'язку істотно відрізняється від завдань частотно-територіального планування мереж стільникового радіозв'язку та регламентовано відомчими нормативними документами [1].

Розрахунок електромагнітної сумісності радіозасобів у системах рухомого радіозв'язку залишається актуальним завданням. Про це свідчать не тільки численні публікації в науково-технічній літературі, а і розроблення нових нормативних матеріалів Міжнародного союзу електрозв'язку з цих питань [2, 3]. У рекомендації ITU-R SM.337-6 запропоновано порядок розрахунку територіального і частотного рознесення для забезпечення прийнятного рівня взаємних завад. Метою рекомендації є надання методички, а не розрахунок конкретних значень.

У статті [4] розглянуто особливості визначення методу оцінювання електромагнітної сумісності на основі моделі приймача, передавача і антени з середовищем розповсюдження в локальних зонах.

Для близько розташованих джерел і рецепторів завад запропоновано використовувати коефіцієнт зв'язку між антенами як показник взаємних впливів.

У роботі [5] розглянуто методи забезпечення електромагнітної сумісності з проектуванням локальних мереж безпроводового доступу.

У роботах [6, 7] для розрахунку ЕМС запропоновано використовувати статистичну модель, яка розроблена на основі двопроменевої моделі поширення радіохвиль.

На сьогодні в матеріалах АТ «Укрзалізниця» унормовано методи розрахунку зон обслуговування радіомереж [1], у тому числі розроблені пропозиції щодо уніфікації методів розрахунку радіомереж різного призначення [8], але відсутні методички розрахунку електромагнітної сумісності радіозасобів, які є важливою складовою частотно-територіального планування.

Постановка проблеми

Розроблення методички розрахунку внутрішньосистемних завад у мережах залізничного технологічного радіозв'язку на етапах частотно-територіального планування мереж.

Основні результати

Розроблення частотно-територіального плану є завершальним етапом робочого проектування радіомереж. При цьому визначають дальність радіозв'язку, умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів і вибирають робочі частоти радіомереж.

Електромагнітна сумісність (ЕМС) радіозасобів – це здатність різних електронних пристроїв працювати без взаємних завад у єдиному електромагнітному просторі.

Проблема ЕМС виникає через небажані електромагнітні випромінювання, що створювані

радіозасобами, а також через сприйнятливості радіоприймачів до зовнішніх електромагнітних впливів.

Додатковими факторами, що впливають на проблему ЕМС, є широкий спектр використовуваних частот, висока щільність радіообладнання, недостатнє екранування, вплив індустріальних радіозавод. Це може призвести до погіршення якості та надійності зв'язку і навіть відмов критично важливих систем.

Для аналізу електромагнітної обстановки необхідно визначити вплив випромінювання заводових передавачів, закономірності поширення радіохвиль між випромінювачами та рецепторами радіозавод, характер радіозавод і умови сприйнятливості до радіозавод приймальних пристроїв.

У передавачах створюють ненавмисні завади. Випромінювання через антену, характерні для радіопередавачів, поділяють на основні та неосновні. Основне випромінювання призначене для передавання корисного сигналу. Неосновні випромінювання передавача поділяють на позасмугові, побічні та шумові.

Побічними називають коливання, що виникають у передавачі внаслідок будь-яких нелінійних процесів, крім процесу модуляції. Розрізняють п'ять видів побічних випромінювань: випромінювання на гармоніках, субгармоніках, комбінаційні, інтермодуляційні та паразитні.

За ДСТУ, побічні випромінювання не мають перевищувати 2,5 мкВ. При цьому можливе безпосереднє проникнення завод на вихід приймача внаслідок сприйнятливості приймача до заводових сигналів через побічні канали приймання. Частоти побічних каналів не нормовані, але ці фактори не мають суттєвого впливу на умови забезпечення ЕМС. Тому з частотно-територіальним плануванням необхідно насамперед урахувати потужні сигнали основного випромінювання заводових передавачів і нелінійні ефекти, які виникають у приймачах: блокування сигналів та інтермодуляційні завади.

Розрахункові методи оцінювання ЕМС необхідні для вирішення таких завдань з електромагнітної сумісності, як прогнозування електромагнітної обстановки, підготовка матеріалів на виділення та присвоєння частот, розроблення вимог щодо частотно-територіального планування, оцінювання ступеня впливу ненавмисних завод на якість функціонування РЕЗ та оцінювання ефективності заходів щодо забезпечення ЕМС.

Важливими є розрахунки на основі енергетичних характеристик мереж, які визначають умови забезпечення ЕМС. У разі використання енергетичних критеріїв оцінювання ЕМС важливим моментом є розрахунок загасання на трасі поширення радіохвиль.

У загальному вигляді напруженість поля заводового сигналу, дБ, у місці розташування антени приймача радіостанції як функція частоти f , часу t , просторового рознесення r і поляризації сигналу P може бути подана як

$$E_{23}(f, t, r, p) = E_{1M}(f, t, p) + L(f, t, r, p), \quad (1)$$

де $E_{1M}(f, t, p)$ – напруженість поля в місці розташування антени передавача, дБ;

$L(f, t, r, p)$ – функція, що визначає втрати електромагнітної енергії з її поширенням між передавачем і приймачем, дБ.

У системах залізничного технологічного радіозв'язку розрахунок внутрішньосистемної ЕМС дещо спрощений із використанням радіозасобів з орієнтацією на параметри, встановлені ДСТУ [9]. В умовах розрахунку внутрішньосистемних завод таким параметром може бути вибірковість приймача, яка визначена багатосигнальними методами відповідно до ДСТУ 4384:2003.

Для забезпечення ЕМС необхідно визначити просторове рознесення антен працюючих радіозасобів і частотне рознесення робочих каналів, координатні відстані для повторного використання робочих частот.

У роботах [6, 7] запропоновано використовувати експериментальні криві поширення радіохвиль для організації мереж залізничного радіозв'язку. На рисунку показано криві поширення радіохвиль, які відповідають двопробієвій моделі поширення та скореговані за результатами досліджень каналів залізничного радіозв'язку [10, 11].

У моделі розглядають напруженість поля як суму прямого та відбитого від землі променя, тоді результуюче поле подають як

$$E = E_{np} + E_{oid} = \frac{\sqrt{30PG}}{r} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r} \left[1 + |\Phi| e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + j\beta\phi} \right]. \quad (2)$$

Увесь діапазон можливих відстаней під час розрахунку мереж радіозв'язку можна розглядати як три зони:

- зона взаємних завод, у межах якої знаходяться допустимі відстані зближення між радіостанціями, що працюють на різних частотах, – 0,1-1 км;
- робоча зона, у межах якої перебувають можливі відстані необхідної дальності зв'язку, – 1,0-20 км;
- координатна зона, у межах якої знаходяться необхідні відстані територіального рознесення

радіостанцій, що працюють на одній частоті, – 20-100 км.

На початкових ділянках кривих 0,1 – 1 км відбитий промінь не створює суттєвого впливу на загальну величину сигналу, і величина напруженості поля наближається до значень напруженості поля в умовах вільного простору [12].

Основною особливістю поширення в межах робочої зони є наявність впливу інфраструктури залізниць, що призводить до зменшення результуючої

напруженості і формує складну інтерференційну структуру поля з глибокими просторовими флуктуаціями, які враховують відповідно до кривих інтегральної функції розподілу. Розраховуючи зони покриття, потрібно виходити з імовірності забезпечення зв'язку 90-95 % рівня корисних сигналів.

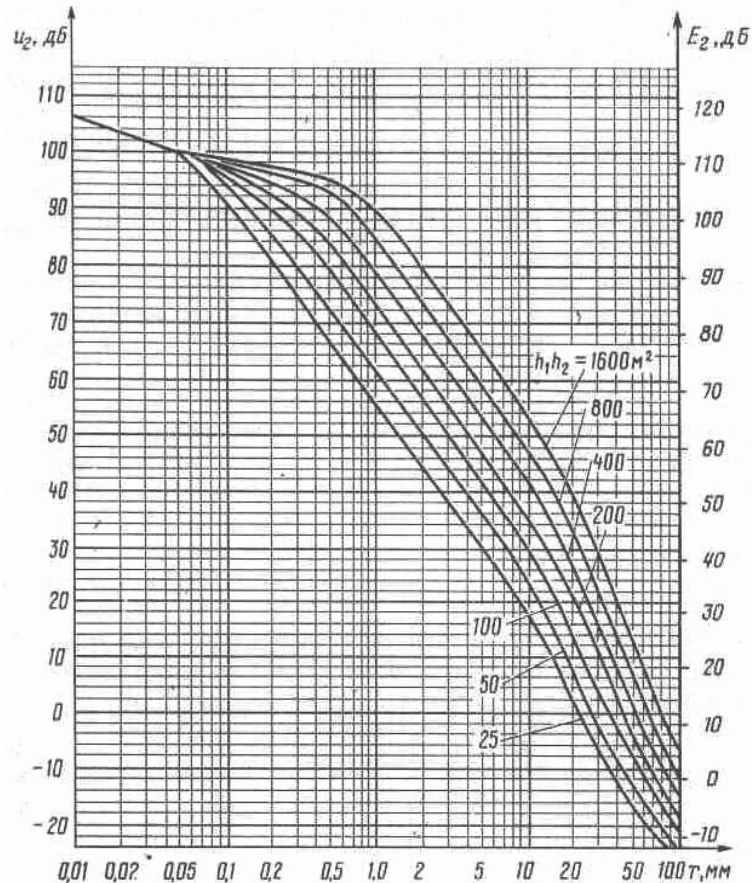


Рис. Криві поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць

Для забезпечення умов ЕМС необхідно, щоб у точці приймання рівень завадового сигналу, $U_{2зав}$ був менший за допустимий $U_{2зав доп}$, тобто $U_{2зав} \leq U_{2зав доп}$. Для розрахунків ЕМС імовірність перевищення завадового рівня становить $p=5\div 10\%$. Тобто надійність виконання умов ЕМС буде складати 90-95 %.

Значення $U_{2зав доп}$ визначено параметрами захищеності приймача для конкретного виду впливів. Рівень завадового сигналу у приймачі залежить від частотно-залежного ослаблення, яке є мірою багатосигнальної вибіркості приймача. Її вимірюють двосигнальним методом на частоті сусіднього каналу.

Характеристики вибіркості приймача показують умови впливу зі взаємодією. Двосигнальну вибіркості можна розглядати як динамічний діапазон сигналу за умовами блокування.

Для забезпечення умов ЕМС необхідно виключити завади блокування сигналів та інтермодуляції. Із блокуванням погіршуються умови приймання до співвідношення сигнал/шум 12 дБ на виході приймача.

Максимально допустимий рівень завадового сигналу на вході приймача необхідно визначати виходячи з реального значення динамічного діапазону з блокування і прийнятого мінімально допустимого рівня корисного сигналу:

$$U_{2зав.дон} = S_2 + S_2(\Delta f) + U_{2\min}, \quad (3)$$

де S_2 – двосигнальна вибірковість за умови недопустимості блокування, дБ;

$S_2(\Delta f)$ – частотно залежне послаблення завадового сигналу в реальних умовах роботи радіомереж, дБ;

$U_{2\min}$ – мінімальний рівень корисного сигналу.

Значення вибірковості зі зростанням $S_2(\Delta f)$ не нормоване, але може бути визначено за спеціальними дослідженнями для конкретних типів радіозасобів.

Для реального проєктування розрахунковий рівень завадового сигналу визначають з урахуванням необхідних поправочних коефіцієнтів за формулою

$$U_{2зав.р} = U_{2зав.дон} + \sum B_{парам} + \sum l$$

У реальних умовах збільшення частотного рознесення між корисними сигналами і завадовими сигналами $\Delta f = |f_c - f_{зав}|$ призводить до збільшення захищеності приймача і зростання двосигнальної вибірковості.

Якщо корисний сигнал зростає, то завадовий сигнал теж може бути більшим. Тому допустимий рівень завадового сигналу в цьому випадку визначають як

$$U_{2зав.дон(БЛ)} = S_2 + U_{2\min}, \quad (4)$$

де $U_{2зав.дон(БЛ)}$ – допустимий рівень завадового сигналу;

S_2 – двосигнальна вибірковість сигналу по сусідньому каналу.

Частотне рознесення призводить до збільшення захищеності і зменшення вимог щодо просторового рознесення джерела та рецептора завад.

У результаті впливу індустріальних радіозавод на електрифікованих ділянках залізниць зростають вимоги щодо рівня корисного сигналу, що дає змогу відповідно підвищувати допустимі рівні завадових сигналів $U_{2зав.дон(БЛ)} = 74\text{дБ}$. А на ділянках постійного струму складає $U_{2зав.дон(БЛ)} = 68\text{дБ}$.

Тоді просторове рознесення між антенами стаціонарних радіостанцій складає на ділянках

змінного струму $\Delta r_{дон} = 550\text{м}$, а на ділянках із постійним струмом необхідна відстань зростає до $\Delta r_{дон} = 800\text{м}$, за кривими поширення радіохвиль на рисунку. Із частотним рознесенням 150 кГц просторове рознесення може бути зменшене до 50 м, за рахунок зростання допустимого рівня завадового сигналу зі зростанням $S_2(\Delta f)$.

Інтермодуляційні завади виникають на виході приймача у випадку взаємодії двох або більше сигналів, частоти яких не співпадають із частотами основного і побічних каналів приймання.

Інтермодуляційно сумісними є сигнали, які не утворюють складових із робочими частотами приймачів.

Найбільш небезпечними є інтерференційні складові третього порядку, для виникнення яких достатньо двох завадових сигналів.

$$\begin{aligned} 2f_1 - f_2 &= f_{роб}; \\ f_1 + f_2 - f_3 &= f_{роб}. \end{aligned}$$

Інтермодуляційну вибірковість визначають за значеннями трисигнальної вибірковості. Інтермодуляція виникає в преселекторі, а далі підсилюється в тракці приймання корисного сигналу. Тому значення інтермодуляційної вибірковості не залежить від різниці частот корисного і завадового сигналів.

Найбільш ефективним засобом забезпечення інтермодуляційної вибірковості є вибір інтермодуляційно сумісних частот. Це важливо для вибору робочих частот мереж на сортувальних станціях, де розташована значна кількість радіозасобів станційного, поїзного та ремонтно-оперативного радіозв'язку.

Для розрахунку координатних відстаней із роботою радіозасобів на однакових частотах використано третину кривих на відстанях понад 30 км, в основу яких покладені криві поширення радіохвиль за рекомендацією ITU-R P.1546 [13].

У разі роботи радіозасобів на однакових частотах необхідно виключити помилкове приймання завадового сигналу зі спрацюванням шумоподавлювача, якщо $U_{2зав.дон.коорд} = 0,3\text{мкВ}$.

Для умов потужності передавача $P = 12\text{Вт}$ і добутку висот установлення антен $h_1 h_2 = 100\text{м}^2$ (де $h_1 = 10\text{м}$, $h_2 = 10\text{м}$) необхідне значення координатної відстані $\Delta r_{корд}$ складає близько 50 км, а для добутку антен $h_1 h_2 = 200\text{м}^2$ необхідна координатна відстань зростає до 60 км.

Висновки

1. У роботі розглянуто комплекс питань частотно-територіального планування мереж залізничного технологічного радіозв'язку.

2. Для частотно-територіального планування радіомереж необхідно розв'язувати два типи задач: визначити зони обслуговування радіомереж із заданою якістю і надійністю зв'язку та розрахувати просторове та частотне рознесення за умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів.

3. Створена нормативна база вирішує ряд питань організації та розрахунку зон обслуговування радіомереж. Зараз відсутні нормативні документи, які б регламентували методи розрахунку електромагнітної сумісності та вибір номіналів частот для використання в мережах залізничного радіозв'язку.

4. В основу розрахунку EMC покладені енергетичні критерії та розглянуті особливості поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць.

5. Розроблено методику розрахунку електромагнітної сумісності, яка може бути покладена в основу відомчої нормативної бази.

Список використаних джерел

1. ЦШ-0058. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
2. Recommendation ITU-R SM.337. Frequency and distance separations. 2019. 12 p.
3. Recommendation ITU-R SM.1134. Intermodulation interference calculations in the land-mobile service. 2010. 36 p.
4. Кузавков В. В., Зарубенко А. О. Аналіз методів оцінки електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку розташованих на локальному об'єкті. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2018. № 2. С. 57-66.
5. Лемешко А. В., Афонін С. В., Заребенко А. О. Аналіз проблем EMC з метою розроблення ефективної методики проектування БІМ на базі інформаційних систем з урахуванням електромагнітних завод зв'язку. *Збірник наукових праць ВІПІ*.
6. Транкінгові мережі залізничного технологічного радіозв'язку / О. В. Єлізаренко, А. О. Єлізаренко, В. П. Поляков, К. А. Трубочанінова. Харків: УкрДАЗТ, 2007. 114 с.
7. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: навч. посіб. / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлізаренко, Н. А. Корольова. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 145 с.
8. Єлізаренко А. О. Удосконалена статистична модель для розрахунку енергетичних

характеристик каналів залізничного технологічного радіозв'язку. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2015. № 2. С. 37-42.

9. ДСТУ 4184:2003. Радіостанції з кутовою модуляцією суходільної рухомої служби. Класифікація. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання. Київ, 2003. 50 с.
10. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. Київ: НТУ «КПІ», 2014. 336 с.
11. ITU-R Recommendation P.530. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. 2001. 36 p.
12. ITU-R Recommendation P.525. Calculation of free-space attenuation. International Telecommunication Union. 2010. 4 p.
13. Recommendation ITU-R P.1546-3. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2007. 57 с.

Yelizarenko Andriy. Calculation of electromagnetic compatibility in frequency-territorial planning problems of technological radio communication networks

The paper considers a set of issues of frequency-territorial planning of railway technological radio communication networks. In frequency-territorial planning of radio networks, it is necessary to solve two types of problems: to determine the service areas of radio networks with a given quality and reliability of communication and to perform calculations of spatial and frequency separation provided that the electromagnetic compatibility of radio equipment is ensured.

At present, the regulatory framework that has been created solves a number of issues of organization and calculation of service areas of radio networks. Currently, there are no regulatory documents that would regulate the methods of calculating electromagnetic compatibility and the selection of operating frequencies for use in technological radio communication networks.

To analyze the electromagnetic environment, it is necessary to determine the influence of radiation from interfering transmitters, the patterns of radio wave propagation between emitters and receptors of radio interference, the nature of radio interference, and the conditions of susceptibility to radio interference of receiving devices. In the calculations, a model of radio wave propagation under the influence of railway infrastructure was proposed, which allows calculations of spatial and frequency separation of radio equipment while meeting the conditions for ensuring electromagnetic compatibility. A methodology has been

developed that can be used as the basis for departmental regulatory framework.

Єлізаренко А. О., к.т.н., доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: elizarenko1@ukr.net.
<https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Yelizarenko Andriy, Associate Professor of transport connection department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: elizarenko1@ukr.net.
<https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

МОЙСЕСЕНКО В. І. професор¹,
ГАВРИЛОВ М. О. магістр¹,
КОВАЛЬ В. О. студент¹

(¹Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення пристрою для автоматичного регулювання температури електрообігріву контактів автоперемикачів стрілочних електроприводів



Анотація. Автоперемикач електричного приводу стрілки є відповідальним елементом конструкції, він забезпечує формування інформації про положення кінців стрілки. Водночас цей компонент, порівняно з іншими елементами конструкції приводу, є найменш надійним. Значна кількість пошкоджень викликана негативними впливами навколишнього середовища: висока вологість, низька температура повітря можуть спричинити затвердіння контактів, що негативно впливає на роботу ланцюга керування.

Існуючі технічні засоби для запобігання негативним атмосферним впливам включають включення резисторів для електричного нагрівання контактів протягом зимового періоду експлуатації. Наявна система технічного обслуговування електроприводів стрілок передбачає включення та виключення електричних нагрівальних резисторів обслуговуючим персоналом.

Слід зазначити, що переважна більшість станцій з невеликою кількістю стрілок не передбачають постійної присутності обслуговуючого персоналу, тому, очевидно, цей процес зовсім не узгоджується з коливаннями температури навколишнього середовища. Насправді електромеханік SCB може бути присутнім на певній станції свого району під час виконання планових робіт або під час усунення пошкоджень електричних пристроїв централізації.

Ключові слова: залізнична інфраструктура, технічне обслуговування, експлуатація, електронагрівачі, автоматичний обігрів, датчик температури, автоперемикач.

Вступ

Автоперемикач стрілочного електропривода є відповідальним елементом конструкції, він забезпечує формування інформації про положення вістряків стрілки. У той же час цей компонент порівняно з іншими елементами конструкції приводу є найбільш ненадійним. Значна кількість пошкоджень обумовлена негативними впливами навколишнього середовища: підвищена вологість, низька температура повітря можуть бути причиною індівіння контактів, що несприятливо впливає на роботу контрольного кола.

Існуючі технічні засоби для запобігання негативним атмосферним впливам передбачають ввімкнення резисторів для електрообігріву контактів у зимовий період експлуатації. Існуюча система технічного обслуговування стрілочних електроприводів передбачає ввімкнення та вимикання резисторів електрообігріву навченим персоналом.

Слід зазначити, що переважна більшість станцій із невеликою кількістю стрілок не передбачає постійне знаходження навченого персоналу, тому, очевидно, цей процес зовсім не узгоджений із коливаннями температури навколишнього середовища. Фактично електромеханік СЦБ може бути присутнім на конкретній станції своєї ділянки для виконання регламентних робіт або усунення пошкодження пристроїв електричної централізації.

Очевидно, наявність людини-оператора в контурі керування не може забезпечити виконання завдань через наявний суб'єктивний фактор. Унаслідок цього виникає проблема енергоефективності процесу електрообігріву, і трапляються випадки пошкодження контактної групи автоперемикача через неефективну роботу пристрою електрообігріву. Тому зазначений напрям роботи є актуальним, має практичне значення та направлений на зменшення відмов у системах станційної централізації.

Аналіз публікацій

Залізничні стрілочні переводи, у тому числі і конструкцію електропривода, можна впевнено назвати найчутливішими складовими залізничної колії, тому що до їхнього складу входить велика кількість механічних елементів, багато з яких є рухомими [1].

Методи розв'язання проблем, що пов'язані з покращенням умов експлуатації стрілочних переводів, а отже, підвищенням їхньої надійності представлені в деяких технічних рішеннях, наприклад спільний проєкт німецької фірми ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH (Німеччина) і компанії ТОВ «Теплолюкс-Дніпро» [2]. Зокрема, у проєкті КОМКОНСТ-20 [3] розглянуто систему електрообігріву стрілочних переводів: електрообігрів вістряків стрілки, а не контактів автоперемикача, і автори не робили спробу розв'язати саме цю проблему.

Для реалізації проєктів зі створення систем обігріву основними елементами є нагрівальні елементи; типи та фактори, якими слід користуватися під час їх вибору, широко висвітлені в статті на сайті виробника електричних компонентів компанії DMX [4]. Окремо можна виділити статтю Л. І. Мельника з Київського політехнічного університету імені І. Сікорського, темою якої є створення термостійких електропровідних матеріалів із регульованими електричними властивостями, що можна використовувати як обігрівачі [5].

Також велике значення для розв'язання проблем енергоефективності автоматичного обігріву є пристрої регулювання температур (терморегулятори), різновиди яких подані в статті освітнього проєкту ElectricalSchool.info [6].

Мета статті

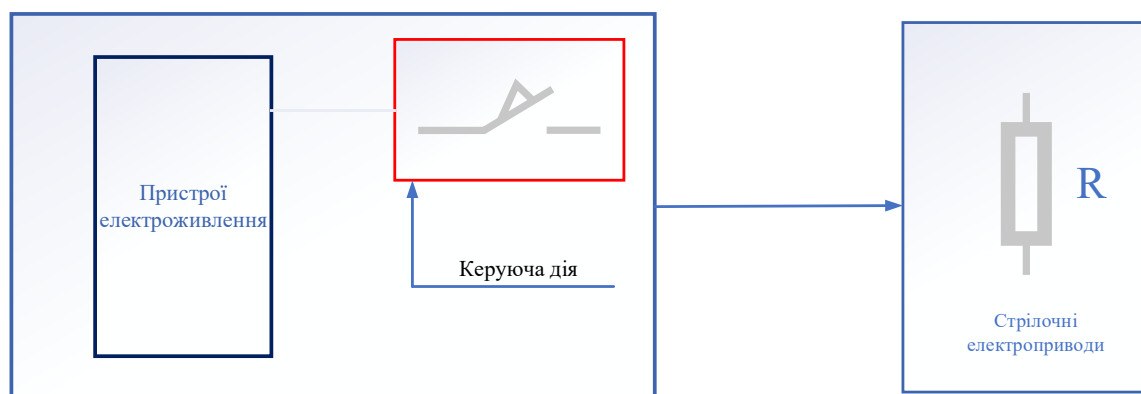
Удосконалення пристроїв електрообігріву контактів автоперемикачів стрілочних

електроприводів і підвищення їхньої енергоефективності.

Викладення основного матеріалу

Типова схема організації електрообігріву контактів автоперемикача стрілочного електропривода, яка показана на рис. 1, включає пристрій живлення поста електричної централізації, кабель, знижувальний трансформатор типу ПОБС 5А і два резистори ПЭВ-25-56 Ом. Вони встановлені над контактами автоперемикача і ввімкнені паралельно, напруга на них не має перевищувати 26 В. Живлення пристроїв електрообігріву подають із поста ЕЦ змінним струмом частотою 50 Гц, напругою 220 В, із наступним зниженням на трансформаторах типу ПОБС-5А. Трансформатори встановлені у трансформаторних ящиках поруч із розгалужувальною муфтою стрілочних електроприводів.

Пост ЕЦ



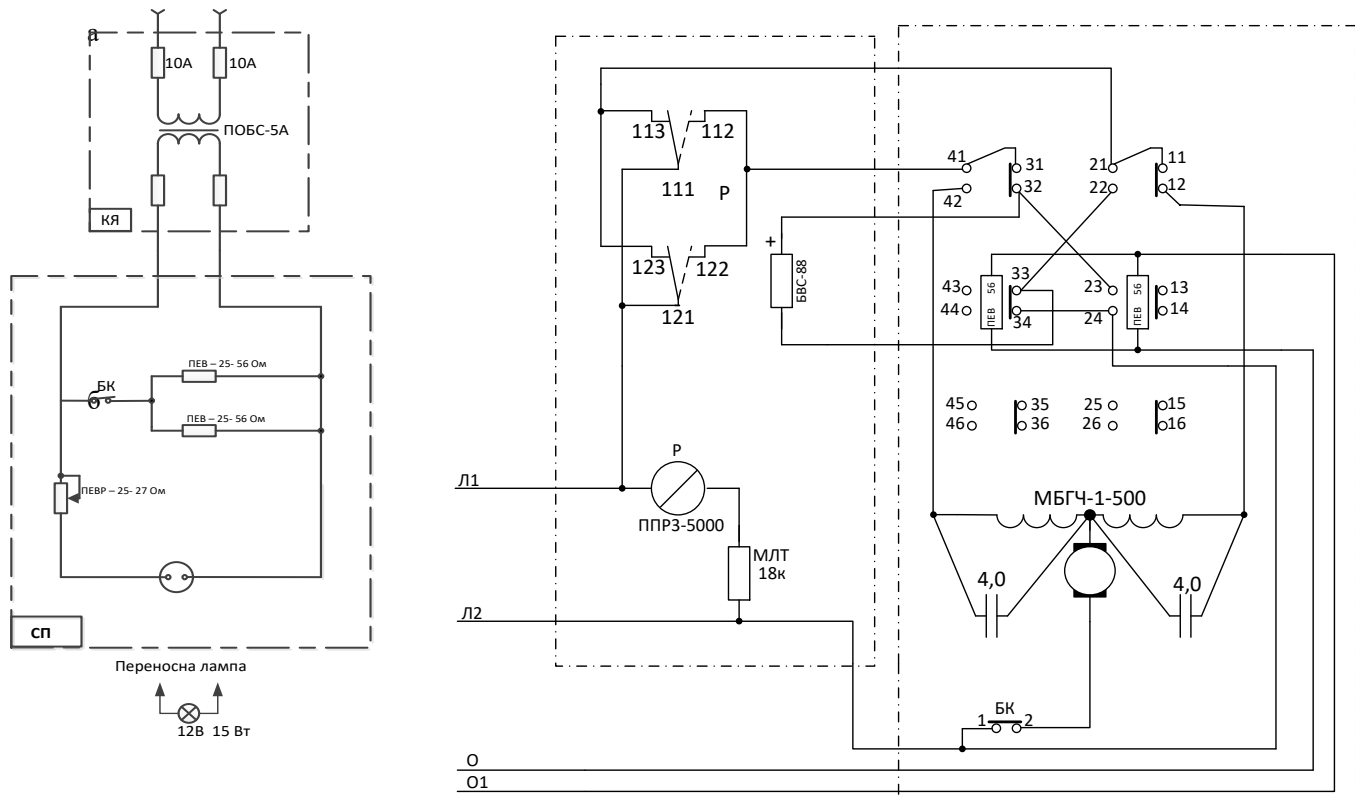


Рис. 1. Схеми електрообігріву контактів автоперемикача стрілочного електропривода:
а – структурна; б – принципова

Слід зазначити, що до одного трансформатора ПОБС-5А може бути підключено не більше п'яти стрілочних електроприводів.

Для одержання на резисторах обігріву напруги U_k не більше 26 В із поста ЕЦ на первинну обмотку ПОБС-5А подають змінний струм напругою 220 або 237 В. Допустиме падіння напруги в кабелі ΔU_k приймають відповідно 70 або 87 В і визначають із рівняння

$$\Delta U_k = 2L_k I_p$$

де L_k – довжина кабелю до колійної коробки, м;

I_p – розрахунковий струм у первинній обмотці ПОБС-5А, А (визначають відповідно до кількості стрілок від 0,21 для однієї стрілки до 1,1 А для п'яти стрілок);

$r = 0,0235$ – опір жил кабелю, Ом/м.

Якщо на первинній обмотці трансформатора ПОБС-5А від 190 до 220 В, то спарені електроприводи підключають по двох жилах паралельно. До першої стрілки прокладено дві жили і між спареними стрілками також дві жили. Зі зниженням цієї напруги з 180 до 150 В резистори кожної стрілки ввімкнені по окремих жилах, до першої зі спарених стрілок прокладено чотири жили, а між спареними дві, причому схема ввімкнення резисторів паралельна.

Такий підхід, хоча він і достатньо простий у технічній реалізації, не можна вважати енергоефективним – на резистори подана фіксована напруга незмінної величини. За рахунок цього витрати електроенергії є постійними та не залежать від температури навколишнього середовища, а ефективність процесу безпосередньо залежить від дій навченого персоналу.

Визначимо витрати електроенергії для електрообігріву контактів автоперемикачів станції, на якій проводили дослідження. Загальна кількість стрілок складає 23, термін дослідження – один місяць, режим обігріву цілодобовий.

Якщо струм електронагрівального елемента I_p для однієї стрілки дорівнює 0,21 А, а для п'яти стрілок, які підключені до одного трансформатора, відповідно 1,1 А, то в межах станції максимальний струм однієї стрілки буде 0,506 А. Термін максимальний струм вжито тому, що до одного трансформатора може бути підключена різна кількість стрілок, але не більше п'яти.

Отже, витрати електроенергії E для електрообігріву контактів автоперемикачів на станції з 23 стрілками на один місяць за безперервної роботи електрообігрівачів складе

$$E = 23 \times 0,506 \times 24 \times 30 = 8379,36 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Очевидно, навіть в межах однієї невеликої станції маємо досить значні витрати коштів, особливо якщо взяти до уваги тенденцію до підвищення середньодобової температури зимового періоду, яку спостерігають останніми роками в Україні. Але головним фактором енергоефективності є вартість кіловата електричної енергії для промислових споживачів, яка має тенденцію до постійного зростання.

Тому автори пропонують створити автоматичну систему керування процесом електрообігріву контактів автоперемикача залежно від зміни температури навколишнього середовища (рис. 2).

Система має датчик температури, пристрій, що забезпечує підтримання її заздалегідь встановленого

значення, і комутаційний пристрій, що забезпечує підключення електрообігрівальних елементів. Завдяки регулятору можна встановити необхідне значення температури, яку і буде підтримувати регулятор автоматично.

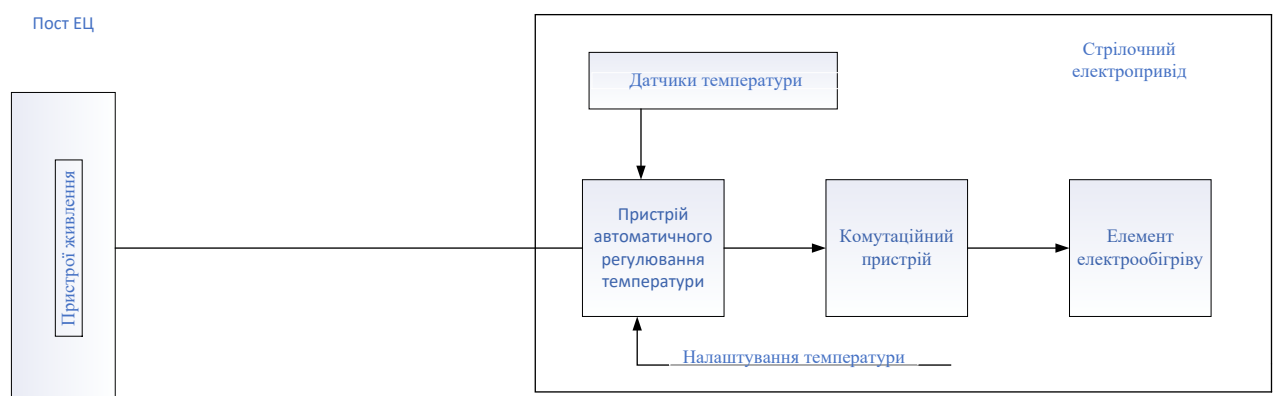


Рис. 2. Блок-схема пристрою автоматичного регулювання температури електрообігріву контактів автоперемикача

Застосування нової схеми породжує декілька запитань, більшість із них стосуються місця встановлення плати зі схемою автоматичного регулювання температури та датчика температури повітря. На думку авторів, можливі такі варіанти розміщення апаратури:

- датчик і плата керування встановлені в корпусі стрілочного переводу (варіант 1);
- датчик і плата керування встановлені в трансформаторному ящику на групу до п'яти стрілок (варіант 2);
- датчик і плата керування встановлені на посту централізації (варіант 3).

Очевидно, можливі й інші варіанти, наприклад із рознесенням датчика температури і плати керування.

Для визначення найбільш оптимальної схеми розміщення апаратури були проведені експериментальні дослідження температурного режиму в корпусі електропривода і трансформаторному ящику в різні періоди часу та зі встановленням на різних типах баласту і шпал. Результати вимірювань наведені в таблиці та на графіках рис. 3.

Експерименти проводили без переміщення приладів для вимірювання температури, її вимірювали безпосередньо в корпусі стрілочного переводу, а не над резисторами обігріву за паралельного підключення резисторів. Перед і після процесу вимірювань проводили візуальний огляд об'єктів, щоб виявити можливі зміни.

Вимірювання фактичної температури в пристроях

Дата	5.11.2024 / 15:40 (°C)	6.11.2024 / 8:50 (°C)	6.11.2024 / 16:50 (°C)	8.11.2024 / 18:30 (°C)	17.11.2024 / 17:14 (°C)	17.11.2024 / 18:38 (°C)	18.11.2024 / 14:10 (°C)	19.11.2024 / 8:52 (°C)	19.11.2024 / 13:40 (°C)	20.11.2024 / 10:31 (°C)	20.11.2024 / 15:22 (°C)	20.11.2024 / 18:38 (°C)	24.11.2024 / 7:39 (°C)
Пристрій													
Температура повітря навколишнього середовища (°C)	5	5	8	6,5	6,5	5,8	10	4,5	8,5	6,5	9,0	9,0	1,5
СП-ТС № 42, 1/11, Р-65. Шпали дерев'яні, підрізка баласту 15 см, суміш суглинок із ракушняком	4,8	3,5	8	5,5	5,0	4,0	9,5	2,0	6,5	3,5	7,8	7,8	0,5
СП-ТС № 40, 1/11, Р-65. Шпали залізобетон, підрізка баласту 15 см, суглинок	4,8	4,5	8	6	5,0	4,0	9,5	3,0	7,0	4,0	8,0	7,5	1,0
Колійний ящик КГ-4-01-01 (пластик)	4,5	4	6,5	5,5	2,9	1,8	9,5	2,0	5,0	3,5	7,2	6,8	-0,5

Вимір фактичної температури в пристроях

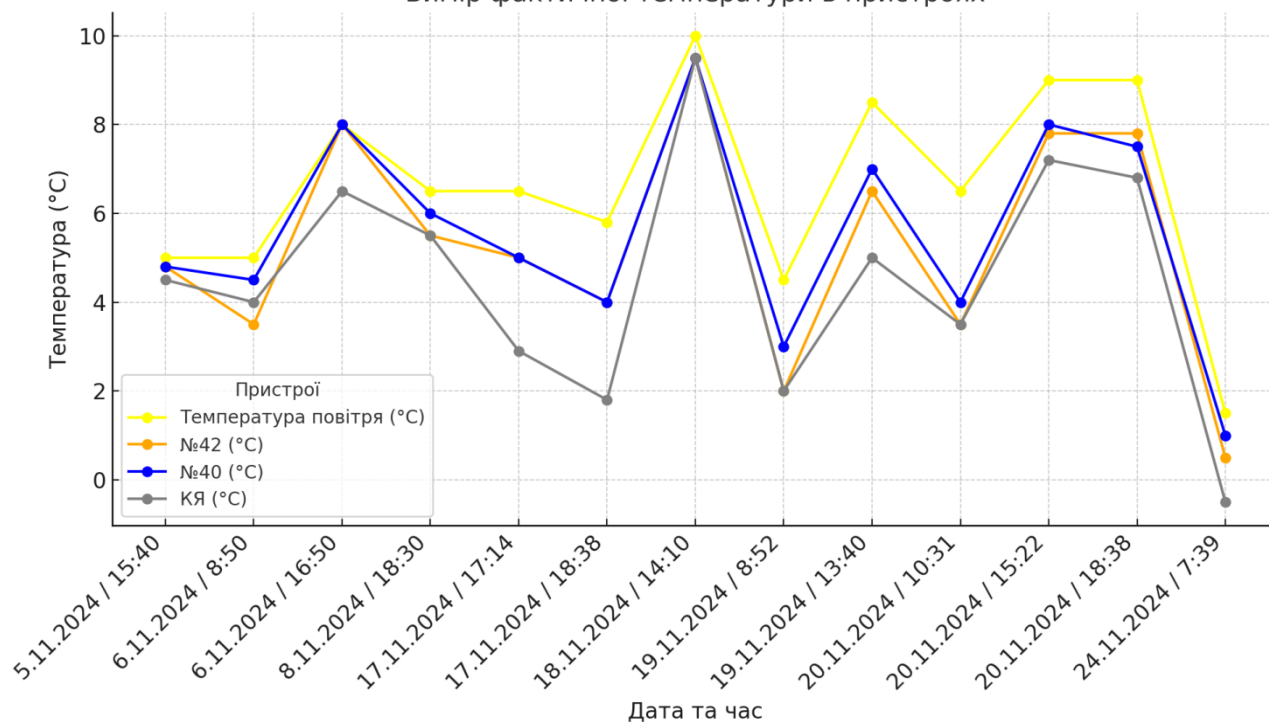


Рис. 3. Графік зміни температури в пристроях

Коментуючи результати вимірювань, що наведені на рис. 3, можна відзначити таке:

1. Температурні показники в корпусі привода і трансформаторному ящику не мають значних відмінностей, різниця становить лише 1-2 °С. Це вказує на те, що температурні умови в обох місцях схожі, хоча трансформаторний ящик може мати кращу теплоізоляцію завдяки своїй конструктивній особливості.

2. Різниця температури в корпусі електропривода залежно від типу шпальної основи (дерев'яні або залізобетонні шпали), складає 0,5-1,5 °С. Виявлено, що температура в корпусі електропривода на залізобетонних шпалах була нижчою, що можна пояснити більшою теплопровідністю і меншою теплоізоляцією цього матеріалу порівняно з дерев'яними шпалами.

3. Температурні коливання в колійному ящику відбуваються більш динамічно, ніж у корпусі електропривода, оскільки матеріал ящика має меншу масу, що забезпечує швидшу реакцію на зміни температури навколишнього середовища.

4. Найнижчі температури в корпусі електропривода були зафіксовані в ранкові та вечірні години, що відповідає мінімуму температури навколишнього повітря. Це підтверджує необхідність впровадження адаптивного керування обігрівом контактів.

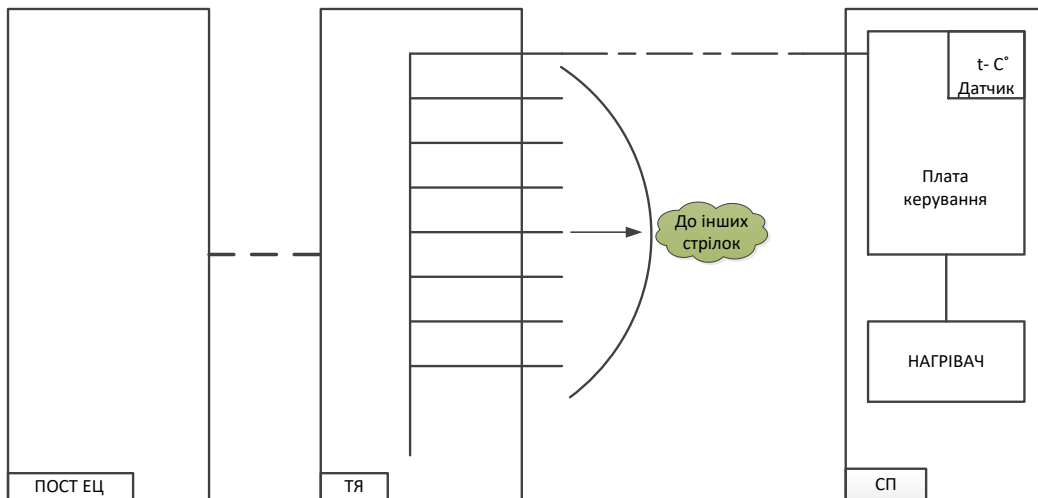
5. Вплив підрізки баласту та складу ґрунту: за глибокої підрізки та менш щільного баласту спостерігали більші температурні коливання, що свідчить про те, що умови розташування електропривода можуть впливати на ефективність системи обігріву.

6. Економія енергії: застосування автоматичної системи обігріву дає змогу оптимізувати споживання електроенергії та знизити витрати на 20-30 %, що є особливо важливим для великих станцій із великою кількістю стрілок.

7. Перспективи вдосконалення: подальші дослідження можна зосередити на поліпшенні конструкції нагрівальних елементів, наприклад застосування локалізованого нагріву для зменшення теплових втрат і підвищення ефективності обігріву.

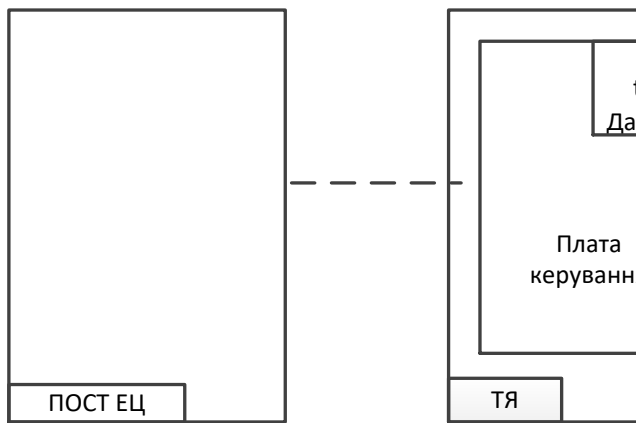
8. Практичні рекомендації: оптимальними варіантами розміщення системи керування є другий і третій варіанти (розміщення датчиків у трансформаторному ящику або централізоване керування), оскільки ці варіанти забезпечують захист електронних компонентів від зовнішніх впливів і спрощують обслуговування.

З урахуванням отриманих результатів експерименту з вимірювання температури були запропоновані три варіанти можливої реалізації системи електрообігріву контактів автоперемикачів стрілочних електроприводів (рис. 4).

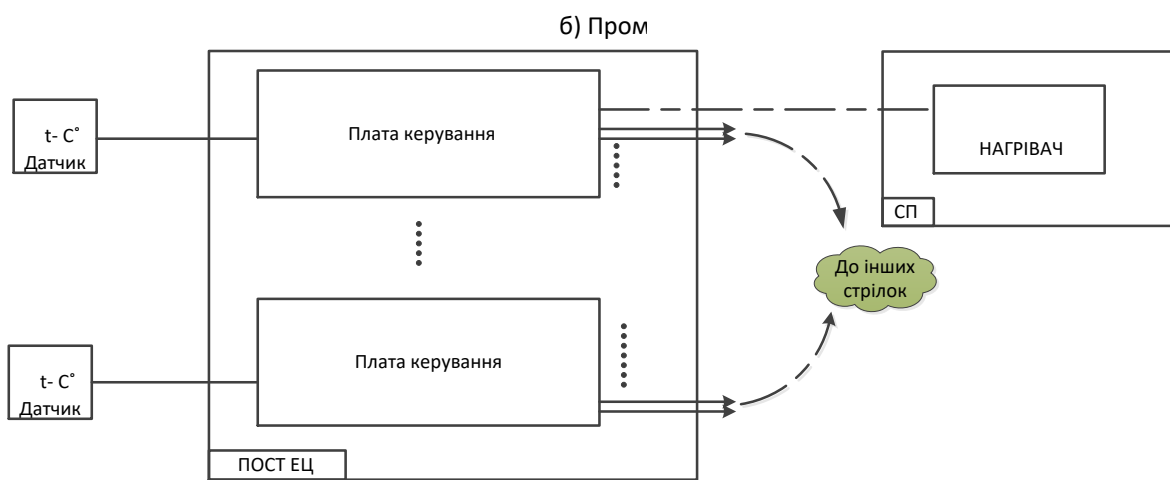


СП - Стрілочний електропривод
ТЯ - Трансформаторний ящик

а) Децентралізований варіант



ТЯ - Трансформаторний ящик



СП - Стрілочний електропривод

в) Централізований варіант

Рис. 4. Варіанти реалізації системи електрообігріву контактів автоперемикача стрілочних електроприводів на станції

Перший варіант (рис. 4, а) із децентралізованим розміщенням датчика температури передбачає встановлення плати керування з датчиком температури та нагрівачем безпосередньо в корпусі стрілочного електропривода. Живлення подають із поста централізації до трансформаторних ящиків, а від них розводять по стрілках.

Другий (рис. 4, б), проміжний, варіант – встановлення плати керування з датчиком температури в корпусі трансформаторного

ящика, а нагрівальний елемент розміщують у корпусі стрілочного електропривода.

Третій варіант (рис. 4, в) із централізованим розміщенням плат керування на посту електричної централізації передбачає винесення датчиків температури назовні, можливе кріплення безпосередньо на стіні будівлі. За такого розташування датчиків необхідно передбачити їхній захист від потрапляння прямих сонячних променів.

Слід зазначити, у всіх розглянутих вище варіантах структур використано діючу кабельну

мережу, що значно спрощує та здешевлює процес впровадження пропонованого пристрою.

Висновки

Запропонована розробка забезпечує автоматичну роботу пристроїв електрообігріву і не потребує втручання персоналу для ввімкнення та вимкнення, дає змогу усунути людський фактор і підвищити надійність роботи стрілочних електроприводів.

Крім того, впровадження автоматичного електрообігріву допоможе знизити енергоспоживання та покращити його ефективність, особливо в умовах різкого коливання температури навколишнього середовища.

За рахунок регулювання температурного режиму в корпусі електропривода залежно від зміни температури навколишнього середовища забезпечено можливість економії електричної енергії, що витрачена на електрообігрів контактів автоперемикача стрілочного електропривода. Подальшим розвитком робіт у визначеному напрямі може бути вдосконалення конструкції електронагрівального елемента з використанням принципу направленої теплової дії, що може суттєво покращити енергетичні характеристики процесу обігріву. Дослідження також можуть бути спрямовані на використання альтернативних матеріалів для виготовлення нагрівальних елементів.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-19-2018. Залізничі колії 1520 мм. Норми проектування. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074863391337088215?doc_type=2.
2. Система електрообігріву стрілочних переводів – спільний проект з німецькою фірмою ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH (Німеччина) та компанії ТОВ «Теплолюкс-Дніпро». URL: <https://www.railway.supply/uk/innovacijna-sistema-obigrivu-ta-ochishhennya-strilochnih-perevodiv/>.
3. Система обігріву стрілочних переводів КОМКОН НСТ-20. URL: <https://komkon.ua/products/nst-20/>.
4. Нагрівальні елементи. URL: <https://www.dxmht.com/ru/article/heating-elements-guide.html>.
5. Мельник Л. І. Аспекти виготовлення струмопровідних полімерних матеріалів. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/1_2023/33.pdf.

6. Пристрої регулювання температур. URL: <https://electricalschool.info/automation/1340-sistemy-avtomaticheskogo-regulirovanija.html>.

Development of a device for automatic temperature control of electric heating contacts of automatic switches of turnout electric drives

Abstract. The autoswitch of the turnout electric drive is a responsible element of the design, it provides the formation of information about the position of the arrow tips. At the same time, this component, in comparison with other elements of the drive design, is the most unreliable. A significant amount of damage is caused by negative environmental influences: high humidity, low air temperature can cause contact induration, which adversely affects the operation of the control circuit.

Existing technical means to prevent negative atmospheric influences include the inclusion of resistors for electric heating of contacts during the winter period of operation. The existing system of technical maintenance of turnout electric drives provides for the inclusion and exclusion of electric heating resistors by service personnel.

It should be noted that the vast majority of stations with a small number of turnouts do not provide for the constant presence of service personnel, therefore, obviously, this process is not at all consistent with fluctuations in ambient temperature. In fact, the electromechanic of the SCB may be present at a specific station of his district when performing routine work, or when eliminating damage to electrical centralization devices.

Obviously, the presence of a human operator in the control loop cannot ensure the fulfillment of the tasks due to the emerging subjective factor. As a result, the problem of energy efficiency of the electric heating process arises, and there are cases of damage to the contact group of the autoswitch due to inefficient operation of the electric heating device. Therefore, the specified direction of work is relevant, has practical significance and is aimed at reducing failures in station centralization systems.

Мойсєненко Валентин Іванович, доктор технічних наук, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна, 61050. E-mail: mvi53@ukr.net; mojseenko@kart.edu.ua. <http://orcid.org/0000-0003-1377-8703>.

Коваль Віталій Олексійович, студент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного

транспорту, Харків, Україна, 61050. E-mail: bitwiy@gmail.com.

Гаврилов Микола Олександрович, магістр, асистент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: nikgawr2020@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9715-6877>.

Moiseenko Valentin, Doctor, Professor department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: mvi53@ukr.net;

mojseenko@kart.edu.ua.

ORCID:

<http://orcid.org/0000-0003-1377-8703>.

Koval Vitaliy, student of the department automation and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: bitwiy@gmail.com.

Havrylov Mykola, Master, Assistant Professor of the Department of Automation and Computer Remote Control of Train Movement, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: nikgawr2020@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1377-8703>.

ГАВРАШЕНКО А. О.

Аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

БАРКОВСЬКА О. Ю.

К.т.н, доц.кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Інтелектуальна інформаційна система перекладу штучних мов

Анотація. Стаття присвячена розробленню інтелектуальної інформаційної системи перекладу штучних мов із використанням методів штучного інтелекту і статистичних алгоритмів, пропонуючи інноваційний підхід для підвищення ефективності машинного перекладу в умовах динамічного розвитку сучасних технологій. Метою роботи є розроблення інтелектуальної інформаційної системи перекладу штучних мов. Дослідницькою складовою в запропонованій системі є оцінювання ефективності використання методів штучного інтелекту для перекладу штучних і звичайних мов, що може призвести до скорочення часових і ресурсних затрат, а також забезпечити високу точність і надійність результатів. У роботі досліджено застосування довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для перекладу. Результати демонструють, що LSTM досягає точності до 97.5 % для контрольованої вибірки вхідних даних і до 93 % на випадковому датасеті. Отримані результати підтверджують ефективність розробленої системи, що дає змогу з високою ефективністю перекладати звичайні та штучні мови.

Ключові слова: машинне навчання, штучний інтелект, LSTM, датасети, енкодер, декодер, послідовність у послідовність.

Вступ

У сучасному світі обсяги міжкультурної комунікації стрімко зростають. Глобалізація, міжнародна співпраця, розвиток інформаційних технологій і поширення інтернету зумовлюють дедалі більшу потребу у швидкому, точному та масштабованому перекладі текстів різними мовами. Традиційні методи перекладу, як-от робота людини-перекладача або системи, що базовані на правилах (rule-based systems), хоча й забезпечують високу якість у вузькоспеціалізованих контекстах, не здатні ефективно впоратися з обробкою великих обсягів тексту в реальному часі.

Через це особливої актуальності набувають автоматизовані системи машинного перекладу. Протягом останніх десятиліть ця галузь зазнала суттєвих змін: від статистичних методів (Statistical Machine Translation, SMT) до сучасних підходів, які базовані на штучних нейронних мережах (Neural Machine Translation, NMT). Розвиток нейромережевих технологій кардинально змінив підходи щодо автоматичного перекладу.

©БАРКОВСЬКА О. Ю., ГАВРАШЕНКО А. О., 2025

На відміну від статистичних методів, які засновані на поєднанні ймовірнісних моделей і частотних залежностей, нейронні мережі допомагають моделювати переклад як складну трансформацію послідовностей з урахуванням контексту, граматики та семантики.

Нейронний машинний переклад побудований на глибокому навчанні (deep learning) — підгалузі машинного навчання, яка використовує багаторівневі штучні нейронні мережі для обробки даних. Основними архітектурами, що використані в системах NMT, є рекурентні нейронні мережі (RNN), довгі короткочасні пам'яті (LSTM), а згодом трансформери (Transformers), які сьогодні вважають найефективнішими для завдань обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP). Саме завдяки трансформерам були створені такі успішні моделі, як Google Translate [1], DeepL [2], ChatGPT [3] та інші.

Сучасні системи перекладу, що використовують трансформери, уміють не лише перекладати окремі слова або фрази, але й розуміти

зміст тексту, виявляти приховані значення, граматичні конструкції, стилістичні особливості мови. Вони здатні підтримувати узгодженість термінології в межах одного документа, розпізнавати неоднозначності, а іноді навіть урахувувати контекст попередніх речень або діалогів. Такий рівень розуміння робить неймережі надзвичайно потужним інструментом для вирішення завдань автоматичного перекладу [4].

Однак, попри досягнення в цій сфері, ще існує чимало викликів. Неймережеві моделі потребують великих обсягів даних для навчання, значних обчислювальних ресурсів і можуть бути схильними до помилок у разі перекладу рідковживаних мов, технічних текстів або культурно-специфічних висловів. Крім того, виникають питання етичного характеру, як-от авторське право на перекладені тексти або упередження, що виникають через асиметричні дані у процесі навчання.

Ця робота присвячена дослідженню процесу перекладу за допомогою нейронних мереж. У ній

розглянуто базові принципи функціонування моделей NMT, проаналізовано архітектури, що найчастіше використовують для перекладу тексту, і розглянуто сучасні тенденції в цій галузі. Особливу увагу приділено практичним аспектам побудови і тренування неймережевих перекладачів, їх оцінювання.

Мета дослідження полягає у створенні інтелектуальної інформаційної системи перекладу штучних мов. У межах роботи буде також зроблено спробу побудувати і протестувати власну неймережеву модель перекладу на базі відкритих корпусів даних і машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [5-7] було проведено значну кількість досліджень, спрямованих на покращення якості нейронних машинних перекладачів. Класифікація типів перекладачів наведена на рис. 1.

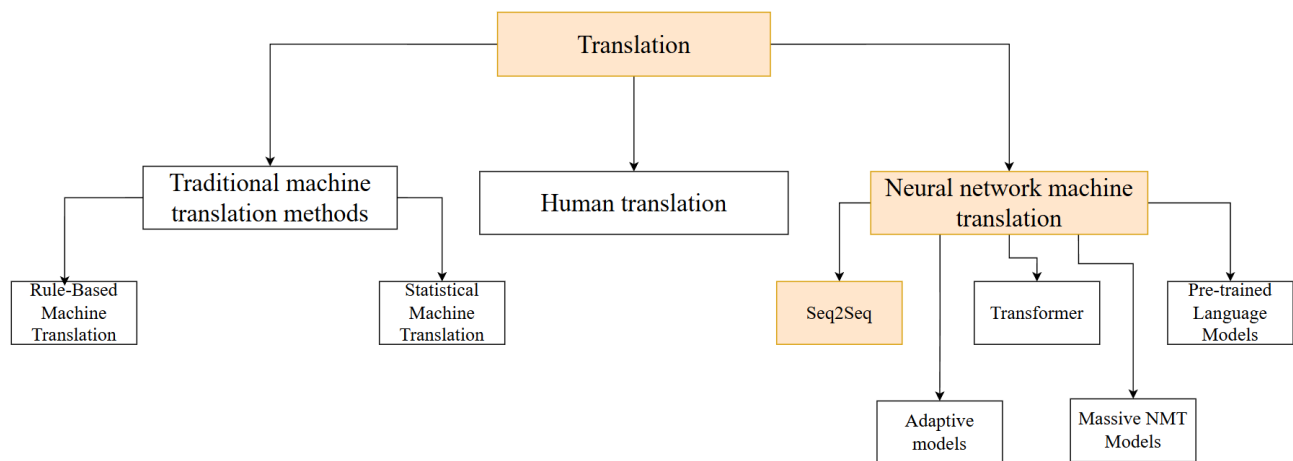


Рис. 1. Класифікація перекладів

Нейронні методи машинного перекладу стали головною технологією в автоматичному перекладі завдяки своїй здатності моделювати складні мовні залежності і створювати переклади, що наближені до людських. Їхня еволюція розпочалась із простих архітектур, які поступово ускладнювались і вдосконалювались, що дало змогу досягати високої точності перекладу навіть між мовами з дуже різною структурою.

Перші моделі нейронного перекладу були базовані на принципі «послідовність у послідовність». У цьому підході використано дві рекурентні нейронні мережі — одна для кодування вхідного речення у вектор фіксованої довжини, а інша для декодування цього вектора в речення цільовою мовою. Під час навчання така модель поступово навчається асоціювати цілі послідовності слів між собою, не

розбиваючи речення на окремі слова чи фрази, як це відбувалось у статистичних методах. Основною перевагою цього підходу була його здатність вивчати шаблони в мовленні без явного програмування правил. Проте моделі такого типу мали суттєве обмеження — вони погано працювали з довгими реченнями, оскільки весь сенс вхідного речення мусив вміститися в один фіксований вектор [8].

Щоб розв'язати проблему втрати інформації з кодуванням довгих речень, було запропоновано механізм уваги. Увага допомагає моделі фокусуватися не на всьому вхідному реченні одночасно, а вибірково звертати увагу на окремі його частини під час генерації кожного слова на виході. Інакше кажучи, декодер, створюючи переклад, отримує доступ до повного набору проміжних станів енкодера і динамічно зважує, які з них є найбільш релевантними для поточного моменту перекладу. Це дало змогу

значно покращити точність і узгодженість перекладу, зокрема в тих випадках, коли структура речення в одній мові значно відрізняється від іншої.

Найбільший прорив у нейронному перекладі стався з появою архітектури трансформерів. Цей підхід кардинально відмовився від рекурентних мереж і замість них використав механізм багатоголової самоуваги. У трансформерах модель може одночасно аналізувати всі слова вхідного речення і встановлювати між ними зв'язки незалежно від їхнього порядку. Завдяки цьому можна досягти набагато ефективнішого моделювання довготривалих залежностей у мові. Крім того, трансформери дозволяють навчання на значно більших обсягах даних і з використанням паралельної обробки, що зробило їх дуже ефективними на практиці. Саме трансформери стали основою більшості сучасних систем перекладу, таких як Google Translate, DeepL та інші [1, 2].

Наступним кроком у розвитку нейронного перекладу стало використання великих попередньо навчених мовних моделей. Ці моделі навчаються не лише на паралельних корпусах, а і величезних обсягах неструктурованого тексту різними мовами, що допомагає їм набувати глибшого розуміння мовної структури, граматики і стилю. Однією з таких моделей є mBART, яка поєднує можливості трансформера і додаткове переднавчання на завданні відновлення зашумленого тексту. У процесі перекладу така модель демонструє високу точність навіть у випадках малоресурсних мов, оскільки здатна узагальнювати знання, набуті з інших мов. Інший приклад — модель T5, яка трактує всі завдання, включаючи переклад, як задачу генерації тексту у відповідь на текстовий запит. Наприклад, щоб перекласти речення, їй достатньо дати інструкцію «переклади з англійської на українську», після чого вона сформує відповідний результат [9].

Окрему категорію складають масивні багатомовні моделі, які здатні перекладати між сотнями мов без необхідності мати паралельні дані для кожної мовної пари. Такі системи використовують узагальнене мовне представлення та принципи трансферного навчання. Наприклад, модель M2M-100 або NLLB (No Language Left Behind) розробляють з акцентом на підтримку рідковживаних мов і забезпечення якісного перекладу в умовах обмежених ресурсів. Вони навчаються на багатомовних корпусах, використовуючи принципи навчання без учителя, вирівнювання мовних просторів і багаторівневої самоуваги, що робить їх надзвичайно потужними та універсальними [10].

Значний інтерес також викликають моделі, які поєднують нейронний переклад із методами підкріплення або адаптації до зворотного зв'язку від користувачів. У таких системах модель може бути додатково навчена на основі людських оцінок перекладу або редагувань. Це дає змогу не лише

підвищити якість, а й забезпечити відповідність стилю, термінології та специфічним вимогам користувача. Такі системи активно досліджують для впровадження в бізнес-інструменти, де переклад має відповідати корпоративним стандартам.

Отже, нейронні методи машинного перекладу пройшли довгий шлях — від простих рекурентних моделей до масштабованих трансформерних архітектур та універсальних багатомовних систем. Кожен новий етап розвитку наближає машинний переклад до рівня розуміння, властивого людині, забезпечуючи не лише переклад слів, а й передавання змісту, стилю та інтенції висловлювання.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є розроблення інтелектуальної інформаційної системи перекладу штучних мов. Дослідницькою складовою в запропонованій системі є оцінювання ефективності нейромережевого перекладу і вимірювання часу роботи на стрес-тестах, що може призвести до скорочення часових і ресурсних затрат, а також забезпечити високу точність і надійність результатів.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

- порівняльний аналіз типів перекладачів;
- створення робочого датасету для подальшого дослідження;
- розроблення методики проведення експерименту;
- створення моделі інтелектуальної інформаційної системи перекладу штучних мов;
- оцінювання впливу нейромережевих моделей на результат перекладу штучних мов у межах запропонованої системи на основі методів машинного навчання.

Проведені експерименти є основою для подальшого покращення методів перекладу на основі нейромережевих моделей і частиною загального комплексу перекладу.

Обмеженнями системи є необхідність навчання нейромережі на паралельному корпусі текстів різними мовами. Також до обмежень можна віднести необхідність навчання системи на словах, що будуть використані для перекладу.

Отримані наукові результати. Обговорення результатів

У цьому дослідженні вперше запропоновано інтелектуальну інформаційну систему перекладу штучних мов, яка генерує нові словники на основі існуючого набору паралельних текстів. Інформаційну систему наведено у вигляді узагальненої моделі (рис. 2) перекладача, яка складається зі взаємозалежних модулів: нейронного перекладу і статистичного перекладу



Рис. 2. Інтелектуальна інформаційна система перекладу штучних мов

Методика проведення експерименту, необхідного для досягнення поставленої мети, є такою: спершу було підготовлено робочий датасет через отримання набору паралельних речень англійською, українською, французькою мовами і штучною мовою есперанто. Кожен із датасетів містив однакові речення різними мовами.

Далі за допомогою цього датасету було створено нейронну модель для машинного перекладу, побудовану за принципом «послідовність у послідовність» (sequence-to-sequence, скорочено seq2seq). Основна її мета — навчитися перетворювати послідовність слів з однієї мови на логічно відповідну послідовність іншою мовою як імітацію перекладу за допомогою глибокої нейронної мережі.

На високому рівні модель складається з двох основних компонентів: енкодера (encoder) і декодера (decoder). Обидва реалізовані на основі багатопарного LSTM (Long Short-Term Memory) — різновиду рекурентної нейронної мережі, яка добре обробляє послідовності та зберігає інформацію в часі. LSTM створена для зберігання довготривалої залежності між словами, що особливо важливо для завдань перекладу, де слово на початку речення може впливати на переклад наприкінці. На відміну від аналогічних систем, ця система працює з набором токенів, записаних у словниках, що дає змогу використовувати систему на звичайних і штучних мовах.

На першому етапі енкодер приймає вхідне речення у вигляді індексів слів (які відповідають токенам із попередньо побудованого словника), перетворює їх у векторні представлення за допомогою вбудованого шару (embedding layer), а потім

послідовно обробляє ці вектори через LSTM. На кожному кроці LSTM генерує прихований стан, але в результаті виводить лише фінальні приховані і клітинні стани, які зберігають стиснену інформацію про все вхідне речення. Саме ці фінальні стани передавані в декодер як початковий контекст для генерації перекладу.

Декодер на кожному кроці приймає попереднє слово вихідного речення (під час тренування це або правильне слово з навчального прикладу — teacher forcing, або попереднє передбачене), перетворює його на вектор, проводить через свою LSTM з оновленими станами і формує передбачення наступного слова. Це передбачення є вектором розміру зі словника вихідної мови, де кожен елемент вказує на ймовірність відповідного слова. Вибирає слово з найвищою ймовірністю, яке або знову подає на вхід, або порівнює з еталонним у випадку тренування.

Навчання складається з таких етапів:

- для зміни внутрішніх станів нейромережі використано метод зворотного поширення помилки (backpropagation through time), за якого оптимізатор Adam змінює ваги мережі, щоб зменшити функцію втрат;
- як функцію втрат використано кросентропійну втрату (CrossEntropyLoss), яка прийнятна для завдань класифікації, зокрема вибору одного правильного слова з великого словника;
- нейромережа навчається 100 епох, на кожній із яких аналізують ефективність навчання.

Для оцінювання нейромережі була розроблена також оцінка точності (accuracy), яку розраховують як відсоток правильних передбачень серед усіх токенів у реченнях.

Щоб модель працювала, перед навчанням створюють словники для обох мов: кожному слову відповідає індекс, а кожне речення перетворюється на фіксованої довжини послідовність цих індексів. Дані беруть із двох вхідних текстових файлів, наприклад англійський текст у першому файлі та його український переклад в іншому [11, 12]. Оскільки для

перекладу окремого слова потрібно на ньому навчити нейронну модель, то поділ датасету на навчальний і тестовий неможливий. Кожне тестоване слово має пройти навчання. Алгоритм описаної моделі зображено на рис. 3.

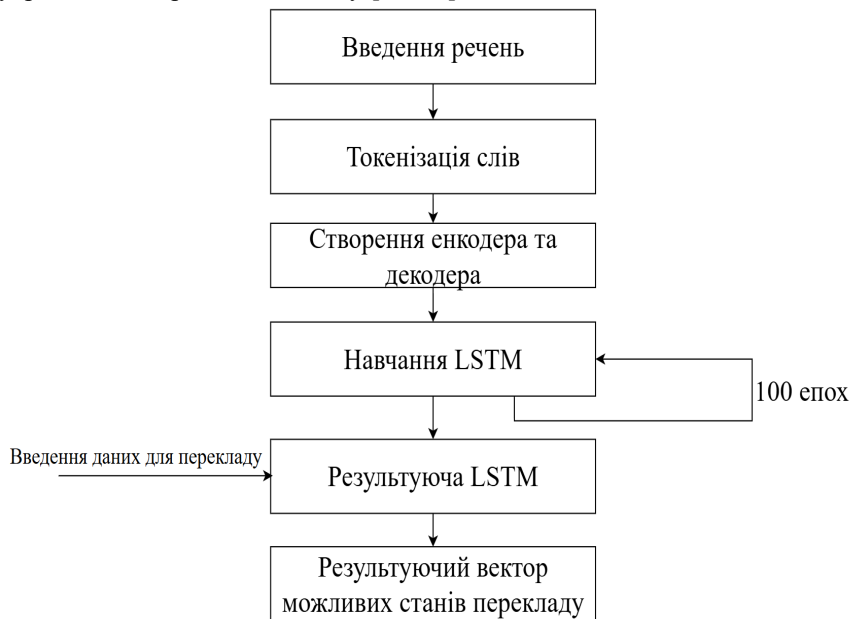


Рис. 3. Алгоритм використання LSTM неймережі для перекладу

Для тестування моделі було проведено набір експериментів. У кожному з них брали спеціально вибраний датасет, що складається з набору паралельних речень двома вибраними мовами, після чого на цьому наборі даних проходило навчання неймережі та перевірка якості перекладу. Для перевірки якості кожен набір словосполучень із початкової мови перекладали на цільову мову за допомогою неймережі. У результаті неймережа генерувала вектор, який оцінює можливі переклади. Після цього вектор значень аналізували і порівнювали з правильною відповіддю. Загальний результат – це відсоток розміру вхідного словника слів, для яких значення порогу правильно визначених завчасно вибраних відповідей було найбільшим серед усіх варіантів.

Для повного тестування проводили три різних набори експериментів:

1. Тестування на невеликій (40 речень) контрольованій вибірці підібраних речень англійською,

українською, французькою мовами і штучною мовою есперанто.

2. Тестування на більшій вибірці (40 контрольованих речень і 40 випадкових) із додаванням до першої вибірки випадкових слів і речень.

3. Тестування на великій вибірці (стрес-тести до 1100 речень у наборі) для тестування максимального часу роботи системи.

У першому наборі експериментів було проведено 12 тестувань і отримано результати, наведені в табл. 1.

Точність перекладу першого набору

	Англійська	Українська	Французька	Есперанто
Англійська	-	93.4 % (1)	96.1 % (3)	97.2 % (5)
Українська	94.7 % (2)	-	94.1 % (7)	94.6 % (9)
Французька	95.3 % (4)	93.9 % (8)	-	97.5 % (11)
Есперанто	96.8 % (6)	96.3 % (10)	96.8 % (12)	-

У таблиці подано результати експериментів. Рядок означає вихідну мову, стовпчик – цільову. У дужках описано номер експерименту, який зображено на рис. 4.

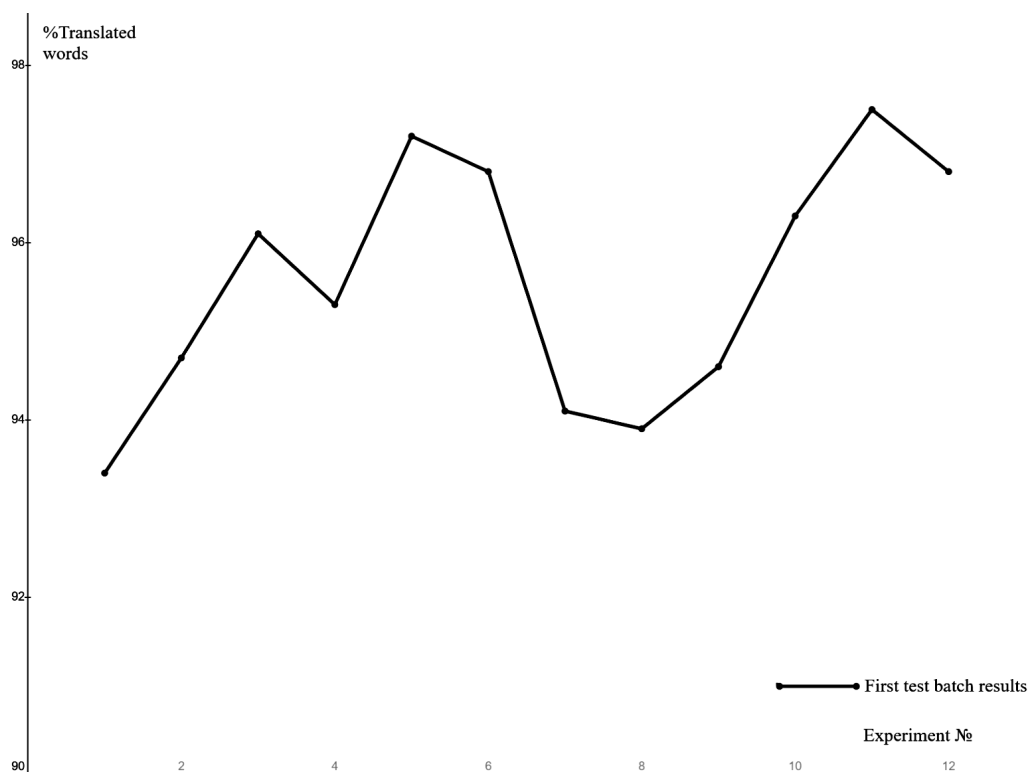


Рис. 4. Результат першого набору експериментів

У другому наборі експериментів було проведено 12 тестувань із розширеним датасетом і отримано результати, наведені в табл. 2.

Точність перекладу першого набору другого набору експериментів а

	Англійська	Українська	Французька	Есперанто
Англійська	-	89.7%(1)	92.2%(3)	92.8%(5)
Українська	90.3%(2)	-	89.6%(7)	90.5%(9)
Французька	91.1%(4)	89.2%(8)	-	92.9%(11)
Есперанто	92.7%(6)	92.1%(10)	93.0%(12)	-

Результати таблиці описано в тому самому форматі, що і табл. 1. Порівняння результатів двох наборів експериментів подано на рис. 5.

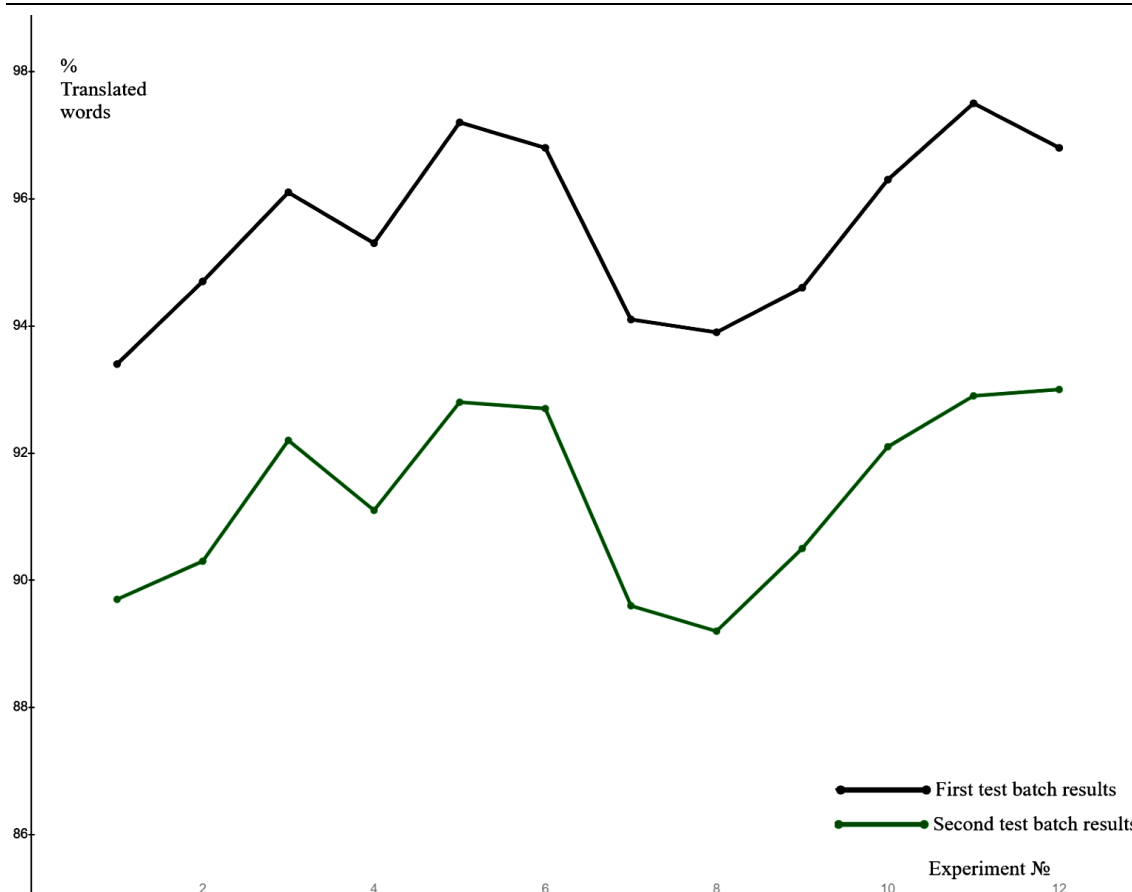


Рис. 5. Порівняльний результат першого та другого набору експериментів

У результаті ми можемо бачити, що якість перекладу досить висока, але нижча, ніж за ідеального підбору речень. Оскільки слова перетворені в числа в словнику, на результат менше впливають окремі слова, а більше впливає структура мови. І з правильним підбором речень результат роботи може бути кращим.

У третьому наборі експериментів було визначено вплив розміру датасету на час навчання однієї епохи нейромережі. Експеримент проводили на обчислювачі 13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13620H 2.40 GHz. Для проведення експериментів було вибрано штучну мову есперанто та українську мову. Отримані результати подані в табл. 3.

Час роботи третього набору експериментів

Експеримент	Кількість паралельних речень	Середній час навчання однієї епохи
1	40	2 с
2	400	15 с
3	1100	75 с

Результати у графічному вигляді подані на рис. 6.

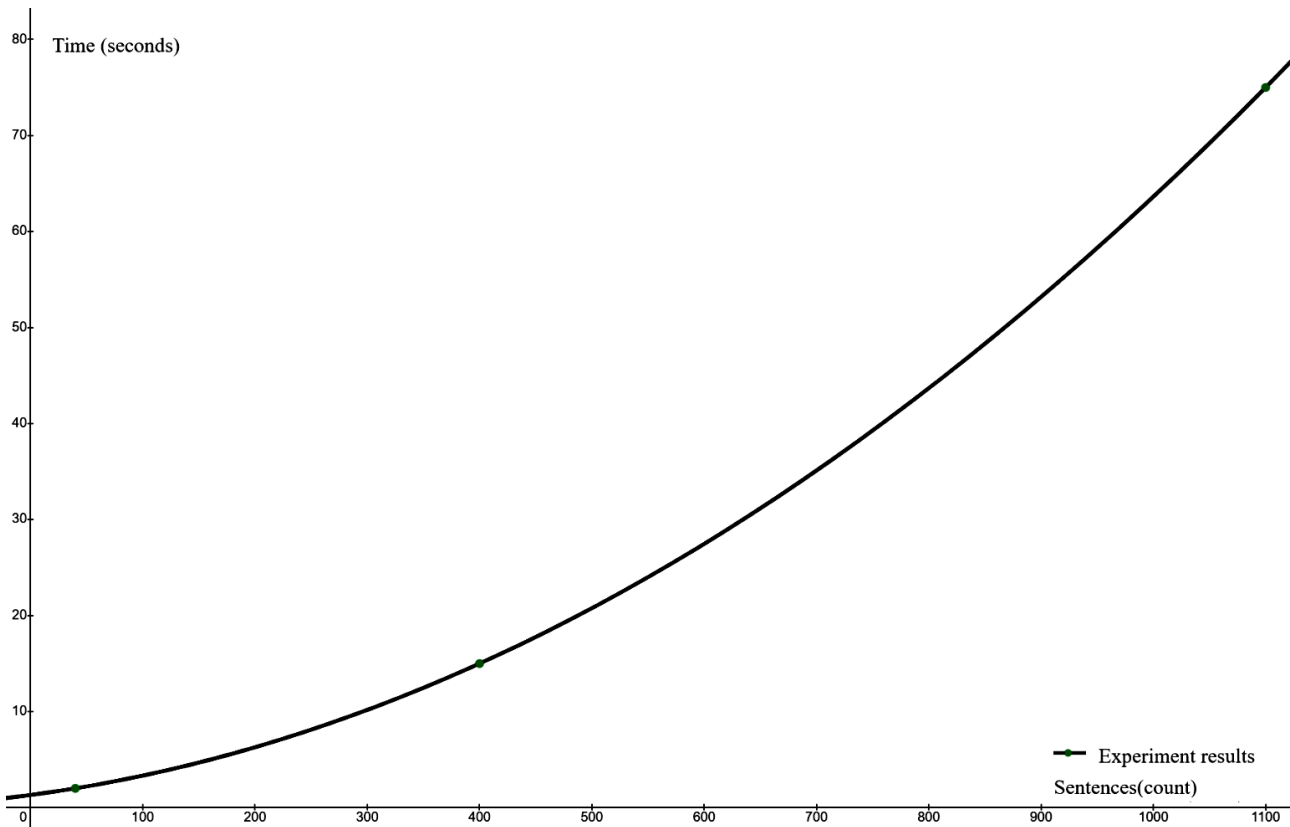


Рис. 6. Залежність часу навчання однієї епохи нейромережі від кількості вхідних речень

Як можемо бачити, зі зростанням розміру датасету час збільшується майже з квадратичною складністю. Це можна пояснити тим, що передбачення є вектором розміру зі словник вихідної мови. І зі збільшенням розміру датасету збільшується складність внутрішньої структури нейромережі. Тому цей метод не можна використовувати як основний метод перекладу, але він може бути окремим модулем для покращення результатів.

Висновки

У дослідженні вперше було розроблено інтелектуальну інформаційну систему перекладу штучних мов. У рамках дослідження вдалося досягти встановлених цілей і вирішити поставлені завдання.

Провели детальне дослідження та порівняли перекладачі. Це дало змогу визначити, які техніки перекладу найкращі для штучних мов.

Було проведено дослідження одного з модулів системи, а саме нейромережевий переклад.

У результаті ми отримали те, що нейромережевий переклад працює на всіх типах вибраних мов і показує результати до 97.5 % точності перекладу для спеціально вибраного датасету.

Список використаних джерел

Було проаналізовано максимальне навантаження на нейромережу та з'ясовано, що за великих обсягів даних час навчання однієї епохи може сягати декількох хвилин.

Ураховуючи отримані результати, можна зробити висновок, що цей метод не можна використовувати як основний метод перекладу системи для штучних мов, але він може бути окремим модулем для покращення результатів.

Наукове значення роботи полягає в поглибленні розуміння механізмів, що лежать в основі нейромерж. Викладені висновки можуть бути основою для подальших досліджень у галузі машинного навчання та розроблення інтелектуальних систем, що сприятиме прогресу у сферах штучного інтелекту і машинного перекладу.

Практична цінність цього дослідження полягає у створенні інтелектуальної інформаційної системи перекладу, що не залежить від початкових мов. Це дасть змогу використовувати автоматичний переклад для звичайних, штучних і сленгових мов без додаткових затрат.

1. Wu Yonghui et al. Google's neural machine translation system: Bridging the gap

- between human and machine translation. *arXiv preprint arXiv:1609.08144* (2016).
2. Kamaluddin Mohamad Ihsan et al. Accuracy analysis of DeepL: Breakthroughs in machine translation technology. *Journal of English Education Forum (JEEF)*. 2024. Vol. 4, No. 2.
 3. Jiang Zhaokun et al. Convergences and Divergences between Automatic Assessment and Human Evaluation: Insights from Comparing ChatGPT-Generated Translation and Neural Machine Translation. *arXiv preprint arXiv:2401.05176* (2024).
 4. Lakew Surafel M., Mauro Cettolo and Marcello Federico. A comparison of transformer and recurrent neural networks on multilingual neural machine translation. *arXiv preprint arXiv:1806.06957* (2018).
 5. Sennrich Rico and Barry Haddow. Linguistic input features improve neural machine translation. *arXiv preprint arXiv:1606.02892* (2016).
 6. He Wei et al. Improved neural machine translation with SMT features. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. 2016. Vol. 30, No. 1.
 7. Peris Álvaro, Miguel Domingo and Francisco Casacuberta. Interactive neural machine translation. *Computer Speech & Language* 45 (2017): 201-220.
 8. Gong Gangjun et al. Research on short-term load prediction based on Seq2seq model. *Energies* 12.16 (2019): 3199.
 9. Chipman Hugh A. et al. mBART: multidimensional monotone BART. *Bayesian Analysis* 17.2 (2022): 515-544.
 10. Costa-Jussà Marta R. et al. No language left behind: Scaling human-centered machine translation. *arXiv preprint arXiv:2207.04672* (2022).
 11. Havrashenko Anton and Olesia Barkovska. Analysis of text augmentation algorithms in artificial language machine translation systems. *Advanced Information Systems* 7.1 (2023): 47-53.
 12. Барковська О., Гаврашенко А., Холєв В., Севостьянова О. (2021). Automatic text translation system for artificial languages. *Computer systems and information technologies*. (3). 21-30.

Intelligent information system for translation of artificial languages

Abstract. The article is devoted to the development of an intelligent information system for translation of artificial languages using artificial intelligence methods and statistical algorithms, proposing an innovative approach to increasing the efficiency of machine translation in the conditions of dynamic development of modern technologies. The aim of the work is to develop an intelligent information system for translation of artificial languages. The research component in the proposed system is an assessment of the effectiveness of using artificial intelligence methods for the translation of artificial and ordinary languages, which can lead to a reduction in time and resource costs, as well as ensure high accuracy and reliability of the results. The work investigates the use of long short-term memory (LSTM) for translation. The results demonstrate that LSTM achieves accuracy up to 97.5 % with controlled sampling of input data, and up to 93 % on a random dataset. The results obtained confirm the effectiveness of the developed system, which allows for highly efficient translation of ordinary and artificial languages.

Keywords: machine learning, artificial intelligence, LSTM, datasets, encoder, decoder, sequence-to-sequence.

About the authors

Гаврашенко Антон Олегович, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: anton.havrashenko@nure.ua. ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-8802-0529>.

Anton Havrashenko, PhD student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: anton.havrashenko@nure.ua. ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-8802-0529>.

Барковська Олеся Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: olesia.barkovska@nure.ua. ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Olesia Barkovska, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: olesia.barkovska@nure.ua. ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

УДК 656.2:004.9:004.056:004.8

DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i4.351514>

СОТНИК В. О., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту

ХІСМАТУЛІН В. Ш., професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту

СІРОКЛИН І. М., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту

ПРИЛИПКО А. А., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту



Створення цифрового двійника залізничної мережі та його інтеграція з автоматизацією реагування на кіберзагрози SOAR на базі штучного інтелекту

Анотація. У статті обґрунтовано необхідність створення цифрового двійника залізничної мережі (ЦД) і досліджено механізми його інтеграції з передовою системою автоматизації реагування на кіберзагрози (SOAR) на базі штучного інтелекту (ШІ). В умовах тотальної цифровізації, впровадження Інтернету речей (IoT) і АСУ/СЦБ залізнична інфраструктура критично розширює поверхню для кібератак, що потребує переходу від реактивних до проактивних методів захисту.

ЦД визначено як високоточну віртуальну копію фізичної системи (колії, рухомий склад, енергопостачання, СЦБ, АСУТП і мережева інфраструктура), яка слугує інтелектуальним полігоном для кіберзахисту. Детально розглянуто основні функції ЦД: моделювання руху, моделювання інфраструктури, моделювання систем СЦБ і моделювання енергопостачання і зв'язку. Кожна з цих функцій є критично важливою для симуляції кібератак і оцінювання їхнього реального фізичного впливу на безпеку руху, наприклад спроби несанкціонованої зміни положення стрілки чи порушення зв'язку.

Система SOAR подана як головний інструмент, що забезпечує оркестровку (координацію інструментів безпеки) і автоматизацію (виконання контрзаходів за допомогою «плейбуків»), необхідну для миттєвого реагування на інциденти.

Штучний інтелект виступає в ролі «мозку» для ухвалення рішень, використовуючи ЦД для оцінювання наслідків інциденту і вибору оптимального сценарію реагування SOAR із пріоритетом: Безпека руху – Функціональність – Відновлення. Запропоновано концептуальну архітектуру та алгоритм інтеграції, що дає змогу SOAR/ШІ автоматично тестувати контрзаходи у віртуальному середовищі ЦД перед застосуванням їх у реальній мережі, мінімізуючи операційні ризики.

Наведені практичні приклади застосування елементів ЦД і ШІ на залізницях світу (Deutsche Bahn, Network Rail, Італійська Державна Залізнична Група) що підтверджують перспективність технології.

©СОТНИК В.О., ХІСМАТУЛІН В.Ш., СІРОКЛИН І.М., ПРИЛИПКО А.А., 2025

У висновку зазначено, що інтеграція ЦД, SOAR і ШІ є стратегічною необхідністю для підвищення загальної кіберстійкості та надійності залізничного транспорту, особливо в умовах постійних кібернетичних загроз.

Ключові слова: цифровий двійник, кібербезпека, симуляція кібератак, проактивний захист, залізничний транспорт.

Постановка проблеми

Сучасний залізничний транспорт переживає критичний етап технологічної трансформації – тотальну цифровізацію, що включає масове впровадження Інтернету речей (IoT), а також масштабну інтеграцію автоматизованих систем управління (АСУ) і сучасних систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Ці інновації, хоча й обіцяють значне підвищення ефективності та пропускної спроможності, водночас кардинально розширюють поверхню для кібератак. Критична залізнична інфраструктура стає однією з головних мішеней для кіберзагроз, які можуть призвести до катастрофічних наслідків, включаючи порушення графіків, економічні втрати і пряму загрозу безпеці руху пасажирів і персоналу. Традиційні, реактивні методи захисту виявляються недостатньо ефективними та надто повільними у високошвидкісному залізничному середовищі, оскільки сучасні кібератаки є складними і швидко проникають у системи оперативного управління. Це створює гостру необхідність у проактивному, повністю автоматизованому та інтелектуальному захисті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що основним напрямом у відповідь на ці виклики є використання цифрового двійника (ЦД) залізничної мережі та інтеграція його з передовими системами реагування на кіберзагрози. Цифровий двійник (ЦД), визначений як високоточна віртуальна копія фізичної системи (колії, рухомий склад, енергопостачання, СЦБ, АСУТП і мережева інфраструктура), слугує інтелектуальним полігоном, даючи змогу імітувати кібератаки в безпечному середовищі та оцінювати їхній потенційний фізичний вплив на безпеку руху, наприклад спробу несанкціонованої зміни положення стрілки. Функціями ЦД є моделювання руху, моделювання інфраструктури, моделювання систем СЦБ, енергопостачання та зв'язку, які є найбільш критичними щодо безпеки.

SOAR (Security Orchestration, Automation, and Response) – це технологічний підхід, що забезпечує перехід від ручного оброблення інцидентів до автоматизованого. Система SOAR є головним інструментом, який забезпечує координацію різноманітних інструментів безпеки (брандмауери, SIEM, ЦД) для логічного робочого процесу та виконання контрзаходів за допомогою заздалегідь визначених або динамічно згенерованих сценаріїв,

відомих як «плейбуки», для миттєвого реагування на інциденти.

Штучний інтелект (ШІ) використовують у SOAR як «мозок» для ухвалення рішень. ШІ використовує ЦД для оцінювання наслідків інциденту і вибору оптимального сценарію реагування з пріоритетом: Безпека руху → Функціональність → Відновлення. ШІ реалізований через машинне навчання та нейромережі для виявлення аномалій, класифікації інцидентів і автоматичного формування плейбуків.

Світовий досвід підтверджує перспективність технології. Ряд країн, таких як Німеччина, Велика Британія, Італія, ведуть активні розробки та впровадження в цьому напрямі. Створюють фотореалістичні ЦД для навчання ШІ, які аналізують середовище та реагують на нетипові події, а також оптимізують диспетчерське управління. Використовують ЦД також для управління інфраструктурою та складними проєктами модернізації.

Наукова думка і практичний досвід залізничних операторів зосереджені на трьох цих взаємопов'язаних технологічних стовпах для забезпечення кіберстійкості. Основний тренд полягає в синергетичному об'єднанні цих трьох технологій, що допомагає залізничному транспорту перейти до проактивного, інтелектуального кіберзахисту, який може самостійно виявляти, оцінювати і нейтралізувати загрози.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми

Загальна проблема полягає в переході до проактивного, інтелектуального захисту критичної залізничної інфраструктури в умовах зростаючих кіберзагроз. Хоча необхідність інтеграції ЦД, SOAR і ШІ визнана як стратегічна, невирішеною частиною залишається детальна, практична реалізація цієї синергії, урахування відсутності загальноприйнятої концептуальної архітектури і алгоритму інтеграції, який би давав змогу системі SOAR/ШІ автоматично тестувати контрзаходи у віртуальному середовищі ЦД перед їх застосуванням у реальній мережі. Існуючі методи потребують розроблення чітких механізмів двостороннього обміну інформацією між ЦД і SOAR, де ЦД надає контекст фізичної безпеки, а SOAR використовує ЦД для симуляційного відтворення інциденту і верифікації плейбуків. Іншою недостатньо розв'язаною проблемою є необхідність розроблення уніфікованих протоколів обміну даними між ЦД і SOAR і вдосконалення моделей ШІ, які були б здатні прогнозувати складні, багатоступінні кібератаки та керувати рішеннями SOAR із пріоритетом «Безпека

руху – Функціональність – Відновлення». Проблемою впровадження ЦД також є високі фінансові інвестиції, потреба у великих обсягах якісних даних і, що особливо складно, точне моделювання логіки систем залізничної автоматики (СЦБ та АСУТП).

Постановка завдання

Мета цієї статті полягає в детальному обґрунтуванні необхідності розроблення концептуальної архітектури створення цифрового двійника залізничної мережі, а також дослідженні та формулюванні механізмів його інтеграції з передовою системою SOAR.

Для досягнення цієї мети необхідно обґрунтувати необхідність створення ЦД для підвищення кіберстійкості залізничної інфраструктури в умовах цифровізації та зростання кіберзагроз і детально розглянути і описати основні функції ЦД, критично важливі для кіберзахисту. Також необхідно дослідити і навести принципи роботи і компоненти системи SOAR (оркестровка та автоматизація) і роль штучного інтелекту в ній, запропонувати концептуальну архітектуру інтеграції ЦД і SOAR на базі ШІ, включаючи механізми двосторонньої взаємодії (ЦД → SOAR: контекст фізичної безпеки; SOAR → ЦД: симуляція для верифікації контрзаходів). Також надзвичайно важливим є розроблення алгоритму, який використовує результати симуляції в ЦД для вибору оптимального сценарію реагування SOAR із пріоритетом: Безпека руху – Функціональність – Відновлення.

1. Вступ

Сучасний залізничний транспорт у всьому світі, зокрема в Україні, знаходиться на критичному етапі технологічної трансформації, відомому як цифровізація. Для цього процесу характерні інтенсивне впровадження передових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), який охоплює рухомий склад та інфраструктуру, а також масштабна інтеграція автоматизованих систем управління (АСУ) і сучасних систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), що гарантують безпеку та ефективність руху поїздів [3]. Ці інновації, хоча й обіцяють значне підвищення пропускної спроможності, оптимізацію витрат і покращення обслуговування, водночас кардинально розширюють поверхню для кібератак [1].

Як наслідок, критична залізнична інфраструктура стає однією з головних мішеней для кіберзагроз, які можуть мати катастрофічні наслідки – від порушення графіків руху та значних економічних втрат до прямої загрози безпеці пасажирів і персоналу. Існуючі традиційні методи захисту, що зазвичай покладені на реактивне виявлення загроз і ручну обробку інцидентів, виявляються недостатньо ефективними та занадто повільними в динамічному, високошвидкісному залізничному середовищі. Сучасні кібератаки є складними, багатоетапними та здатними швидко проникати в системи оперативного

управління. Отже, виникає гостра, невідкладна необхідність у проактивному, повністю автоматизованому та інтелектуальному захисті [2].

Ураховуючи ці виклики, основним напрямом розвитку стає створення цифрового двійника залізничної мережі (ЦД). ЦД – це високоточна віртуальна копія реальної фізичної системи, яка включає моделі колії, рухомого складу, енергопостачання, а головне – моделі систем СЦБ, АСУТП і мережевої інфраструктури, які є об'єктами кібератак [2]. Використання ЦД дає змогу імітувати кібератаки в безпечному віртуальному середовищі, оцінювати їхній потенційний вплив на реальні процеси (наприклад на роботу стрілочних переводів чи безпеку руху поїздів), і в такий спосіб тестувати і вдосконалювати контрзаходи для їх застосування на реальній мережі [12].

Мета цієї статті полягає в детальному обґрунтуванні необхідності та розробленні концептуальної архітектури створення такого цифрового двійника залізничної мережі, а також дослідженні механізмів його інтеграції з передовою системою SOAR (Security Orchestration, Automation, and Response). Інтеграція має бути побудована на базі алгоритмів штучного інтелекту (ШІ), що допоможе створити самоналагоджувальну систему, здатну не просто реагувати на інциденти, а й прогнозувати їх, оцінювати ризики через симуляції в ЦД і миттєво застосовувати оптимальні автоматизовані сценарії реагування [4]. Така синергія ЦД, SOAR і ШІ є вирішальною для підвищення загальної кіберстійкості залізничного транспорту.

У статті послідовно розглянуто теоретичні засади ЦД, принципи роботи SOAR, роль ШІ у цьому комплексі, запропоновано архітектуру інтеграції та проаналізовано практичні сценарії її застосування [3].

2. Теоретичні основи цифрового двійника залізничної мережі

В умовах тотальної цифровізації залізничного транспорту концепція цифрового двійника набуває стратегічного значення як фундаментальний інструмент управління, оптимізації та, що особливо важливо, забезпечення кібербезпеки [2]. ЦД являє собою високоточну віртуальну репліку фізичних активів, процесів і систем, що допомагає аналізувати, моделювати і прогнозувати їхню поведінку в реальному часі [7]. Цифровий двійник у контексті залізниці – це динамічна, інтегрована віртуальна модель, яка відображає фізичний стан, функціональність і взаємозв'язки усіх основних елементів залізничної мережі [2]. Розглянемо основні функції ЦД.

Моделювання руху – це процес створення високоточної, динамічної віртуальної симуляції всіх аспектів переміщення рухомого складу та пов'язаних із ним операцій на мережі в реальному часі [10]. Ця функція є багатогранною і потребує інтеграції даних від усіх підсистем залізниці. Функція охоплює віртуальне відтворення таких основних елементів, як

рухомий склад, інфраструктура, диспетчерські рішення та зовнішні фактори. Ефективність моделювання руху ЦД залежить від постійної синхронізації з фізичною мережею через системи СЦБ, системи позиціонування, системи управління рухомим складом і АСУ диспетчеризації. ЦД використовує ці дані, щоб постійно корегувати свою віртуальну модель, забезпечуючи «живий» двійник руху. Моделювання руху виконує ряд критично важливих завдань, таких як прогноз графіка руху, аналіз сценаріїв, оптимізація енергоспоживання, аналіз пропускної спроможності дільниць та інше [9].

Моделювання руху є критично важливим для інтеграції з кібербезпекою. Якщо система SOAR виявляє кібератаку на СЦБ (наприклад спробу несанкціонованої зміни положення стрілки), ЦД негайно симулює цю зміну у своєму середовищі [5]. Це дає змогу миттєво оцінити реальний фізичний наслідок атаки (призведе це до зіткнення чи лише затримки, чи зможе система безпеки цьому запобігти) [12]. ШІ, що керує SOAR, використовує дані моделювання руху з ЦД, щоб визначити пріоритет інциденту: атака, що загрожує безпеці руху, отримає

найвищий пріоритет і викличе найбільш агресивний автоматичний плейбук SOAR (наприклад аварійне відключення певного сегмента мережі) [3]. Перед тим як SOAR застосує контрзахід (наприклад ізоляцію певного мережевого сегмента), ЦД може швидко промоделювати, як це вплине на графік руху (наприклад чи зупиняться інші поїзди), забезпечуючи, що рішення про кібербезпеку не спричинить значних операційних збоїв, якщо це не необхідно для безпеки [8].

Моделювання інфраструктури. Функція моделювання інфраструктури є основною частиною цифрового двійника залізничної мережі. Вона забезпечує створення статичної та динамічної віртуальних копій всіх фізичних активів, які не є рухомим складом, але критично важливі для функціонування та безпеки руху [11]. Ця функція виходить за рамки простого 3D-моделювання, інтегруючи інженерні, геометричні, експлуатаційні та діагностичні дані. Моделювання інфраструктури охоплює створення детальних віртуальних моделей основних фізичних активів (табл. 1).

Таблиця 1

Фізичні активи моделювання інфраструктури залізничної мережі

Категорія активу	Елемент моделювання	Критичний параметр
Колійне господарство	Колії, земляне полотно, баластна призма, шпали	Геометрія колії (профіль, план), знос рейок, наявність дефектів (тріщини, відколи), допустиме навантаження
Штучні споруди	Мости, шляхопроводи, тунелі, водопропускні труби	Несуча здатність, рівень деформації, вік, результати останніх інспекцій.
Об'єкти СЦБ	Стрілочні переводи, світлофори, колійні датчики, рейкові кола, переїзди	Фактичний технічний стан (нагрів, вібрація), швидкість спрацювання, логіка керування
Енергопостачання	Контактна мережа, тягові підстанції, трансформатори	Напруга, струм, знос контактного дроту, теплові режими роботи обладнання
Станційні об'єкти	Платформи, вокзали, депо	Розміри, пропускна спроможність, навантаження

Точність і актуальність ЦД залежить від безперервного потоку даних у реальному часі, що надходять від діагностичних систем, сенсорів IoT, системи SCADA, BIM-моделі (використання інформаційних моделей будівель (Building Information Modeling)) [13]. ЦД забезпечує синхронізацію цих різномірних даних для створення єдиної, цілісної картини стану інфраструктури. Моделювання інфраструктури використано для прогнозного технічного обслуговування, аналізу навантаження та ресурсів, оцінювання впливу змін [9].

Моделювання інфраструктури є життєво необхідним для кібербезпеки. Це дає можливість зрозуміти, як кібератака вплине на логіку керування (наприклад втручання в АСУТП енергопостачання або СЦБ), її фізичну структуру, наприклад призведе атака до перевантаження підстанції чи некоректного спрацювання стрілочного перевodu, що загрожує безпеці руху [12]. ЦД допомагає виявити слабкі місця,

де кібератака може завдати максимальної фізичної шкоди, що дає змогу системі SOAR пріоритетизувати захист найбільш критичних елементів інфраструктури. Після виявлення атаки ЦД може симулювати сценарії аварійного відновлення чи переконфігурації об'єктів інфраструктури (наприклад перемикання на резервну лінію енергопостачання), забезпечуючи, що дії системи SOAR не спричинять додаткових пошкоджень або ризиків [8].

Моделювання систем СЦБ (сигналізація, централізація, блокування). Ця функція є найбільш критичною з точки зору безпеки та кіберстійкості в цифровому двійнику залізничної мережі, оскільки ці системи безпосередньо контролюють рух поїздів і запобігають їх зіткненням [5]. Це не просто віртуальне відображення обладнання, а точна симуляція логіки, алгоритмів і взаємозалежностей, що забезпечують безвідмовну роботу систем залізничної автоматики. Моделювання СЦБ у ЦД охоплює

віртуальне відтворення чотирьох головних рівнів, що забезпечують безпеку руху (табл. 2).

Таблиця 2

Рівні моделювання СЦБ

Рівень СЦБ	Елемент моделювання	Основна функція в ЦД
Сигналізація	Світлофори, логіка їхніх показань	Симуляція залежності показань від зайнятості колій і встановлених маршрутів
Централізація	Маршрутно-релейна, мікропроцесорна або комп'ютерна централізація	Точне відтворення логіки блокування (взаємозалежності між стрілками та світлофорами) і механізму встановлення маршрутів
Блокування	Автоматичне колійне блокування, системи ERTMS/ETCS	Моделювання системи контролю цілісності колії та розмежування рухомого складу на перегонах
Пристрої керування	Стрілочні переводи, рейкові кола, датчики шляху	Моделювання фізичного стану (час переведення стрілки, справність рейкового кола) та електричної взаємодії

Для забезпечення точності ЦД систем СЦБ використовують дані від мікропроцесорних і релейних систем СЦБ (дані про фактичний стан логічних елементів, встановлені маршрути і помилки), діагностичних комплексів (інформація про технічний стан елементів (наприклад струми, напруги, час спрацювання реле чи стрілочних приводів)), конфігураційних файлів (завантаження фактичної програмної логіки (залежностей) із мікропроцесорних систем СЦБ у віртуальне середовище. ЦД забезпечує динамічну реплікацію: будь-яка зміна в реальній системі СЦБ (наприклад встановлення маршруту диспетчером) миттєво буде відображено у віртуальній моделі) [5].

Моделювання СЦБ є незамінним для тестування нової чи зміненої логіки СЦБ перед її впровадженням у реальну систему. Це допомагає виявити логічні помилки, які можуть призвести до небезпечних ситуацій (наприклад маршрут встановлений на зайняту колію), симуляції відмов обладнання (наприклад несправність рейкового кола, відмова стрілочного привода) та оцінювання реакції резервних систем і оператора та моделювання впливу швидкості спрацювання СЦБ на пропускну спроможність станції та залізничної дільниці [14].

Крім того, моделювання СЦБ є найважливішим компонентом для кіберзахисту критичної залізничної інфраструктури. Якщо кібератака спрямована на зміну логіки СЦБ (наприклад зловмисник намагається змінити показання світлофора або перевести стрілку), ЦД негайно відтворює цю атаку в симуляційному середовищі [12]. Це дає змогу ШІ/SOAR миттєво

оцінити, чи призведе ця віртуальна зміна до небезпечного фізичного сценарію (зіткнення, сходження з рейок). Також це допомагає системі SOAR тестувати свої автоматизовані контрзаходи (наприклад ізоляція інфікованого пристрою, переведення системи в безпечний стан) у ЦД, гарантуючи, що ці дії не створять додаткової загрози безпеці руху. ЦД використано для генерації тисяч синтетичних сценаріїв кібератак на СЦБ, які неможливо створити в реальному середовищі. Ці дані використовують для навчання алгоритмів ШІ системи SOAR розпізнавати навіть найменші аномалії в роботі критичної логіки [4]. Крім того, ЦД надає SOAR критичний контекст безпеки руху. Іншими словами, інцидент, пов'язаний із СЦБ, який створює пряму загрозу безпеці, буде автоматично пріоритетований вище, ніж інцидент, що стосується лише офісної мережі, що є основою для ефективного автоматизованого реагування [6].

Моделювання енергопостачання та зв'язку.

Моделювання енергопостачання та зв'язку в цифровому двійнику залізничної мережі є критично важливим, оскільки воно відображає життєзабезпечувальні системи, без яких неможливий рух поїздів, робота СЦБ і передавання критичних даних [11]. Ця функція зосереджена на динамічному відтворенні мережевих, електричних і комунікаційних параметрів. Моделювання енергопостачання охоплює всі елементи, що забезпечують живлення рухомого складу і стаціонарних об'єктів: контактну мережу та електрифікацію, тягові підстанції (ТП) і роздільні пункти, енергопостачання непрофільних споживачів. Кібератаки, спрямовані на системи управління

підстанціями (SCADA/АСУ ТП), можуть призвести до відключення живлення критичних ділянок. ЦД симулює цей сценарій, показуючи, як швидко зупиняться поїзди та як відмовлять системи СЦБ [12]. ЦД дає змогу також SOAR/ШІ змодельовати, чи зможе автоматичне перемикання на резервну лінію (як контрзахід проти атаки) бути виконане без збою в електропостачанні, що є необхідним для безпеки [8]. На основі моделювання енергосистеми ШІ може ухвалити рішення: у разі кібератаки краще повністю відключити живлення для локалізації чи перевести навантаження на сусідню підстанцію [4].

Моделювання зв'язку відображає мережеву топологію і трафік, необхідний для роботи всіх критичних систем. У цьому випадку предметом та об'єктом моделювання є мережева топологія, протоколи і трафік, бездротовий зв'язок (GSM-R/LTE-R). ЦД допомагає змодельовати кібератаки, спрямовані на порушення комунікацій: DDoS-атаки, сканування мережі, маніпуляція пакетами, компрометація маршрутизаторів [12]. Основним є моделювання того, як втрата зв'язку на певній ділянці (наприклад між пристроєм СЦБ і центром керування) вплине на функціонування (наприклад перейде поїзд у безпечний режим «стоп» чи, навпаки, втратить контроль) [5]. Система SOAR може автоматично генерувати контрзаходи (наприклад застосування правил брандмауера, ізоляція інфікованого сегмента). ЦД моделює, чи не порушить ця ізоляція критичний зв'язок між іншими безпечними системами, гарантуючи, що кіберзахист не призведе до операційного колапсу [3]. ШІ використовує модель нормального трафіку ЦД для виявлення найменших аномалій, що можуть свідчити про початок атаки (наприклад нетиповий обсяг чи тип даних, що передано на пристрої СЦБ) [4]. Отже, моделювання енергопостачання та зв'язку забезпечує контекст життєзабезпечення, даючи змогу системі SOAR на базі ШІ ухвалювати рішення, що є обґрунтованими як із точки зору кібербезпеки, так і операційної цілісності та безпеки руху поїздів [9].

ЦД – це потужна платформа для тестування змін, оптимізації ресурсів та, що є головним для цієї статті, аналізу вразливостей і симуляції кібератак [15].

Складові елементи ЦД залізничної мережі. Для забезпечення комплексної та функціональної реплікації реального середовища, ЦД залізниці має включати кілька взаємопов'язаних рівнів моделей:

1. Моделі фізичних активів. Ці моделі є фізичними об'єктами, які можна безпосередньо атакувати або вплив на які є критичним для функціонування:

- колії (геометрія, стан);
- рухомий склад (локомотиви, вагони);
- стрілочні переводи та інші виконавчі пристрої [16].

2. Моделі систем управління та автоматики. Відображають логіку роботи і

взаємодію керуючих систем, які забезпечують безпеку та оперативність:

- системи європейської системи управління залізничним рухом (ERTMS/СЦБ);
- автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) [5].

3. Моделі кіберпростору. Цей рівень є вирішальним для питань кібербезпеки, оскільки він моделює шлях, яким може бути здійснена атака:

- мережева топологія (маршрутизатори, комутатори, мережеві сегменти);
- комунікаційні протоколи, що використані в залізничних системах (наприклад Modbus, OPC UA, протоколи СЦБ) [12].

Інтеграція ЦД є важливим кроком для створення системи проактивної кібербезпеки. Головна перевага полягає в можливості імітації кібератак і оцінювання їхнього впливу на реальні процеси (безпека руху) [12]. Це дає змогу моделювати «що, якщо», виявляти приховані вразливості в системах СЦБ і АСУТП до того, як їх використає зловмисник, тестувати сценарії кібератак, наприклад спробу дистанційного переведення стрілки, та оцінювати реальні фізичні наслідки цього втручання, розробляти і перевіряти контрзаходи та сценарії відновлення в безпечному віртуальному середовищі без жодного ризику для реальної залізничної мережі [8].

Отже, ЦД перетворюється з простого інструменту моделювання на інтелектуальний полігон для кіберзахисту, який є основою для інтеграції з передовими системами реагування [17].

3. Кібербезпека залізничної інфраструктури та концепція SOAR (Security Orchestration, Automation, and Response)

Питання кібербезпеки набуває першочергового значення для залізничного транспорту, який сьогодні є високоавтоматизованою критичною інфраструктурою. Зростання залежності від цифрових технологій потребує переходу від традиційних, реактивних методів захисту до проактивних, інтелектуальних систем реагування [2].

Залізнична інфраструктура є унікальною мішенню, оскільки кібератаки на неї можуть мати прямі фізичні наслідки. Специфіка кіберзагроз на залізниці полягає у спрямованості атак на критичні системи, такі як системи СЦБ, автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП), системи диспетчеризації [12]. Отже, потенційний вплив кібератак на залізниці не лише стосується фінансових втрат, але і загрожує безпеці руху та графіка.

В умовах зростання кількості кіберінцидентів необхідний інструмент, здатний оперативно та ефективно обробляти великі масиви даних і автоматично реагувати на загрози. Цим інструментом є концепція SOAR. Вона являє собою технологічний підхід, що забезпечує перехід від ручного оброблення інцидентів до автоматизованого [3]. Основним компонентом SOAR є **оркестровка**. Це

фундаментальна складова SOAR, що по суті є координаційним центром системи кібербезпеки. Вона забезпечує ефективну взаємодію та управління різнорідними, часто роз'єднаними інструментами безпеки та ІТ-системами, які функціонують у залізничній мережі. Оркестровка – це технологічний процес, що об'єднує та координує виконання завдань і функцій кількох різних інструментів безпеки (таких як брандмауери, системи виявлення вторгнень (IDS), системи SIEM, антивірусні сканери, системи контролю доступу тощо) для досягнення спільної мети [3]. Ця складова SOAR має головну відмінність порівняно з простою автоматизацією: автоматизація виконує окремі завдання, наприклад блокує одну підозрілу IP-адресу, а оркестровка координує послідовність цих завдань, забезпечуючи логічний робочий процес.

На залізничному транспорті, де існує величезна кількість критичних систем (від офісної мережі до АСУТП енергопостачання та СЦБ), оркестровка відіграє вирішальну роль, оскільки створює єдиний центр управління, забезпечує контекстуалізацію (збирає інформацію про інцидент з усіх відповідних систем: від SIEM (для даних кіберпростору) до цифрового двійника (для контексту фізичного впливу) і систем управління активами (для визначення важливості пристрою)) і підтримує безпеку руху [12].

Оркестровка як функція реалізована через API-інтерфейси (механізми для зв'язку системи SOAR з іншими системами безпеки та ІТ-інструментами), робочі процеси (візуальне подання логічних послідовностей дій, які має виконати система у відповідь на інцидент) і централізовану базу знань (зберігання інформації про інструменти, їхні можливості та протоколи взаємодії) [3].

Отже, оркестровка є тим «диригентом», який гарантує, що всі інструменти кібербезпеки в динамічному середовищі залізниці працюють злагоджено, швидко і, найголовніше, з урахуванням безпеки руху.

Автоматизація є другою важливою складовою концепції SOAR і прямим виконавчим механізмом, який реалізує координаційні вказівки, визначені оркестровою.

Це технологія, що дає змогу виконувати рутинні, повторювані та часто залежні від часу завдання у сфері кібербезпеки без прямої участі людини-аналітика. Вона використовує заздалегідь визначені або динамічно згенеровані сценарії, відомі як «плейбуки», для миттєвого реагування на інциденти. Сутність автоматизації полягає у швидкості та масштабованості. В умовах, коли аналітик витрачає години на збір інформації, аналіз і виконання контрзаходів, автоматизація виконує ті самі дії за секунди або мілісекунди.

Автоматизація в SOAR охоплює два основні типи завдань – автоматизацію збору даних, збагачення контексту і автоматизацію реакції і усунення наслідків. **На першому етапі** після

виявлення інциденту автоматизація виконує рутинні перевірки: *збір інформації* (автоматичний запит до внутрішніх систем (наприклад SIEM, системи управління активами, цифровий двійник) для отримання повних даних про атакований пристрій), *розвідка загрози* (автоматична перевірка підозрілих IP-адрес, хешів файлів чи доменних імен у зовнішніх базах даних загроз), *перевірка журналів* (автоматичний пошук по журналах (логін) на інших пристроях для визначення масштабу компрометації). **На другому етапі** виконувани безпосередні дії, спрямовані на локалізацію та нейтралізацію загрози: *мережеві контрзаходи* (автоматичне блокування трафіку з підозрілих IP-адрес на брандмауерах), *управління кінцевими точками* (віддалений запуск антивірусного сканування, ізоляція інфікованого пристрою в окремий мережевий сегмент), *управління ідентичністю* (автоматичне скидання паролів або блокування облікових записів, які були скомпрометовані), *взаємодія з ЦД* (автоматичне ініціювання симуляції інциденту в цифровому двійнику для оцінювання фізичного ризику) [3, 8].

Хоча терміни часто плутають, вони мають чітке розмежування: оркестровка визначає послідовність дій, які потрібно виконати, і з'єднує необхідні інструменти (*диригент*), а автоматизація виконує самі завдання у визначеній послідовності без втручання людини (*виконавець*). Оркестровка створює логічний потік, а автоматизація наповнює його технічним змістом і швидкістю.

Впровадження автоматизації є життєво необхідним для залізничного транспорту через такі фактори, як необхідність миттєвої реакції, гарантування безпеки руху як пріоритету і зниження людського фактора в технологічному процесі [12]. Завдяки автоматизації SOAR перетворює процес кібербезпеки на ефективну, високошвидкісну та надійну систему, здатну захищати критичну інфраструктуру в режимі 24/7. SOAR допомагає значно скоротити час реагування, підвищити точність рішень і звільнити експертів-аналітиків для вирішення найскладніших, нетипових завдань.

Інтеграція штучного інтелекту в SOAR є необхідною умовою для створення по-справжньому проактивної та інтелектуальної системи безпеки. ШІ забезпечує когнітивні можливості, які дають змогу автоматизації вийти за межі простих, попередньо визначених правил. Роль ШІ в SOAR реалізована через машинне навчання (МН) для виявлення аномалій і прогнозування загроз, нейромережі – для класифікації інцидентів і визначення пріоритетів та автоматичного формування «плейбуків» (сценаріїв реагування) [4]. Використання ШІ перетворює SOAR на адаптивну систему, яка здатна не тільки автоматично реагувати, але й постійно вчитися та самовдосконалюватися [1].

4. Інтеграція цифрового двійника та SOAR на базі ШІ

Інтеграція цифрового двійника залізничної мережі із системою SOAR на базі штучного інтелекту є важливою для підвищення кіберстійкості. Ця синергія дає змогу вийти за межі обмежень існуючих методів захисту, використовуючи ЦД як полігон для імітації кібератак і оцінювання їхнього впливу на безпеку руху без ризику для реальної мережі [2].

Інтеграція цифрового двійника та SOAR на базі ШІ створює комплексний цикл кіберфізичного захисту, що складається з трьох основних елементів (рис. 1) [11].

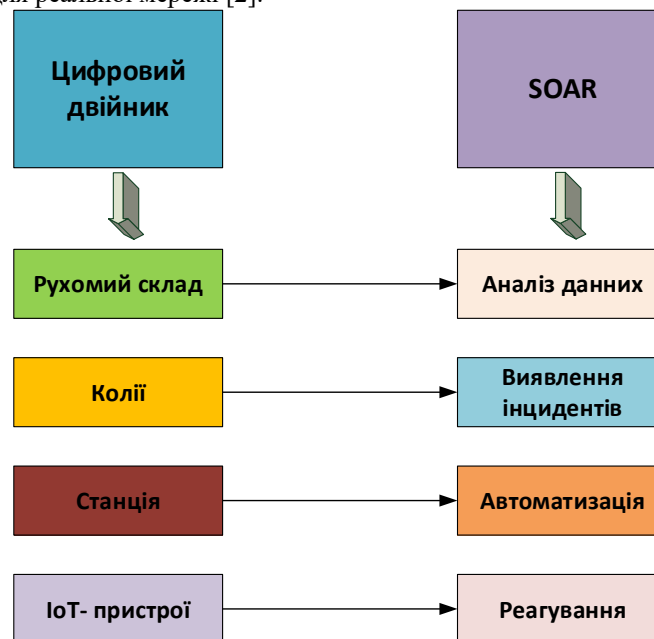


Рис. 1. Архітектура інтеграції цифрового двійника та SOAR на базі ШІ для залізничної мережі

1. **Цифровий двійник** використовують як середовище моделювання та аналізу контексту. Він надає віртуальну копію фізичних активів (колії, рухомий склад, стрілочні переводи), систем управління (ERTMS/СЦБ, АСУТП) і кіберпростору (мережева топологія, протоколи) [7].

2. **Система SOAR** діє як система реагування, що відповідає за оркестровку, автоматизацію та виконання контрзаходів [3].

3. **Штучний інтелект** виконує функцію «мозку» для ухвалення рішень, забезпечуючи інтелектуальну ланку між ЦД та SOAR [4].

Ефективність системи залежить від двостороннього обміну інформацією між ЦД та SOAR (рис. 2).

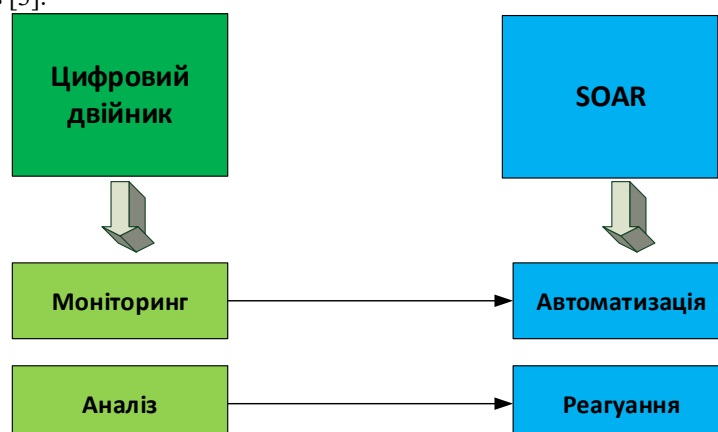


Рис. 2. Механізми взаємодії цифрового двійника та SOAR на базі ШІ для залізничної мережі

ЦД → SOAR: контекст фізичної системи. На цьому етапі ЦД надає SOAR точний, життєво важливий контекст про поточний стан фізичних систем. У разі виявлення кіберінциденту SOAR звертається до ЦД, щоб оцінити фізичні наслідки. Наприклад, ЦД може відповісти на запитання «чи вплине відключення комутатора X на безпеку руху поїзда Y?». Ця інформація допомагає SOAR, керованому ШІ, коректно класифікувати інцидент і визначити його реальний пріоритет: кібератака на офісну мережу має менший пріоритет, ніж атака на СЦБ, яка загрожує зіткненням [12].

SOAR → ЦД: симуляційне відтворення інциденту. Цей механізм використовують для верифікації та тестування контрзаходів. SOAR передає дані про виявлені інциденти для їхнього симуляційного відтворення в безпечному середовищі ЦД. Це дає змогу імітувати наслідки кібератаки,

наприклад спробу несанкціонованої зміни сигналу чи переведення стрілки. Перед застосуванням будь-яких автоматизованих контрзаходів (плейбуків) (наприклад ізоляція мережевого сегмента) їх спочатку тестують у ЦД. Це гарантує, що дія SOAR не призведе до небажаних операційних чи безпекових наслідків [8].

Штучний інтелект є «мостом», що забезпечує розумну взаємодію між віртуальним середовищем цифрового двійника залізничної мережі та системою автоматизованого реагування SOAR. Цей інтегрований підхід створює адаптивну систему, здатну як автоматично реагувати на загрози, так і проактивно їх прогнозувати, використовуючи ЦД як віртуальний полігон для ухвалення оптимальних рішень у режимі реального часу [15].

Сам алгоритм реалізовано через етапи, зображені на рис. 3.

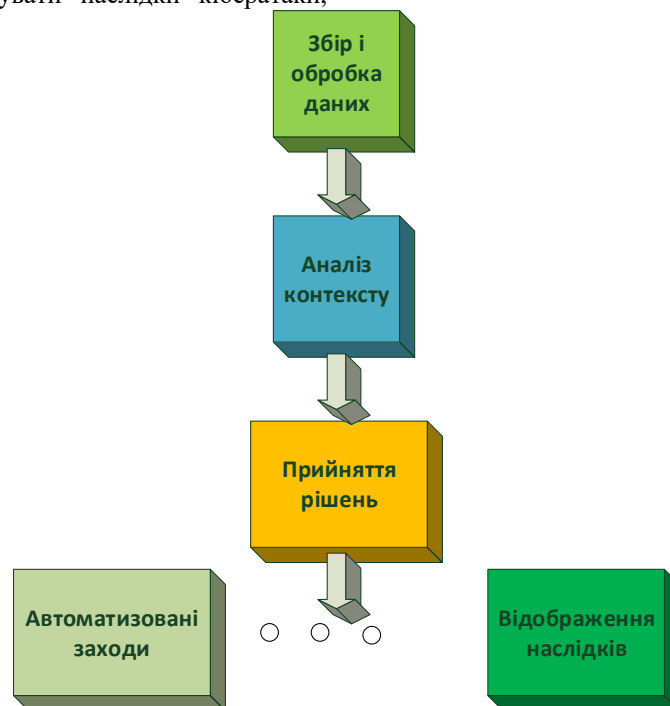


Рис. 3. Алгоритм ШІ для інтеграції ЦД та SOAR у залізничну інфраструктуру

Етап 1. Збір і обробка даних. На цьому початковому етапі збирають дані з реальної залізничної мережі, що необхідні для симуляції та аналізу [6].

Етап 2. Аналіз контексту. Зібрані дані аналізують для визначення контексту інциденту чи ситуації. Нейромережі допомагають на цьому етапі, класифікуючи інциденти і визначаючи їхні пріоритети [4].

Етап 3. Ухвалення рішення. Це критичний етап, який ґрунтований на симуляції в ЦД. На цьому етапі ШІ використовують для оцінювання наслідків інциденту, який був промодельований у віртуальному середовищі ЦД. На основі цього ШІ вибирає оптимальний сценарій реагування SOAR. При цьому

вибір завжди керований чітким пріоритетом: **Безпека руху – Функціональність – Відновлення** [12].

Після ухвалення рішення відбувається реалізація **автоматизованих заходів** (запускають відповідні сценарії реагування SOAR, вибрані ШІ, для усунення загрози чи інциденту) і **відображення наслідків** (результати виконання заходів фіксують і аналізують) [3].

Для підтримки актуальності та ефективності алгоритму необхідне **динамічне оновлення ЦД**. Застосування машинного навчання є критично важливим для постійного корегування та вдосконалення моделей ЦД. Корегують моделі ЦД на основі даних реального часу та фактичних кіберінцидентів. Машинне навчання також використовують для виявлення аномалій і

прогнозування загроз, що забезпечує актуальність віртуального середовища ЦД для симуляції [4]. Цей інтегрований підхід створює адаптивну систему, здатну не лише автоматично реагувати на загрози, але й проактивно прогнозувати їх, використовуючи віртуальний полігон ЦД для ухвалення оптимальних рішень у режимі реального часу [15].

5. Практичні аспекти застосування та перспективи розвитку цифрового двійника залізничної мережі

Цифровий двійник залізничної мережі є передовою технологією, що створює віртуальну копію реальної інфраструктури, даючи змогу моделювати, аналізувати і прогнозувати її стан [2]. Впровадження ЦД має вирішальне значення для підвищення стійкості, безпеки та ефективності залізничного транспорту [9]. Його використання відкриває нові можливості для кібербезпеки та операційної стійкості залізничної мережі. ЦД слугує безпечним полігоном для тестування нових плейбуків (сценаріїв автоматизованого реагування) SOAR-систем. Це допомагає перевіряти ефективність автоматизованих дій перед їх застосуванням у реальній мережі. Через симуляцію різних кібератак і загроз у віртуальному середовищі ЦД фахівці можуть **виявляти вразливості** інфраструктури, які залишаються непоміченими традиційними засобами захисту [8]. У разі успішної атаки ЦД може бути використаний для **автоматизованої переконфігурації мережі**. Рішення про відновлення попередньо перевіряють і відпрацьовують у двійнику, забезпечуючи мінімальний час простою [10].

Однак, незважаючи на значні переваги, впровадження ЦД залізничної мережі стикається з низкою серйозних проблем. Розроблення та підтримка повноцінного цифрового двійника потребує значних фінансових інвестицій. Крім того, для точного моделювання необхідні великі обсяги якісних, актуальних даних із реальної мережі. Особливу складність становить моделювання систем залізничної автоматики, таких як системи СЦБ та АСУТП (автоматизовані системи управління технологічними процесами). Також існують питання, пов'язані з розробленням єдиних стандартів і регуляторної бази для застосування ЦД [2, 5].

Багато країн світу, зокрема Європа, Азія та США, уже мають приклади впровадження окремих елементів ЦД і SOAR на своїх залізницях. Так, німецький залізничний оператор Deutsche Bahn (DB) є одним із лідерів у впровадженні ЦД і штучного інтелекту. У рамках проєкту Digitale Schiene Deutschland (DSD) DB спільно з NVIDIA створює фотореалістичного цифрового двійника залізничних ліній і станцій (наприклад для S-Bahn Гамбурга), щоб повністю симулювати автоматичне обслуговування поїздів у всій мережі. Двійника використовують для навчання ШІ, який має безперервно аналізувати навколишнє середовище та оптимально реагувати на нетипові події (наприклад падіння предметів на колію

або поява людини біля краю платформи) [1]. Це допомагає розробляти і тестувати системи сприйняття та управління без ризику для реальної інфраструктури. DB активно впроваджує ШІ, який спирається на цифрову копію мережі, для вирішення конфліктів між поїздами в системах диспетчерського управління (зокрема на міських залізницях Штутгарта, Мюнхена та Берліна). Моделювання сценаріїв розвитку ситуації дає змогу диспетчеру отримувати оптимізовані варіанти регулюючих заходів і уникати затримок ще до виникнення серйозних проблем [4].

У Великій Британії компанія Network Rail використовує ЦД для управління інфраструктурою та складними проєктами, серед них такі, як модернізація інфраструктури. Під час модернізації важливого вузла Carstairs Junction ЦД відіграв головну роль у мінімізації збоїв і прискоренні виконання робіт. Динамічна, насичена даними модель дала змогу точно координувати проєктування та будівельні заходи, симулюючи реальні умови та інтегруючи різні джерела даних для ухвалення рішень у режимі реального часу [13].

У 2022 році інжинірингова фірма Італійської Державної Залізничної Групи застосувала технологію ЦД для проєкту високошвидкісної залізничної лінії Неаполь-Барі. ЦД був підготовлений із використанням цифрової BIM-бібліотеки (Building Information Modelling), що налічувала близько 1500 параметричних компонентів, що значно покращило управління проєктом та оцінювання його життєвого циклу [7].

В Австралії було продемонстровано, що ЦД, поєднаний із глибоким навчанням, може надавати детальніші дані про вплив збоїв на пасажирів у режимі реального часу. Метою цього дослідження було дати змогу операційним центрам краще пом'якшувати наслідки збоїв та оптимізувати обслуговування пасажирів [9].

Ці приклади ілюструють, що ЦД використовують не лише для прогнозування технічних відмов та управління активами, але й оптимізації руху, навчання систем ШІ/SOAR і підвищення кіберстійкості залізничних мереж [15]. Цей міжнародний досвід підтверджує перспективність технології.

Для України впровадження ЦД має особливе значення. Технологія є критично важливою для модернізації залізничної інфраструктури та підвищення стійкості української залізниці, що є життєво необхідним в умовах воєнних і постійних кібернетичних загроз [12].

Інтеграція ЦД залізниці та SOAR на базі ШІ є наступним етапом еволюції кібербезпеки залізничного транспорту, що дає змогу перейти від реактивного до контекстно-залежного проактивного реагування. Розроблення уніфікованих протоколів обміну даними між ЦД і SOAR, удосконалення

моделей III для прогнозування складних, нинішньому етапі розвитку цих технологій [4]. Загалом цифровий двійник залізничної мережі є не лише інструментом для оптимізації, але й стратегічною необхідністю для гарантування її надійності та безпеки в сучасному цифровому середовищі [17].

Список використаних джерел

1. Ficzer P. The role of artificial intelligence in the development of rail transport. *Cognitive Sustainability*. 2023. Vol. 2, No. 4. Article 81. DOI: <https://doi.org/10.55343/cogsust.81>.
2. Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F., Yang C. and Saddik A. E. Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 120237-120257. doi: 10.1109/ACCESS.2023.33270423.
3. Ngai E., Chen C., Tolba A. M., Obaidat M. S. and Wang F. IEEE Access Special Section Editorial: Artificial Intelligence (AI)-Empowered Intelligent Transportation Systems. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 69492-69497. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074996.
4. FICZEREP. (2023). The role of artificial intelligence in the development of rail transport. *Cognitive Sustainability*. 2(4). <https://doi.org/10.55343/CogSust.81>.
5. Mirabadi A. & YAZDI Mohammad. (2009). Automatic generation and verification of railway interlocking control tables using FSM and NuSMV. *Transport Problems : an International Scientific Journal*.
6. Pappaterra M. J., Flammini F., Vittorini V., Bešinović N. A Systematic Review of Artificial Intelligence Public Datasets for Railway Applications. *Infrastructures*. 2021. 6. 136. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100136>.
7. Dirnfeld Ruth. (2022). Digital Twins in Railways. 10.13140/RG.2.2.32690.68804. Chelsea Finn. 2018. Learning to Learn with Gradients. PhD Thesis, EECS Department, University of Berkeley.
8. Ariyachandra Mahendrini & Wen Ya & Yu Jiadong. (2025). Advancing Rail Infrastructure: Integrating Digital Twins and Cyber-Physical Systems for Predictive Maintenance. 10.35490/EC3.2025.272.
9. Al-Nasser N. & Chen D. (2025). Smart Railways: Predictive Maintenance, Digital Twins, and Energy-Aware Operations. *Multidisciplinary Engineering Science Open*. 2. 1-11. <https://jmesopen.com/index.php/jmesopen/article/view/16>.
10. Werbińska-Wojciechowska S., Giel R., Winiarska K. Digital Twin Approach for Operation and
- багатоетапних атак – це одне з основних завдань на Maintenance of Transportation System—Systematic Review. *Sensors*. 2024. 24. 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>.
11. Thaduri A., Verma A. K., Kumar U. Maintenance of Railway Infrastructure Using Cyber-Physical Systems. *Decision Analytics Applications in Industry*. 2020. P.521-540. DOI:10.1007/978-981-15-3643-4_41.
12. Zezhou Wang, Xiang Liu. Cyber security of railway cyber-physical system (CPS) – A risk management methodology. December 2022. 100078. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772424722000282>.
13. Ariyachandra M. R. F., Wen Y., Yu J. Advancing Rail Infrastructure: Integrating Digital Twins and Cyber-Physical Systems for Predictive Maintenance. *Proceedings of the 2025 European Conference on Computing in Construction (EC3), Porto, Portugal*. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10211557>. DOI: 10.35490/EC3.2025.272 ResearchGate.
14. Yang J., Sun Y., Cao Y., Hu X. Predictive Maintenance for Switch Machine Based on Digital Twins. *Information*. 2021. 12. 485. <https://doi.org/10.3390/info12110485>.
15. Thompson Emmanuel Anu & Lu Pan & Alimo Philip & Atuobi Herman & Akoto Evans Tetteh & Abbew Cephas. (2025). Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Review of Digital Twin Technologies. *High-speed Railway*. September 2025. Vol. 3, Iss. 3. P. 238-250. <https://doi.org/0.1016/j.hspr.2025.05.005>.
16. Kampeczyk A., Dybel K. The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions. *Sensors*. 2021. 21. 5757. <https://doi.org/10.3390/s21175757>.
17. Dimitrova E. and Tomov S. Digital Twins: An Advanced technology for Railways Maintenance Transformation. 2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria. 2021. P. 1-5. doi: 10.1109/BulEF53491.2021.9690822.

CREATION OF A DIGITAL DOUBLE OF THE RAILWAY NETWORK AND ITS INTEGRATION WITH AI-BASED SOAR CYBER THREAT RESPONSE AUTOMATION

Abstract

The article substantiates the need to create a digital duplicate of the railway network (CD) and explores the mechanisms of its integration with an

advanced system of automating response to cyber threats conditions of total digitalization, introduction of the Internet of Things (IoT) and ACS/CSS, the railway infrastructure critically expands the surface for cyber attacks, which requires a transition from reactive to proactive methods of protection.

CD is defined as a high-precision virtual copy of the physical system (tracks, rolling stock, power supply, control system, automatic control system and network infrastructure), which serves as an intellectual training ground for cyber protection. The main functions of the CD are considered in detail: traffic modeling, infrastructure modeling, SBS systems modeling, and energy supply and communication modeling. Each of these functions is critical for simulating cyber-attacks and assessing their real-world physical impact on traffic safety, such as attempted unauthorized changes to the arrow's position or communication disruption.

The SOAR system is presented as a key tool that provides the orchestration (coordination of security tools) and automation (implementation of countermeasures using «playbooks») necessary for immediate incident response.

Artificial intelligence acts as a «brain» for decision-making, using the CD to assess the consequences of an incident and choose the optimal SOAR response scenario with the priority: Traffic safety - Functionality - Recovery. A conceptual architecture and integration algorithm are proposed that allow SOAR/AI to automatically test countermeasures in a virtual CD environment before deploying them in a real network, minimizing operational risks.

Practical examples of the application of CD and AI elements on the world's railways (Deutsche Bahn, Network Rail, Italian State Railway Group) are given, which confirm the promising nature of the technology. The conclusion emphasizes that the integration of CD, SOAR and AI is a strategic necessity to increase the overall cyber resilience and reliability of rail transport, especially in the face of constant cyber threats.

Keywords: digital twin, cybersecurity, cyberattack simulation, proactive protection, rail transport.

Сотник Василь Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: sotnyk.va@kart.edu.ua.

Хісматулін Володимир Шайдуллович, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків,

(SOAR) based on artificial intelligence (AI). In the Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сіроклин Іван Миколайович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: seroklin@kart.edu.ua. Прилипко Андрій Андрійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Sotnyk V., Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: sotnyk.va@kart.edu.ua.

Khismatulin V., Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Siroklyn I. Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: seroklin@kart.edu.ua.

Prylypko A. Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Редакційна колегія

Бабасв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Бутько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Гаврилюк В. І., д.ф.-м.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Доценко С. І., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ;

Жуковицький І. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Каргін А. О., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Климаш М. М., д.т.н., професор,
НУ «Львівська політехніка»;

Zbigniew Łukasik Kazimierz Pulaski
University of Humanities and Technology in
Radom, Professor;

Ловська А.О д.т.н.,проф. УкрДУЗТ

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Mareks Mezitis, Dr.sc.ing., Head of Scientific
Institution Transporta Akadēmija, Rīga,
Latvija;

Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Панченко С. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;
головний редактор;

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

Серков О. А., д.т.н., професор, НТУ
«ХП»;

Скалозуб В. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Трубчанінова К. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Thierry Horsin, Enseignant chercheur au
CNAM (PU);

Юрай Герліці , доктор інженерії,
професор, почесний професор, завідувач
кафедри Транспорт та під'омно-транспортна
техніка

Жилінського університету (Словаччина)

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

© Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti

Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06148, за рішенням № 947 Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від 01 травня 2025

ISSN 2413-3833 (Online), ISSN 1681-4886 (Print)
Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de l'ISSN, 75002 PARIS, France.

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17 березня 2020 р. зі змінами від 02.07.2020 р. № 886)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/++++p24787015,3.html>), Google Scholar (<https://scholar.google.com>), науково-видавничої платформи «Наукова періодика України» (<http://jks.kart.edu.ua>).

Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 13 від 26 грудня 2025 р.

Рецензування проводиться конфіденційно за принципами double-blind

Статті друкуються мовою оригіналу

Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився

Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції журналу

Індекс журналу у Каталозі передплатних видань України – 48707

Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50,
площа Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 318.

Тел.: (057) 730-19-37, 730-10-82. E-mail: ikst.ukrsurt@ukr.net

Відповідальний за випуск Харін Р.О.
Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 26.12.2025р. Формат 60х84 1/8.
Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №
Наклад 50 прим. Ціна договірна.
Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.

Видавець та виготовлювач
Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, площа Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.