



**УкрДУЗТ**  
Український державний університет залізничного транспорту

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

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

№3 2023 р.

3 (154)' 2023

ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ  
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ  
ТРАНСПОРТІ

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

INFORMACIJSNO-KERUJUCHI  
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU  
TRANSPORTI

Зміст – Содержание – Contents

Видання

Українського державного  
університету залізничного  
транспорту



**CHURYUMOV Gennadiy, SERKOV Oleksandr,  
PANCHENKO Sergii, TRUBCHANINOVA Karyna**

An antenna for radiating and receiving short-pulse ultra-  
wideband signals

..... 3

**ПЕТРЕНКО Т.Г., ПАВЛУСЕНКО К.О.**

Концептуальна модель людино-орієнтованої розумної  
системи освітлення

..... 11

**КАРГІН А.О., СІЛІН Є.Л.**

Комп'ютерні експерименти з моделлю когнітивного  
сприйняття автономної інтелектуальної безпілотної  
системи: вплив старіння даних від сенсорів на  
впевненість оцінки ситуації при прийнятті рішень

..... 19

**ПАРХОМЕНКО Л.О., ПРОХОРОВ В.М.,  
КАЛАШНІКОВА Т.Ю., ШАНДЕР О.Е.**

Розробка СППР для управління процесом формування  
контейнерних поїздів в рамках системи  
інтермодальних перевезень.

.....29

**Д.В. ЛОМОТЬКО, О.М. КРАСНОШТАН, О.С. КАВА, Б.О. НОВИЦЬКИЙ,  
С.П. ПИШНЯК**

Визначення оптимальних структур модернізації дизель-поїздів др-1а для відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці  
.....43

**НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., ГОРДІЄНКО Д. А.**

Регулятор вихідної напруги активного випрямляча на основі ковзного режиму  
.....53

**HANNA SHELEKHAN, OLENA MKRTYCHYAN, ANASTASIIA AFONINA**

Research of the state of customs clearance of cargo at the Ukrainian border transfer points  
.....67

**ПАНЧЕНКО В. В., ХАРІН Р.О.**

Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції  
.....73

CHURYUMOV G., Doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Full Professor (Kharkiv National University of Radio Electronics),  
SERKOV O., Doctor of sciences (Engineering), Full Professor (National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»),  
PANCHENKO S., Doctor of Sciences (Engineering), Full Professor (Ukrainian State University of Railway Transport),  
TRUBCHANINOVA K., Doctor of sciences (Engineering), Full Professor (Ukrainian State University of Railway Transport).

## An antenna for radiating and receiving short-pulse ultra-wideband signals

*This paper presents a design of the antenna with an expandable slot for effective radiating and receiving the ultra-wideband (UWB), short-pulse signals. The offered design of the antenna allows creating an interferential electromagnetic field of a bipolar pulse in an equivalent general antenna aperture. A quantitative and quality evaluation of efficiency of proposed antenna design is performed. It is shown that an application of the given antenna allows increasing the propagation range of the pulsed UWB signals.*

**Ключові слова:** data transmission, electromagnetic compatibility, temporal position-pulse modulation, ultra-wideband signal, wideband pulsed antenna, wireless system.

### Introduction

One of the main tendency in the development of modern communication and radar technologies is the use of broadband and ultra-wideband (UWB) signals. As defined in [1], the UWB signals have an absolute bandwidth (at least 500 MHz) is calculated as the difference between the upper frequency  $f_H$  of the -10 dB emission point and the lower frequency  $f_L$  of the -10 dB emission point,  $B = (f_H - f_L)$ , comparable to it's the center frequency  $f_C = (f_H + f_L) / 2$  so that the fractional (relative) bandwidth  $B_f = B / f_C$  larger than 0.2.

One of the varieties of the UWB signals is the short-pulse (SP) signals. It is generally believed that these signals have a duration of about 0.1...10 ns. They have a wide bandwidth, significant penetration and stealth. Their use allows to obtain high data transfer rates and is very promising for future development of recent ultra-wideband systems (UWS). On the other hand, the practical application of the SP-UWB signals causes some

difficulties associated with their radiation (or the choice of antenna type) and subsequent distortions caused by uneven attenuation of the signal in frequency during its propagation.

Thus, the effectiveness of using the SP-UWB signals depends directly on the characteristics of the antennas that produce their radiating and receiving. Among basis requirements which are subject to these antennas can indicate the following:

- ensuring minimal distortion of UWB signals and ultrashort video pulses;
- ensuring a sufficiently high level of signal transmitted to the receiving device;
- high spatial resolution capabilities for signals;
- reasonable overall dimensions and weight of the antenna.

At the present time, the quantities of these requirements are far to be fully resolved and require carrying out the additional research.

This paper considers design of antenna and the feature of receiving and emitting the UWB-SP signals for effective solution of existing problems in communications and radar technologies.



### Problem and its Analysis

Nowadays one of the requirements in the development of communications technologies is improving the bandwidth of the radio electronic systems. To achieve this purpose became possible due to applying UWB-SP signals, in particular, of ultrashort pulses with the duration of the order of units of a nanosecond (see, for example, [2]). The basis of technical solutions is the transmission of low-power coded pulses in a

very broad band without carrier frequency. In this case we deal with a nonharmonic oscillation, and consider generation of an ultrashort monopulse, whose duration can fluctuate within 0.2 - 2 nanoseconds, with the period of pulse sequence being from 10 to 1000 nanoseconds. The average period of repeating monopulses defines an information rate. Thus, within a pulse repetition cycle of 10 nanoseconds the maximum transmission rate will be 100 Mbps. The information is coded by means of temporal position-pulse modulation while the pulse shifting in the sequence concerning its regular placement sets "0" forward and "1" backward. Moreover, the time of shifting does not exceed a quarter of monopulse duration, and one information bit is coded by the sequence of multiple monopulses, for example, of 200 impulses per an information bit. So, in the sequence of 0.5 nanosecond pulses with an pulse separation of 100 nanoseconds the pulse which arrives 100 nanoseconds earlier is "0", and 100 nanoseconds later is "1". Simultaneously, in order to divide transmission channels, the position of each impulse is shifted for the period of time, proportional to the current value of some pseudorandom sequence carrying out an additional coding. The division is accomplished by means of temporal bounces, and the time of shift is one or two orders higher than the shifting within temporal position-pulse modulation. Thus, separate communication channels are formed and protected from interfering signals. As a result, the signal range significantly smoothens and becomes noise-type.

Major perspectives in the application of UWB-SP signals are caused by a number of advantages, among the most essential ones is the lack of interference of a directly expanding signal with its reflections from different objects. Besides, attenuation of a short-pulse signal in different environments is not enough due to wideband. They easily penetrate various obstacles, as the signal is not suppressed within the whole range. At the low level of the transmitted signal, the emission security, the degree of information security and the reliability of channels in wireless communication systems are increased.

### Antennas for communications

A feature of designing radio electronic systems while applying UWB-SP signals is specified by the processes of changing signal parameters at their passing via the transmitting and receiving antennas. As the antenna

aperture size is much bigger than the ping length of a signal in space, there occurs a delay of signal emission from different elementary sections of the antenna. A current pulse, propagating along an emitter, consistently excites its elements by short monopulse signals. Emissions of separate antenna sections produce a total field [3], which is defined by the following ratio:

$$E_z(t, \theta) = \frac{Z_0 \sin \theta}{4\pi r} \cdot \frac{1}{\cos \theta - 1} \times \left[ i \left( t - \frac{L}{c} - \frac{r - L \cos \theta}{c} \right) - i \left( t - \frac{r}{c} \right) \right], \quad (1)$$

where  $E_z(t, \theta)$  – intensity of an electric z-component of the electromagnetic field;

$Z_0$  – wave resistance of free space;

$\theta$  – angle between the axis of the emitter and the direction to the observation point;

$r$  – distance to the observation point;

$L$  – antenna aperture size;

$c$  – velocity of light.

The analysis of the ratio (1) points that the field of the antenna consists of two parts, positive and negative. Each of the constituents repeats an exciting current form, with one part of this field being formed at the moment of inputting a current impulse in an emitter, and the other one – at the moment of achieving the end of an emitter by this impulse. Thus, the total field consists of separate fields emitted from an excitation point and the ends of the antenna. Moreover, the form of a total field depends on a ratio between the length of the antenna  $L$  and pulse duration  $ct$ . At  $L \gg ct$  the signal delay time in antenna elements considerably exceeds the pulse duration. As a result, between two parts of the field emitted there is an interval formed, and the field is divided into two parts corresponding to two components. What is more, the form of the emitted field changes depending on the angle of observation  $\theta$ . The natural experiment [3] confirmed the results of modeling. In the classical theory of antennas according to the principle of reciprocity, the form of the antenna pattern remains invariable under the emission and reception of narrowband signals. This principle is violated, when short ultra-wideband monopulse signals are used. Antenna patterns significantly differ in the mode of emission and reception that is the peculiar feature of applying radio systems using UWB-SP signals.

It is necessary to note, that the UWB-SP signals normally possess the form of idealized Gaussian monocycles whose main part of an emission spectrum is in the range of frequencies from 1 to 7 GHz. In addition, forming the emission of an electromagnetic wave of the UWB signal into free space imposes restrictions on the

constructions of the antenna arrangements applied. The analysis of antenna constructions for emitting ultrashort pulses showed that by means of fractals it is possible to create a broadband antenna while considerably reducing the construction size [4,5]. A fractal may be found by dividing a figure into more and more minute objects, with any of the found figures being divided into identical ones and, in turn, being a part of the similar figure. The corresponding class of antennas is referred as a space-filling antenna (SFA). They are accomplished on the basis of the Koch's, Minkowsky's, Serpinskiy's fractals [5,6].

These elements of fractal antennas have sufficient broadbandness and small sizes. However, the most acceptable emission of the UWB signals is an antenna element representing an antenna with an expandable slot or so-called tapered slot antenna (TSA) with exponentially tapered profile, also known as Vivaldi's antenna [7, 8].

The Vivaldi's antenna is a well-known and widely used antenna in different ultra-wideband systems. The synthesis of such antennas is represented in a lot of

scientific works. For manufacturing the Vivaldi's antenna, we used the photoprinting methods on a dielectric substrate coated with a thin layer of copper. The mathematic antenna model was created in the CST software environment. The simulation results of the basic its characteristics shown in Figs. 1, 2 and 3

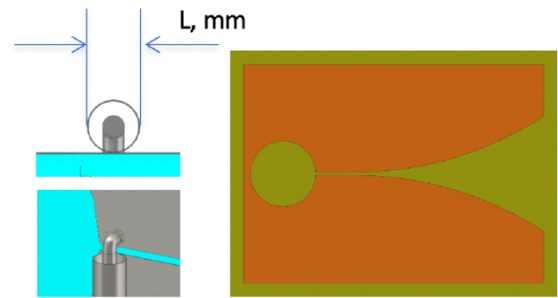


Fig.1. Antenna's geometry

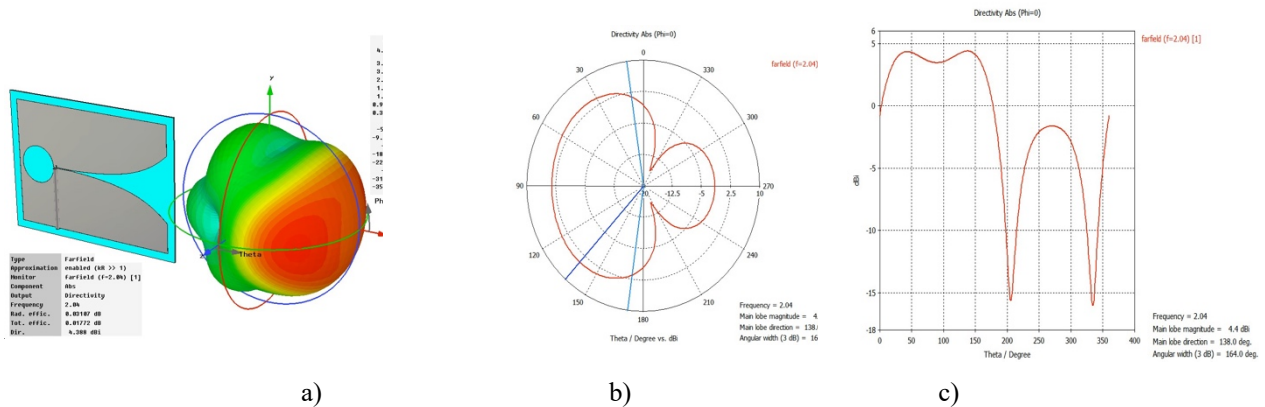


Fig.2. 3-D (a) and 2-D (b and c) directional pattern of the antenna at the 2040 MHz

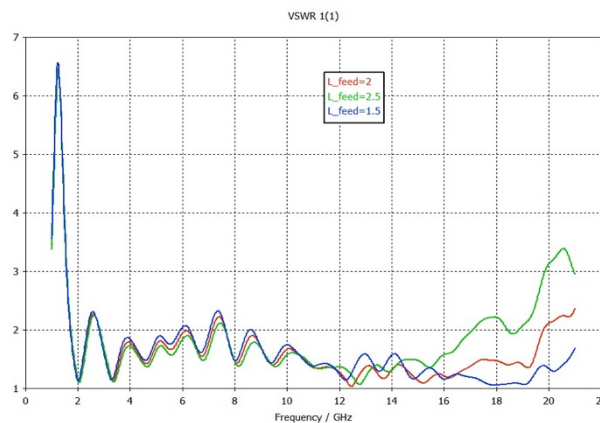


Fig.3. Dependence of the modulus of the reflection coefficient vs frequency for different ports

As it is seen, the shape of the open slot determines the frequency band, with the exponential increasing the width of the slot gives the widest band. The directional energy diagram of such antenna is characterized by a narrow main beam and practically the lack of side lobes. Structurally, the TSA is usually produced in the form of printed conductors on glass fiber laminate. The antenna has an irregular surface shape, therefore, in order to investigate the characteristics of such an antenna there is a software package used for three dimensional electrodynamic modeling. The optimization of the TSA sizes and forms gives a variety of forms and proportions, depending on solving a specific objective, however it is essential expansion of a frequency band of electromagnetic radiation that is defining while applying UWB electronic systems. Thus, the urgent task is to improve technical characteristics of the TSA elements of the antenna systems, which emit ultrashort pulses and don't distort a waveform and reduce the side antenna radiation.

To achieve the aim is obtained by using a bipolar pulse signal in the construction of an antenna element, which is schematically presented in Fig. 5 [9]. The

information monopulse signal is divided into halves for this purpose. One part of the signal is consistently inverted and delayed for some period of time that is equal to the half of monopulse duration. Both monopulse signals are used to excite respectively two of the TSA antennas located nearby on a unified dielectric basis. The electromagnetic fields of both monopulse signals are interfered in equivalent generic space of an aperture of both antennas, producing in it an electromagnetic field of a bipolar impulse, simultaneously eliminating the time slot between two parts of an emitted field that is characteristic of the TSA antenna. This bipolar impulse makes the emission whose range considerably exceeds the maximum distance when using both monopulse and harmonious signals.

The Fig. 4 schematically presents the construction of a broadband pulse antenna. It is indicated as follows: 1 – generator of a broadband unipolar pulse signal; 2 – dielectric basis; 3-1, 3-2 – the conducting surfaces; 4-1, 4-2 – excitation systems; 5-1, 5-2 – emitting apertures; 6 – signal divider combined with the inverter; 7 – delay line.

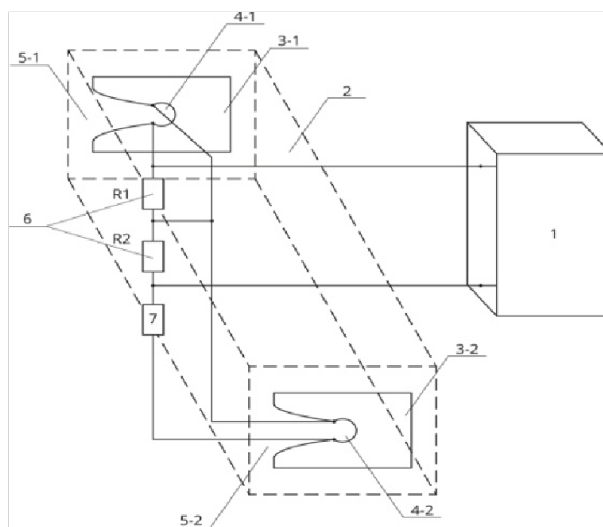


Fig. 4. Antenna for emitting the UWB pulse signal

An informational unipolar pulse signal arrives from the generator 1 onto the divider 6 representing a series connection of two identical non-inductive R1 and R2 resistors allowing it to be halved. The monopulse signal is delivered from the first output of the signal divider R1 directly onto an excitation system 4-1, producing a monopulse electromagnetic field in an aperture 5-1.

Simultaneously, from the other output of a signal divider R2 the inverted monopulse signal is supplied along the delay line 7 onto an excitation system 4-2, creating an inverted monopulse electromagnetic field delayed for a half of duration of a monopulse signal in an antenna

aperture 5-2. In addition, the delay line 7 represents a segment of a homogeneous transmitting line of the specified length.

The electromagnetic fields of two unipolar pulses, the major and inverted ones, are interfered in an equivalent general aperture of antennas, exciting in it an electromagnetic field of a bipolar pulse, which is a broadband pulse signal.

The broadband pulse antenna is capable to emit both an ultrashort unipolar monopulse and a bipolar pulse information signal. The electromagnetic field in the form

of a monopulse is excited by a signal which is described by the expressions:

$$E = E_m \cdot \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\tau_{im}} \left( t - \frac{r}{v_0} \right) \right] \text{ for } \left| t - \frac{r}{v_0} \right| \leq \tau_{im}, \quad (2)$$

where  $E_m$  – a pulse amplitude;

$\tau_{im}$  – a pulse duration;

$v_0$  – speed of distributing the emission.

Besides the electromagnetic field of the antenna has the directive gain (DG) of the antenna emitting a monopulse signal  $D_{mp}$  and the antenna emitting a monochromatic signal  $D_\omega$  with wavelength  $\lambda_0$  the interrelation between them being defined by the following ratio:

$$D_{mp} = \eta \cdot D_\omega - 0,25 D_\omega, \quad (3)$$

where  $D_\omega = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \cdot A_0$ ;

$A_0$  – operating antenna aperture area;

$\lambda_0 = v_0 \cdot \tau_{im}$  [10].

The analysis of the ratio (3) shows that the coefficient of efficiency of the antenna which is excited by an ultrashort monopulse comes to 25% comparing with the coefficient of efficiency of the antenna excited by monochromatic signals of the corresponding wavelength. It reduces the range of antenna emission 4 times as much comparing to the emission of monochromatic signals.

Moreover, emission by the antenna of an electromagnetic field in the form of a bipolar impulse can be presented the following ratio for an electric component of an electromagnetic field:

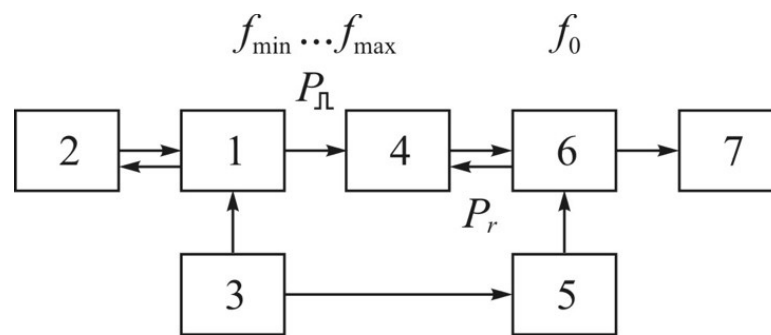
$$E = E_m \cdot \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\tau_{im}} \left( t - \frac{r}{v_0} \right) \right] \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{\tau_{im}} \left( t - \frac{r}{v_0} \right) \right]. \quad (4)$$

So, the DG of the antenna emitting a bipolar pulse signal will be:

$$D_{bp} = 2,37 D_\omega. \quad (5)$$

Thus, the excitation in an antenna aperture of an electromagnetic field in the form of a bipolar pulse increases an antenna DG at 9.5 times as much as compared with a DG of the antenna emitting an unidirectional pulse and 2.37 times as much comparing with a DG of the antenna emitting monochromatic signals. Therefore, the introduced antenna allows increasing significantly the range of radio emission of UWB pulse signals.

The prospects for developing the high-power microwave electronics is associated with creating the high-power relativistic microwave devices which are provided generation of high-power microwave pulses (peak power is units and tens GW) [11]. However, the application of such devices is connected with considerable technical and technological difficulties, especially, when need to produce very short microwave pulses (duration less than 100 ns). In this case for forming high-power UWB microwave pulses there is more simple approach based on the pulse compression technology, namely, the resonant microwave compression method. A central idea of this method is slow storage of electromagnetic energy in the microwave resonator and then its removal from the high factor resonator for shorter duration to a matched load (antenna) [12]. Among advantages of this method it is necessary to note its ease of its realization, the possibility of application the industrial magnetrons as well as the standard elements of waveguide techniques. For understanding a structure of the plant forming the ultrashort microwave pulses let us consider an operation of the microwave module, in which is used the magnetron having the two RF outputs of energy. Fig. 5 shows a block diagram of the microwave module. The magnetron that is used in this experiment has the two RF outputs of energy: active and passive. For tuning and controlling by a frequency of the magnetron we used the tunable short-circuit waveguide as the reactive load of the passive RF output.



1 – a magnetron with two RF outputs; 2 – a tunable short-circuit waveguide; 3 – a power supply (modulator); 4 – ferrite isolator; 5 – a generator of controlling pulses; 6 – a microwave cavity; 7 – a matched load (TSA antenna)

Fig. 5. Block diagram of the microwave module.

The analysis shows that for increasing an efficiency of compression and formation of the high-power nanosecond microwave pulses necessary to reduce a loss of power  $P_r$ .

Assuming that  $f_{min} < f_0 < f_{max}$  with the help of a short-circuiting piston we adjust an oscillation frequency of the magnetron to a resonant frequency of the microwave cavity and as a result the power  $P_r$ , reflected from microwave cavity is decreased. Thus, we have tested the microwave module using the magnetron with the two RF outputs for forming high-power nanosecond microwave pulses at X and Ku bands. Besides it, possibility of application of this approach for creating microwave module at mm range of wavelength is discussed.

### Conclusion

The application of the technical solutions proposed for the antenna construction considerably increases a propagation distance of pulse electromagnetic signals. So, as compared with an emission level of a unipolar pulse signal, the propagation distance of the bipolar impulse produced in an antenna aperture increases 9,5 times as much, and as compared with a monochromatic signal – 2,37 times. The simultaneous joint operation with no interference and a single frequency range of both traditional narrow-band communication systems, and communication systems with UWB-SP signals is specified by the fact that the level of an information signal does not exceed a noise level in the working range of frequencies. In addition, decelerating the power and an emission level of electromagnetic fields is guaranteed to provide accomplishing the requirements of electromagnetic compatibility at all development stages and implementing the systems of mobile communication.

### References

1. Горбенко І., Замула О., Лик Х. Ч. Comprehensive solution to the problem of electromagnetic compatibility of modern information and communication systems // *Радіотехніка*. 2020. Вип. 202. С. 106–115.
2. Trubchaninova K., Serkov A., Kniyazev V., Yakovenko I. Electromagnetic Compatibility of Mobile Telecommunication Systems // *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. 2020. Vol. 1. P. 1041–1044.
3. Ali Grami. *Introduction to Digital Communications*. Academic Press, 2016. 587 p.
4. Zhang, L. The Simulation Study of Multi-User Spread-Spectrum Wireless Communication System // *Journal of Physics: Conference Series* 1815(1):012021. 2021. P. 1–5.
5. United States Federal Communications Commission (FCC) Decision No. FCC 02-48 of 14/02/2002 [Електронний ресурс]. Режим доступа: [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf). (Дата зверн.: 20.12.2020).
6. Huang Tai-Jung. Analytical Investigation of Channel Capacity of UWB-MIMO Systems // *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2018. Vol. 11. P. 1–8.
7. Lazurenko B. A., Serkov A. A., Trubchaninova K. A., Horiushkina A. E. Security Improvement Techniques for mobile applications of Industrial Internet of Things. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2020. Vol. 20, No. 5. P. 145–149.
8. Moskalets M., Loshakov V., Abdenour D., Ageyev D., Martynchuk O., Sielivanov K. *Methods for Solving EMC Problems by Means of Antenna Technology in Tropospheric Communication* // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems

- of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). 2019. P. 571–574.
9. Спосіб генерації широкосмугового імпульсного сигналу та антена для його реалізації: патент України на винахід № 120554U МПК H01Q 21/06/ В.С. Бреславець; О.А. Серков; М.Ю. Толкачов; Г.І. Чурюмов; І.Г. Перова; заявка № а 2018 03104 подана 26.03.2018; опубл. 26.12.2019, бюл. № 24, 5 с.
  10. Serkov O., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov G. The Wideband Pulsed Antenna and its Application // 9th Inter. Conf. on Ultra-wideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)], September 4 – 7, Odessa Ukraine, 2018. P. 340-343.
  11. Trubchaninova K., Serkov A., Mezitis M. Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals // Advanced Information Systems. 2019. Vol. 3, Issue 4. P. 33–38. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>.
  12. Спосіб прийому цифрових двійкових сигналів в умовах шуму: патент України на корисну модель № 145319 U МПК H04B 1/06 / С. В. Панченко, О.А. Серков, К.А. Трубочанінова, А.Є. Горюшкіна, Б.О. Лазуренко; заявка № u 2020 04847 подана 29.07.2020; опубл. 25.11.20, Бюл. № 22, 6 с.

**Чурюмов Г.І., Панченко С.В., Серков О.А., Трубочанінова К.А. Антена для випромінювання та прийому коротко-імпульсних надширокосмугових сигналів**

**Анотація.** У цій статті представлено конструкцію антени з розширеною щільною для ефективного випромінювання та прийому надширокосмугових сигналів, коротко-імпульсних сигналів. Одним із різновидів надширокосмугових сигналів є коротко-імпульсні сигнали. Вважається, що ці сигнали мають тривалість близько 0,1...10 нс. Вони мають широкую смугу пропускання, значне проникнення і скритність. Їх використання дозволяє отримати високі швидкості передачі даних і є дуже перспективним для майбутнього розвитку сучасних ультра-широкосмугових систем (UWS). З іншого боку, практичне застосування сигналів SP-UWB викликає певні труднощі, пов'язані з їх випромінюванням (або вибором типу антени) і подальшими спотвореннями, викликаними нерівномірним ослабленням сигналу по частоті під час його поширення. Таким чином, ефективність використання сигналів SP-UWB безпосередньо залежить від характеристик антен, які здійснюють їх випромінювання та прийом. В роботі запропонована конструкція антени, яка дозволяє створювати інтерференційне електромагнітне поле біполярного імпульсу в еквівалентній загальній апертурі антени. Проведено кількісну та якісну оцінку ефективності запропонованої конструкції антени.

Показано, що застосування даної антени дозволяє збільшити дальність поширення імпульсних UWB сигналів. Так, порівняно з рівнем випромінювання уніполярного імпульсного сигналу дальність поширення біполярного імпульсу, створеного в отворі антени, збільшується в 9,5 рази, а порівняно з монохроматичним сигналом – у 2,37 рази. Таким чином, введена антена дозволяє істотно збільшити дальність радіовипромінювання імпульсних надширокосмугових сигналів. Одночасна сумісна робота без перешкод і в одному частотному діапазоні як традиційних вузькосмугових систем зв'язку, так і систем зв'язку з UWB-SP сигналами обумовлюється тим, що рівень інформаційного сигналу не перевищує рівня шуму в робочому стані. діапазон частот.

**Ключові слова:** передавання даних, електромагнітна сумісність, часова позиційно-імпульсна модуляція, надширокосмуговий сигнал, широкосмугова імпульсна антена, бездротова система.

Надійшла 17.05.2023 р.

**Churyumov Gennadiy**, Doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Full Professor, Professor of Physical Fundamentals of Electronic Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [gennadiy.churyumov@nure.ua](mailto:gennadiy.churyumov@nure.ua)  
<https://orcid.org/0000-0002-4826-510X>.

**Panchenko Sergii**, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Rector of Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>.

**Serkov Oleksandr**, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [aleksandr.serkov@hotmail.com](mailto:aleksandr.serkov@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

**Trubchaninova Karyna**, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Professor of Transport Communication Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [tka2@ukr.net](mailto:tka2@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

**Чурюмов Геннадій Іванович**, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

E-mail: [gennadiy.churyumov@nure.ua](mailto:gennadiy.churyumov@nure.ua)  
<https://orcid.org/0000-0002-4826-510X>.

**Панченко Сергій Володимирович**, доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net)

<https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>.

**Серков Олександр Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

E-mail: [aleksandr.serkov@hotmail.com](mailto:aleksandr.serkov@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

**Трубчанінова Карина Артурівна**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: [tka2@ukr.net](mailto:tka2@ukr.net)

<https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

ПЕТРЕНКО Т. Г., к.т.н, доцент

ПАВЛУСЕНКО К. О., PhD студентка

(Український державний університет залізничного транспорту)

## Концептуальна модель людино-орієнтованої розумної системи освітлення

*Система людино-орієнтованого розумного освітлення (Human Centric Lighting, HCL) є частиною розумного будинку і призначена для створення функціонального, економічного та комфортного для людини оточення. Дослідження циркадного ритму людини (Human Circadian Rhythm, HCR) доводять важливість створення HCL з урахуванням факторів впливу параметрів освітлення на людину. У статті запропонована концептуальна модель HCL системи на основі збалансованого HCR.*

**Ключові слова:** людино-орієнтована система розумного освітлення, циркадний ритм людини, концептуальна модель, нечітка змінна зсуву циркадного ритму.

### Вступ

Дослідження циркадного ритму людини поширюється з подальшим розвитком штучного інтелекту речей (Artificial intelligence of things, AIoT). Суттєвим фактором є можливість сучасних систем AIoT отримувати значення стимулів HCR за допомогою сенсорів, аналізувати вплив стимулів на зміну стану людини за допомогою штучного інтелекту і, нарешті, створювати штучне оточення, що у свою чергу формує необхідні стимули оточення HCR і дає змогу створювати складні системи людино-орієнтованого розумного оточення.

HCR («внутрішній годинник людини») – це приблизно добовий ритм зміни фізичного, психічного та поведінкового стану людини. Природний HCR зберігається в постійних умовах, тобто в постійній темряві, з періодом близько 24 годин, за дослідженнями. Період ритму в постійних умовах називається періодом вільного ходу ( $\tau$ ). Під впливом зовнішніх факторів стан людини корегується численними ітераціями циркадного ритму впродовж усього життя людини та ґрунтується на генетичних властивостях організму людини (персоналізований HCR).

З точки зору AIoT HCR розглядається як модель складних взаємовідносин стану людини та оточення. Людина бажає мати вплив на керування ним, але досить часто не має можливості аналізувати складні причинно-наслідкові зв'язки факторів впливу. Як результат, дослідження відмічають такі наслідки

порушення циркадних ритмів людини, як ожиріння, депресія, рак і багато інших. Увага до створення персоналізованого розумного оточення для людини була причиною створення розумних речей інтернету речей (Internet of Things, IoT), таких як розумні годинники, будівлі та міста.

У статті розглянуто загальні фактори впливу на зміни HCR, фактори впливу освітлення на зміни HCR, вимоги до створення HCL системи та запропоновано концептуальну модель HCL системи на основі нечіткого підходу.

### Постановка проблеми, аналіз досліджень та публікацій

В основі природного регулювання циркадного ритму людини лежать молекулярні механізми. У 2017 році Нобелівська премія з фізіології або медицини була дана роботі, що розкриває механізми циркадного регулювання. Розвиток розуміння молекулярних механізмів HCR стимулював дослідження і створення практичних проєктів автоматизованого розумного оточення людини, а саме систем HCL.

Сучасні дослідження намагаються відповісти на питання «Які процеси впливають на HCR?», «Як саме впливають ті чи інші фактори?», «Які фактори найбільше впливають на HCR?», «Як сучасні інтернет речі можуть впливати на HCR?», «Як збалансувати стан організму конкретної людини за допомогою регулювання певних зовнішніх подразників HCR?» і багато інших.

Дослідження HCR визначають взаємозв'язки між HCR та такими факторами:

- 1) фізична активність людини (кількість та інтенсивність фізичної активності);
- 2) режим харчування людини (дотримання певної дієти чи певних проміжків часу між вживанням їжі);
- 3) біологічний і фізичний стани людини (вміст у крові мелатоніну, кортизолу, тестостерону та інших гормонів, температура тіла і тиск);
- 4) фізіологія людини (вік, стать);
- 5) стан навколишнього середовища (температура, вологість, якість повітря тощо);
- 6) стан освітлення (штучне та природне освітлення; спектральний склад світла, включно з кількістю синього світла в освітленні; колірна

температура світла; інтенсивність освітлення; тривалість освітлення різними джерелами світла).

На рис. 1 зображено фактори впливу на HCR, обґрунтування яких розглянуто в роботах [1-3].

Найпоширенішими є дослідження взаємозв'язку між світлом і HCR [4-6].

Суттєвим недоліком усіх існуючих досліджень є вивчення лише певного, часто досить вузького, напрямку впливу на HCR без комплексного підходу до цього питання.

У роботі пропонується концептуальна модель людино-орієнтованої розумної системи освітлення, побудованої на нечіткій моделі збалансованого циркадного ритму людини.

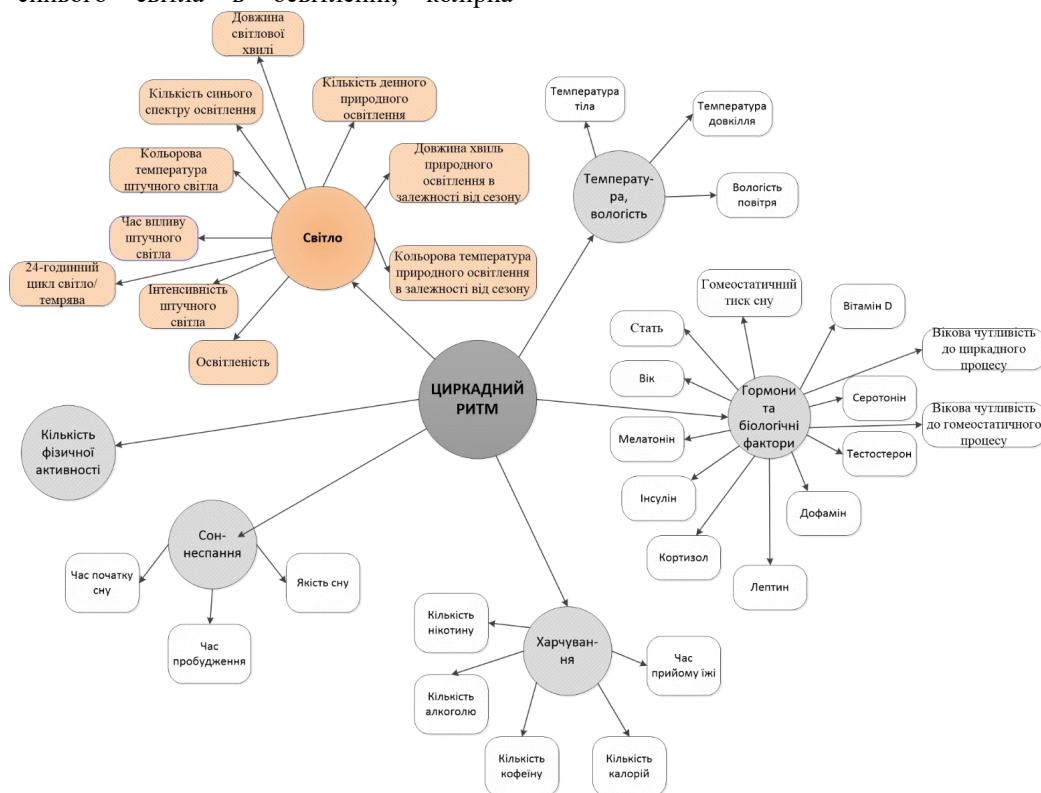


Рис. 1. Фактори впливу на зміну циркадного ритму людини

**Виділення невирішених проблем в дослідженнях**

HCR є важливою складовою здорового життя людини як регулятор біологічних процесів людини [2]. HCR (приблизно 24,5 години) - це природні коливання функцій організму, пов'язані з добовим циклом світла і темряви. Зміна HCR завдяки зовнішнім факторам впливу (подразникам, наприклад, світла і температури) називається захопленням, а подразник, що призводить до залучення ритму, називається zeitgeber, інакше «дар часу».

Світло - це частина електромагнітного спектра з довжиною хвиль між 380 і 780 нм, що сприймається очима людини. За наявності освітлення людина бачить кольори, а за відсутності - лише відтінки сірого.

Відповідно до природи освітлення світло має візуальний, емоційний і біологічний вплив на людину [4]. Природний HCR формується завдяки біологічному впливу світла на людину.

У HCR виділяють дві фази – сну та неспанння. Вплив світла як зовнішнього подразника є найбільш вагомим для зміни HCR. Механізм впливу світла

реалізується в організмі людини за допомогою складних гормональних процесів. Важливою складовою механізму впливу є коливання мелатоніну в крові людини.

Гормон мелатонін виробляється шишкоподібною залозою в головному мозку людини та відіграє важливу роль у регулюванні HCR. Вироблення мелатоніну пов'язано зі зміною світла і темряви, а саме вироблення мелатоніну підвищується в темряві та знижується під впливом світла [1].

Освітлення прямо впливає на мелатонінову систему через рецептори світла, що знаходяться в різних частинах тіла людини, включаючи очі та шкіру. У разі потрапляння в очі людини світло активує фоточутливі рецептори сітківки (стрижневі, колбочкові клітини та світлочутливі гангліозні клітини). Ці рецептори пересилають сигнали до мозку через зоровий нерв та активують нейрони у відповідних ділянках мозку.

Активовані нейрони у свою чергу впливають на мелатонінову систему шляхом регулювання активності шишкоподібної залози. Шляхом зменшення вироблення мелатоніну під впливом світла відповідні нейрони зменшують активність ферментів, що забезпечують перетворення серотоніну в мелатонін. Це призводить до зменшення рівня мелатоніну в крові та порушення HCR [7].

Найбільшу енергетичну залежність у спектральному діапазоні видимого світла, що може проникати глибоко в сітківку ока і прямо впливати на баланс гормону мелатоніну в організмі та спричинити ряд негативних наслідків для здоров'я, має синє світло (від 450 до 480 нм) [5]. Коли людина отримує штучне синє світло вдень або перед сном, це пригнічує продукцію мелатоніну і порушує HCR.

Стан освітлення в різні часи доби має різний вплив на HCR. Штучне світло може викликати негативну зміну HCR, особливо якщо воно має високу інтенсивність і спектральний склад, що не відповідає природному ритму світла і темряви. Отже, проектування системи та керування нею освітлення приміщення з урахуванням параметрів впливу світла може стабілізувати CR конкретної людини.

Освітлення може впливати на HCR через два механізми: прямий вплив на мелатонінову систему та непрямий вплив на HCR.

До непрямого впливу на HCR відносять вплив соціального ритму (години, коли людина прокидається та лягає спати, їсть і працює; ці години можуть бути різними в різних країнах або культурах), фізична активність, вік людини, харчування і стрес.

Прямий вплив на HCR має такий фактор, як світло. У свою чергу світло впливає по-різному навіть на різні частини ока людини за допомогою зорових і незорових рецепторів.

Для оцінювання впливу системи освітлення приміщення на HCR ураховують спектральний склад світла, інтенсивність світла і тривалість впливу світла.

Вивчення спектрального складу світла доводить, що його вплив може бути збалансованим відносно природного циркадного ритму завдяки фільтрації хвиль різної довжини. Вивчення впливу колірної температури світла доводить також необхідність моніторингу та керування цим подразником циркадного ритму в HCL системі.

Для формалізації впливу освітлення на HCR розроблені індикатори – фактор циркадної дії (Circadian Action Factor, CAF), циркадний стимул (Circadian Stimulus, CS), еквівалентний меланопічний люкс (Equivalent Melanopic Lux, EML) і крива фазової відповіді (Phase Response Curve, PRC).

Індикатор CAF дає змогу оцінити вплив джерела світла, пов'язує циркадні величини з фотометричними, відображує циркадний ефект джерела світла та описує циркадну ефективність різних кольорів світла. CAF обчислюється як співвідношення відбитого світлового потоку і загального світлового потоку [8].

Дослідженнями встановлені співвідношення значень CAF, виду діяльності людини та колірної температури джерела світла, що впливають на збалансованість HCR. Під час відпочинку пропонується значення CAF менше 0,4, значення колірної температури менше 3000 K; під час офісної роботи чи навчальної діяльності CAF може бути в межах від 0,3 до 0,8, колірна температура – від 3300 до 5300 K. Під час концентрації, напруженої роботи рекомендоване значення CAF має перевищувати 0,7, а колірна температура має бути вища за 5300 K [8]. CAF приблизно описує вплив різних кольорів світла на HCR.

Індикатор CS ( $W/m^2$ ) запропоновано для оцінювання спектрально зваженого освітлення для HCR. Встановлено прямо пропорційний зв'язок CS і нічного пригнічення мелатоніну після однієї години світлового впливу [8, 9]. Розраховані значення CS для різних видів діяльності людини, що відповідають потрібному освітленню збалансованого HCR. Так, для шкали [0,1] відносних значень CS пропонується значення CS менше 0,4 для часу відпочинку, а для робочого часу – більше 0,7.

Індикатор EML використовується в міжнародному стандарті WELL Building для вимірювання впливу світла на HCR в архітектурних спорудах [10]. EML вимірюється по вертикалі на висоті очей користувача і для розрахунку необхідно помножити значення освітленості (lux) на меланопічний коефіцієнт для отримання значення освітленості в еквівалентних меланопічних люксах [8]. Індикатор ураховує для бажаного спектра світла



оцінку впливу кожного з п'яти фоторецепторів в оці людини.

Рекомендовано витримувати значення EML вночі та під час відпочинку меншим за 50 еквівалентних меланопічних люксів, а вдень більшим за 200 еквівалентних меланопічних люксів.

Вплив світла на фазу циркадного ритму мелатоніну описується кривою фазової відповіді (PRC), що вказує на величину та напрямок фазового зсуву [11].

У дослідженні циркадного ритму PRC ілюструє зв'язок між стимулом, таким як вплив світла, і відповіддю – зсувом циркадного ритму (зсув фази). Зсув фази у HCR означає, що час засинання та пробудження перемістяться раніше (випередження фази) або пізніше (затримка фази) [11].

PRC зазвичай використовується при вивченні хронобіології для виявлення впливу різних факторів навколишнього середовища на певний HCR. Це фундаментальний хронобіологічний інструмент для вивчення циркадних дисбалансів людини [12].

Індикатори впливу освітлення дають змогу виділити найбільш суттєві відносини між факторами впливу світла на HCR.

#### Мета та задачі дослідження

Людино-орієнтовані системи розумного освітлення приміщення (HCL) – це системи освітлення, розроблені для покращення комфорту і здоров'я людини. HCL системи враховують біологічні потреби людини, відповідно HCR, і забезпечують освітлення відповідно до ритму дня та ночі.

HCL можуть впливати на HCR, змінюючи спектральний склад світла, інтенсивність і тривалість освітлення. Основні фактори впливу світла на HCR включають таке:

1) інтенсивність світла впливає на HCR [5, 13]. HCL регулює інтенсивність світла в приміщенні відповідно до часу дня (ночі) та активності людини. Яскраве світло може збуджувати людину і підвищувати її бадьорість, тоді як приглушене світло ввечері може заспокоювати і допомагати заснути. Для визначення рівня інтенсивності світла треба враховувати різні фактори впливу, такі як вік, стан здоров'я та індивідуальні потреби людини;

2) спектральний склад світла описується різними довжинами хвиль, присутніх у світлі, що падає на предмет освітлення. HCR залежить від спектрального складу світла, що оточує людину протягом дня та відповідно до часу дня [14]. Наприклад, вранці HCL система може забезпечувати більш холодне та більш синє світло, щоб підвищити енергію та покращити настрій, а ввечері – більш тепле та жовтувате світло, щоб допомогти заспокоїтися та підготуватися до сну. Колірна температура світла

відтворює присутність різних кольорів у спектрі. Виділяють три категорії колірної температури - тепле світло (менше 3300 K), біле нейтральне світло (від 3300 до 5300 K) і холодне біле світло (вище 5300 K). Різні джерела світла матимуть різний спектральний склад і відповідно різну кольорову температуру;

3) тривалість світла впливає на HCR [5]. Якщо людина витрачає багато часу в приміщенні зі штучним освітленням пізно ввечері, це може порушити HCR та призвести до проблем зі сном. За допомогою HCL системи можна налаштувати тривалість світла в приміщенні відповідно до часу дня та потреб користувача;

4) HCL система може забезпечити використання різних режимів світла для різних годин дня - режим роботи при значній інтенсивності протягом робочого дня і режим відпочинку, коли світло зменшується і плавно вимикається ввечері;

5) HCL система має бути персоналізованою. Урахування індивідуальних властивостей людини забезпечується адаптивним характером HCL системи;

6) можливість вибору різних налаштувань освітлення, таких як інтенсивність світла, колірна температура, різні джерела світла, зональність освітлення, тривалість природного та штучного освітлення – це базові фактори впливу на комфортне для людини освітлення. Адаптивність системи досягається налаштуваннями HCL системи для індивідуального користувача шляхом накопичення даних і аналізу засобами AIoT. Персональні дані вподобань користувача, особисті потреби, ритми активності та відпочинку, залежно від власних вимог користувача є корисними для аналізу сучасними методами штучного інтелекту. Наприклад, якщо людина працює вночі і спить вдень, то HCL система може налаштуватися на знижену інтенсивність світла вдень і підвищену вночі. Адаптація до потреб користувачів також може включати аналіз ручного втручання користувача в керування світлом за допомогою додатків на смартфонах або інших пристроях, що дають змогу користувачам змінювати налаштування світла в будь-який момент;

7) HCL система виконує автоматичне реагування на присутність людини за допомогою датчиків руху в приміщенні та регулює рівень освітлення відповідно до зорових робіт людини. Наприклад, якщо датчики виявлять рух або присутність людини в приміщенні ввечері або вночі, система може автоматично встановити рівень світла для створення більш темної атмосфери. З іншого боку, вранці або вдень, коли активність людини в приміщенні більш очікувана, система може підвищити рівень світла для стимулювання більш енергійної атмосфери. Урахування наявності людини в приміщенні та характеру зорової роботи людини не

8) тільки підтримує природний ритм життя, але і забезпечує енергоефективність HCL системи;

9) HCL система враховує вплив зміни зовнішніх світлових умов залежно від часу доби та сезону року, що дає змогу зменшити витрати на освітлення. Наприклад, взимку, коли дні стають коротшими, система освітлення може автоматично збільшувати рівень штучного світла в приміщенні вранці для забезпечення більшої активності людини. У вечірній час, коли зовнішнє освітлення стає слабким, вибір системи може бути різним – або зменшувати рівень освітлення, щоб зменшити навантаження на очі та допомогти розслабленню людини, або, навпаки, збільшити рівень світла в приміщенні відповідно до персоналізованого плану освітлення.

Сучасний стан дослідження змін HCR і створення HCL систем використовують різні підходи та моделі керування освітленням (нечітка класифікація, нечітка система керування, методи машинного навчання) [15-17], але ці системи доволі фрагментарно описані в джерелах. У статті пропонується концептуальна модель HCL системи, побудована на нечіткій моделі збалансованого циркадного ритму людини.

### Основна частина

Концептуальна модель HCL системи впливу людино-орієнтованої системи розумного освітлення приміщення на HCR подана на рис. 2 за допомогою UML діаграми варіантів використання (Use Cases).

Актор (User) є користувачем людино-орієнтованої системи.

Керування системою може відбуватися за допомогою мобільного додатка, що передає дані у приватну хмару.

Хмара містить чотири додаткові модулі керування, окрім модуля освітлення, а саме модуль енергоефективності (Energy efficiency module) – за допомогою датчиків присутності людини вмикання/вимикання системи освітлення; модуль даних про навколишній світ (Environmental data module) – за допомогою датчиків температури, вологості, а також даних про погоду та пору року, регулювання штучного освітлення з урахуванням кількості природного світла; модуль даних про користувача (User data module) – вік, стать та інші дані про користувача, необхідні для персоналізації HCL системи; модуль даних про сон (Sleep data module) – якість і режим сну користувача.

Усі модулі мають вплив на автоматичний режим роботи концепту персоналізованого розкладу освітлення (Personalized Lighting Schedule), що включає концепт регуляції циркадного ритму (Circadian Rhythm Regulation). Circadian Rhythm Regulation є ключовим концептом HCL системи для

правильного впливу на HCR і, як наслідок, здоров'я, настрої і самопочуття людини.

Для збалансування циркадного ритму HCL система має підтримувати цикл денної та нічної активності користувача: підтримка неспання або бадьорості (Wakefulness Promotion) – сприяння пробудженню та пильності; підтримка сну (Sleep Promotion) – підготовка до сну і безпосередньо сон.

Залежно від часу доби виділено чотири концепти освітлення: ранкове (Morning lighting), денне (Daylighting), вечірнє (Evening lighting) і нічне (Night lighting). Уранці та вдень світло має бути більш яскраве та холодне. Увечері світло має бути більш тьмяне і тепле, а вночі дуже слабке або взагалі відсутнє.

Кожний концепт виду освітлення включає такі концепти, як спектральний склад світла (Spectral composition of light), інтенсивність світла (Light intensity) і тривалість освітлення (Lighting duration) для керування параметрами освітлення у приміщенні (на рис. 2 концепти керування виділені рожевим кольором).

Також основний концепт Personalized Lighting Schedule включає статистичні дані про зміну налаштувань користувачем (Statistics about settings by the user), до якого входять концепти спектрального складу світла (Spectral composition of light), інтенсивності світла (Light intensity) за планом тривалості освітлення на наступну добу (для персоналізації системи).



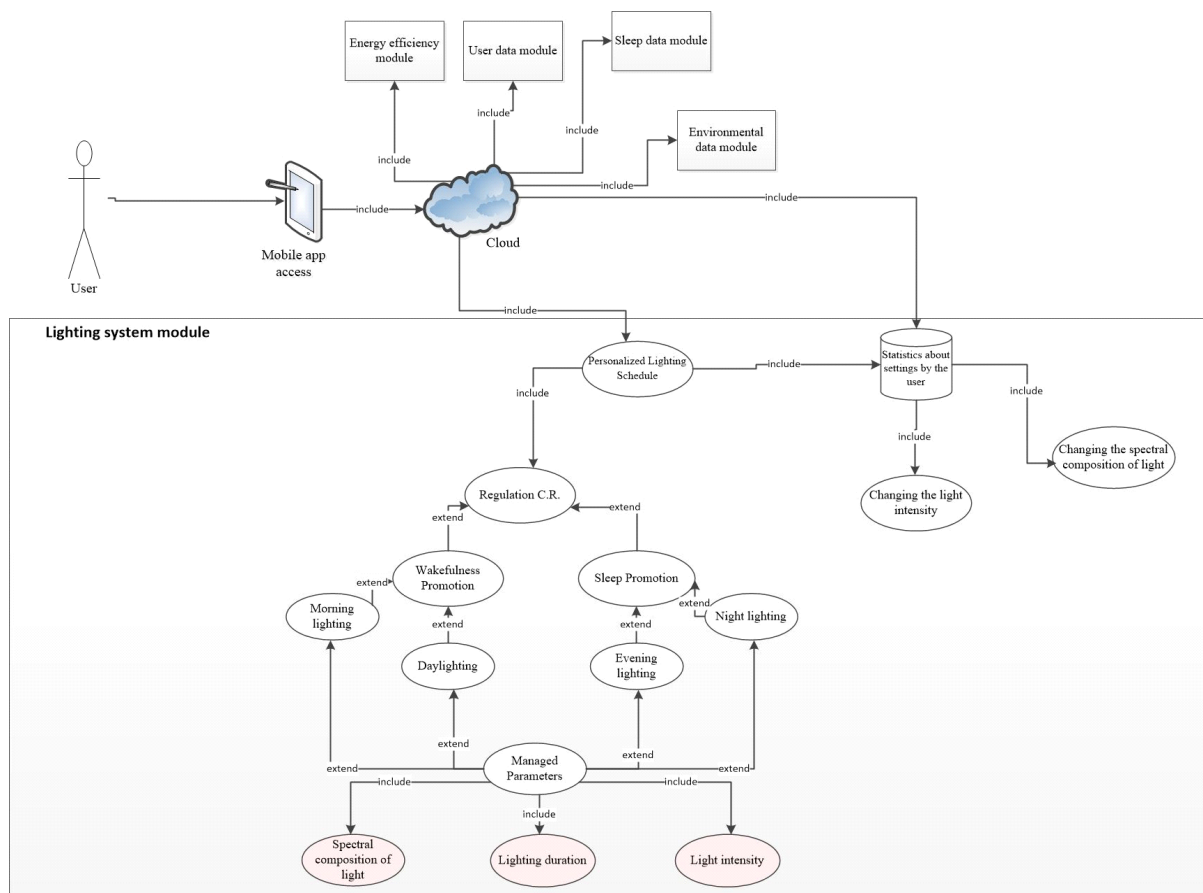


Рис. 2. Діаграма варіантів використання системи HCL

HCL за кількістю і взаємним впливом концептів є складною динамічною системою, що має джерела невизначеності параметрів:

1) результат роботи системи має задовольняти користувача з точки зору комфортності системи освітлення. Визначення комфортності системи може бути сформоване як експертне знання (нечітка змінна «комфортність»);

2) взаємний нелінійний вплив багатьох факторів впливу освітлення на HCR робить систему керування складною, що є додатковим джерелом невизначеності;

3) індивідуальна чутливість людини до параметрів системи освітлення може бути оцінена експертом і носить нечіткий характер;

4) результати вимірювання параметрів освітлення мають невизначеність за рахунок похибки вимірювання;

5) індикатори впливу освітлення на HCR побудовані дослідниками експериментально та здебільшого спираються на визначення рівня мелатоніну в крові людини, що не може бути повсякденною практикою для HCL системи.

Природно, що такі показники мають бути подані як нечіткі змінні.

Наприклад, індикатор впливу освітлення «крива фазової відповіді (PRC)» має бути подана в HCL системі як нечітка змінна «зсув циркадного ритму» (Shift of the Circadian Rhythm, SCR).

На рис. 3 зображена нечітка лінгвістична змінна з трьома термами – невеликий, середній і великий зсуви (Low, Middle, High).

Оскільки в кожного суб'єкта (користувача HCL системи) календарна доба поділяється умовно на суб'єктивний день і ніч тривалістю кожна по 12 годин, то випередження збалансованого HCR – це поступове зміщення дня на ніч. Випередження збалансованого HCR в 10 годин і вище є критичним, бо в користувача майже повністю помінялися місцями день і ніч. Таке відхилення потребує негайного корегування. Відхилення такого типу відображено в термі High. Відхилення HCR у межах однієї години в бік затримки або випередження порівняно зі збалансованим станом освітлення не є критичним і може самостійно корегуватися внутрішнім біологічним годинником протягом декількох днів. Таке відхилення належить до



низького і відображено в термі Low. Затримка HCR на три-п'ять годин порівняно зі збалансованим належить до терму Middle і є середнім відхиленням,

оскільки такий зсув не має миттєвих наслідків, а призводить до накопичуваної дії на організм суб'єкта.

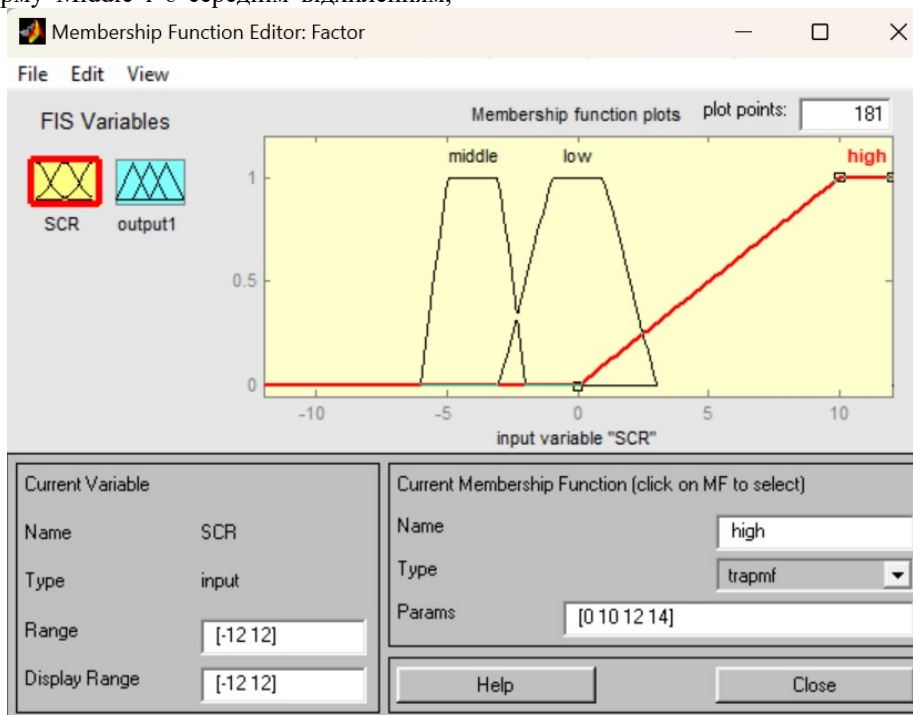


Рис. 3. Нечітка змінна «зсув циркадного ритму» (Matlab 6.1)

## Висновки

Циркадний ритм людини як модель складних взаємовідносин стану людини та оточення потребує подальших досліджень для створення комфортного для людини розумного будинку. Освітлення є найбільш вагомим фактором впливу на HCR, а створення людино-орієнтованих систем розумного освітлення приміщення потребує врахування встановлених факторів впливу на HCR.

У статті систематизовані як загальні фактори впливу на HCR, так і фактори впливу освітлення на HCR, проаналізовані індикатори впливу освітлення, обґрунтована необхідність створення HCL системи на основі нечіткого підходу та запропонована концептуальна модель HCL системи. За використанням сучасних досліджень впливу освітлення запропонована нечітка лінгвістична змінна для опису зсуву циркадного ритму під впливом подразників HCR.

У подальшому планується створення динамічної нечіткої моделі на основі подання знань HCL системи у вигляді нечітких змінних та операцій над нечіткими змінними.

## Список використаних джерел

1. Yousefzadehfard Y., Wechsler B., DeLorenzo C. Human circadian rhythm studies: Practical guidelines for inclusion/exclusion criteria and protocol. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2022.100080> (Last accessed: 1.06.2023).
2. Chan K., Wong F. S., Pearson J. A. Circadian rhythms and pancreas physiology: A review. *Frontiers in Endocrinology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.920261> (Last accessed: 1.06.2023).
3. Rijo-Ferreira F., Takahashi J. S. Genomics of circadian rhythms in health and disease. *Genome Medicine*. 2019. Vol. 11/1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13073-019-0704-0> (Last accessed: 1.06.2023).
4. Papatsimpa C., Bonarius J. H., Linnartz J. P. M. G. Human Centric IoT Lighting Control based on Personalized Biological Clock Estimations. 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), New Orleans, LA, USA. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/wf-iot48130.2020.9221206> (Last accessed: 1.06.2023).
5. Chellappa S. L. Individual differences in light sensitivity affect sleep and



6. circadian rhythms. *Sleep*. 2020. Vol. 44/2. URL: <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa214> (Last accessed: 1.06.2023).
7. Kim K.-M. et al. Development of a natural light reproduction system for maintaining the circadian rhythm. *Indoor and Built Environment*. 2019. Vol. 29/1. P. 132–144. URL: <https://doi.org/10.1177/1420326x19855421> (Last accessed: 1.06.2023).
8. Lok R. et al. Daytime melatonin and light independently affect human alertness and body temperature. *Journal of Pineal Research*. 2019. Vol. 67/1. URL: <https://doi.org/10.1111/jpi.12583> (Last accessed: 1.06.2023).
9. Busatto N. et al. Application of Different Circadian Lighting Metrics in a Health Residence. *Journal of Daylighting*. 2020. Vol. 7/1. P. 13–24. URL: <https://doi.org/10.15627/jd.2020.2> (Last accessed: 1.06.2023).
10. CS Calculator. Lighting Research Center. URL: <https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/> (Last accessed: 1.06.2023).
11. International WELL Building Institute. URL: <https://www.wellcertified.com/certification/v1/standard/tables> (Last accessed: 1.06.2023).
12. Addressing Oversimplifications. URL: <https://ccb.ucsd.edu/the-bioclock-studio/education-resources/basics/part3.html> (Last accessed: 1.06.2023).
13. Arguelles-Prieto R. et al. Phase Response Curve to Light under Ambulatory Conditions: A Pilot Study for Potential Application to Daylight Saving Time Transitions. *Biology*. 2022. Vol. 11/11. URL: <https://doi.org/10.3390/biology11111584> (Last accessed: 1.06.2023).
14. Pereira M. O. K. et al. Adjustable lighting system based on circadian rhythm for human comfort. *Journal of Optics*. 2022. Vol. 51. P.1028-1037. URL: <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00874-4> (Last accessed: 1.06.2023).
15. Marin-Donagueda M. et al. Simultaneous optimization of circadian and color performance for Smart Lighting systems design. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111456> (Last accessed: 1.06.2023).
16. Sornalakshmi K., Venkataraman R., Parthiban N., Kavitha V. IoT based Circadian Rhythm Monitoring using Fuzzy Logic. In *Proceedings of the 6th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security (IoTBDs 2021)*. Vol. 1. P. 223-228. URL: <https://doi.org/10.5220/0010451502230228> (Last accessed: 1.06.2023).
17. Perumal S. R., Baharum F. Design and Simulation of a Circadian Lighting Control System. *Journal of Daylighting*. 2022. Vol. 9/1. P. 64-82. URL: <https://doi.org/10.15627/jd.2022.5> (Last accessed: 1.06.2023).
18. Putrada A. G. et al. Machine Learning Methods in Smart Lighting Toward Achieving User Comfort: A Survey. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 45137-45178. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169765> (Last accessed: 1.06.2023).

**Petrenko T. G., Pavlusenko K. O. Conceptual model of a human-oriented smart lighting system**

**Abstract.** The Human Centric Lighting (HCL) system is part of a smart home and is designed to create a functional, economical and comfortable environment for people. Studies of the human circadian rhythm (Human Circadian Rhythm, HCR) prove the importance of creating HCL taking into account the factors influencing the lighting parameters on a person. The paper proposes a conceptual model of the HCL system based on balanced HCR.

**Keywords:** Human Centric Lighting system, Human Circadian Rhythm, conceptual model, circadian rhythm shift fuzzy variable.

*Надійшла 12.06.2023 р*

*Петренко Тетяна Григорівна, к.т.н., доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [petrenko\\_tg@kart.edu.ua](mailto:petrenko_tg@kart.edu.ua). ID ORSID: 0000-0001-6305-7918.*

*Павлусенко Ксенія Олександрівна, PhD студентка, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [pavlusenko8@kart.edu.ua](mailto:pavlusenko8@kart.edu.ua). ID ORSID: 0009-0001-5072-8038.*

*Tetyana Petrenko, Ph.D., Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: [petrenko\\_tg@kart.edu.ua](mailto:petrenko_tg@kart.edu.ua). ID ORSID: 0000-0001-6305-7918.*

*Kseniia Pavlusenko, PhD student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: [pavlusenko8@kart.edu.ua](mailto:pavlusenko8@kart.edu.ua). ID ORSID: 0009-0001-5072-8038.*



КАРГІН А. О., д.т.н., професор,

СІЛІН Є. Л., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

## Комп'ютерні експерименти з моделлю когнітивного сприйняття автономної інтелектуальної безпілотної системи: вплив старіння даних від сенсорів на впевненість оцінювання ситуації при прийнятті рішень

*Потреба в більш досконалих безпілотних системах (БС) підтримується тенденціями розвитку світового суспільства. Штучний інтелект (ШІ) відіграє важливу роль у підтримці необхідного рівня автономії БС. Розробники БС з підтримкою ШІ зосереджуються на створенні третього покоління ШІ, що відчуває (ШІВ), для автономних інтелектуальних БС (АІБС). Однією зі складових архітектури ШІВ є система когнітивного сприйняття, яка долає розрив між двома парадигмами «дані від датчиків» і «природні слова», що було і є основною проблемою для розгортання АІБС. У статті розглядається алгоритм, реалізований на базі моделі когнітивного сприйняття. Алгоритм виконує дистилляцію сенсу даних від датчиків шляхом обчислення внутрішнього сенсу слова на основі зовнішнього сенсу знань. Наведено формальні моделі подання зовнішнього сенсу знань, застосовуваних при дистилляції, алгоритм обробки, результати комп'ютерних і натурних експериментів, у яких як АІБС використаний колісний складський робот.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, що відчуває, когнітивне сприйняття, автономна інтелектуальна безпілотна система, дистилляція сенсу.

### Вступ

Сьогодні в повсякденному житті люди широко використовують сервіси і послуги інтернету речей та автономних безпілотних систем (БС) зі штучним інтелектом [1-3]. Потреба більш досконалих БС підтримується тенденціями розвитку світового соціуму. Військова сфера, розумні міста і розумні машини, промислові безлюдні системи, що звільняють людину від виконання рутинних операцій або функцій в умовах, небезпечних для життя і здоров'я, породжують попит, що зростає, на інтелектуальні БС [1, 4].

Незважаючи на гігантський прогрес у галузі створення БС [5, 6], забезпечення необхідного рівня їхньої автономності залишається актуальним завданням [7]. Важливу роль у вирішенні цього завдання відіграє ШІ. Сьогодні затребувані нові моделі ШІ, що спеціально розвиваються та адаптовані для АІБС [8, 9]. У науковій громадськості обговорюється можливість створення для АІБС загального ШІ третього покоління, який ураховує особливості БС і має когнітивні здібності, що підтримують

автономність прийняття рішень в умовах невизначеності та недружньому оточенні [7-9]. Запропоновано проєкт прототипу ШІВ, архітектуру та модель [6, 7]. Однією з основних компонент архітектури ШІВ є система сприйняття, що реалізує таку когнітивну функцію, як дистилляція сенсу даних від сенсорів [7]. Ця стаття присвячена дослідженню моделі когнітивного сприйняття (КС) та організації системи КС АІБС, обговорюються результати комп'ютерних експериментів щодо впливу старіння даних від сенсорів на оцінювання ситуації за критерієм впевненості.

### Обговорення проблеми.

У роботі [7] показано, що арсенал підходів і моделей ШІ, що можуть бути адаптовані для вирішення завдання дистилляції сенсу даних від датчиків АІБС, можна поділити на дві групи: 1) орієнтовані на обробку даних від датчиків; 2) орієнтовані на обробку знань.

Перша група включає підходи злиття даних від сенсорів (інтелектуальний аналіз, вилучення знань із потоків даних, агрегація різнорідних даних [8]) і дистиляцію знань, подані в символічному вигляді [9]. Ці моделі можуть бути використані на етапах первинної обробки даних, але вони не вирішують завдання вилучення змісту просторово-часового набору даних від сенсорів. З цієї ж причини важко використовувати «чисті» моделі штучних нейронних мереж для додатків, до яких належить АІБС.

Підхід ШІ на основі знань, відомий як системи, засновані на правилах [10], дає змогу реалізовувати завдання прийняття рішень з урахуванням більшості вищезазначених особливостей. Прийняття рішень у робототехніці, інтернеті речей, розумних машинах здійснюється на основі моделей виведення за правилами [11]. Вони широко використовуються у вбудованих системах реального часу, однак проблема узагальнення даних залишається актуальною. На основі наведеного аналізу в роботі [12] запропоновано завдання дистиляції сенсу даних вирішити на основі підходу гранулярних обчислень і концептуальної моделі L. Zadeh Computing with Words [13]. Схема обробки інформації в системі КС АІБС із застосуванням цього підходу така. Дані від сенсорів після попередньої обробки гранулюються. На виході блока грануляції дані подані на множині всіх гранул нечіткими характеристиками. Далі блок дистиляції сенсу даних узагальнює та абстрагує дані на основі знань предметної сфери, подані експертами вербально

у вигляді сенсу слів природної мови. На виході блока дистиляції – оцінювання набору даних у вигляді невеликої кількості численних нечітких характеристик сенсу ситуації в цілому. Далі нечіткі характеристики сенсу ситуації використовуються як вхідні численні змінних алгоритмів нечіткого логічного висновку в АІБС. На виході цього блока чисельні значення керуючих сигналів передаються на виконавчі механізми (актуатори) АІБС і реалізуються різними контролерами.

У цій статті розглядаються алгоритм дистиляції сенсу даних від сенсорів у системі КС АІБС, результати застосування цього алгоритму в комп'ютерних експериментах з метою демонстрації суттєвого скорочення розмірності завдання управління за рахунок дистиляції сенсу великого набору даних від сенсорів і можливості використання дистилляту як вхідних змінних нечіткого логічного виведення (НЛВ) для управління в АІБС. Наведено результати комп'ютерних експериментів, що показують залежність впевненості оцінювання ситуації при прийнятті рішень АІБС від старіння даних від сенсорів.

#### Модель когнітивного сприйняття даних від сенсорів в АІБС.

Елементарною порцією знань про оточення АІБС є гранула знань (ГЗ). Така порція знань має зовнішній (ЗСГЗ) і внутрішній сенси (ВСГЗ) [14].

Формальне визначення ЗСГЗ має вигляд

$$\langle N, know, \{ \langle M_i, (a_i, b_i, v_i, g_i) \rangle, \forall M_i \in \Omega_N \} \rangle \quad (1)$$

де  $N$  – ідентифікатор ГЗ;  
 $know$  – знакова модель гранули;  
 $\Omega_N = \{M_i\}_{i=1, 2, \dots, l}$  – множини ГЗ, використовувани для розкриття сенсу гранули  $N$ ;  
 $M_i$  – ідентифікатор ГЗ нижчого рівня абстракції.

У виразі (1) вказані параметри, що чисельно оцінюють:  $a_i$  – впевненість експерта в тому, що поняття про  $M_i$  необхідно для розкриття сенсу поняття  $N$ ;  $b_i$  – часову затримку при визначенні динамічних відношень;  $v_i$  – швидкість старіння інформації щодо  $M_i$ ;  $g_i$  – інформаційну повноту: чи достатньо знань про ГЗ  $M_i$ , щоб розуміти сенс ГЗ  $N$ .

У базі знань (БЗ) АІБС множина ГЗ структурована, гранули розташовані за рівнями абстрагування [15]. На нижньому нульовому рівні ГЗ дають визначення сенсу даних від сенсорів.

Наприклад, на рис. 1, а подано ЗСГЗ у загальному випадку за допомогою функції нечіткого фактора впевненості (НФВ) [14]. На рис. 1, б наведено приклад гранулювання даних від сенсора відстані та подання цих даних ГЗ. Цю сенсорну модальність зображено як чотири гранули, що описують знання про рухомий об'єкт-перешкоду, який може знаходитися чи в першому секторі, чи другому, чи третьому, або має місце ситуація, коли в колі досяжності сенсора немає жодного об'єкта.

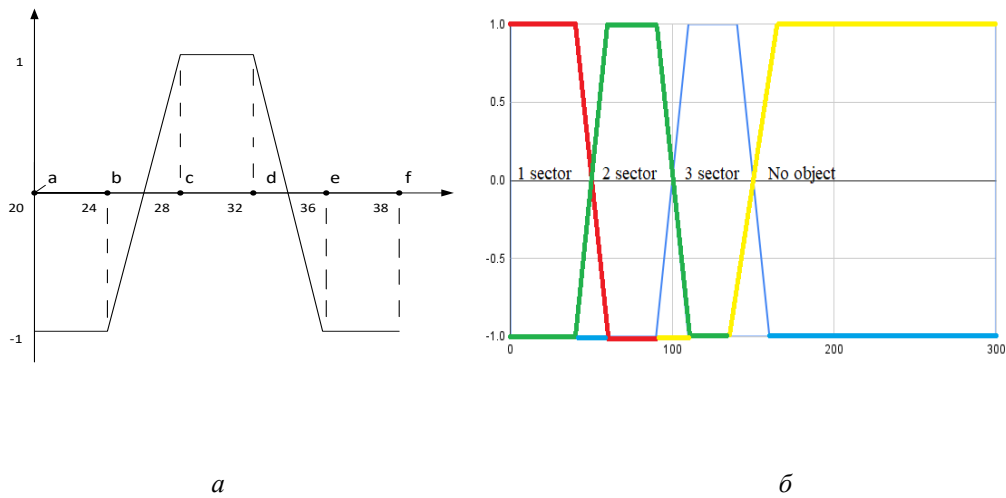


Рис. 1. Графічна ілюстрація визначення ЗСГЗ нульового рівня: *a* – загальний вигляд функції нечіткого фактора впевненості для однієї гранули; *б* – приклад визначення ЗСГЗ модальності локалізації об’єктів навколо робота

Подання знань у вигляді виразу (1) проілюструємо на прикладі складського робота (кобота [7]), а саме фрагмента знань, необхідних для безпечного перетину нерегульованого перехрестя для продовження руху заданим маршрутом складу. На рис. 2 наведена ситуація, коли ко-бот на в’їзній дорозі перехрестя сканує послідовно три інші під’їзні дороги для оцінювання ситуації (небезпечна чи безпечна для виконання маневру на перехресті).

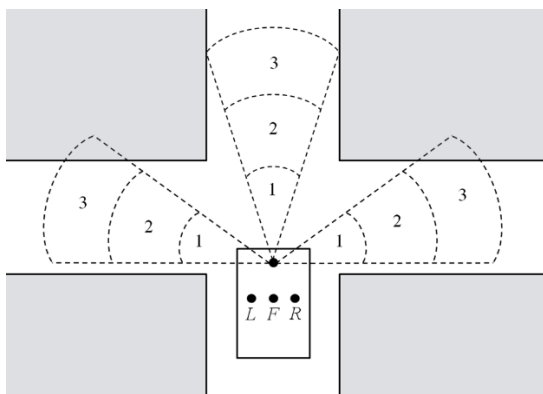


Рис. 2. Приклад сканування ситуації на перехресті шляхів

Моделювання та експерименти проводилися з прототипом ко-бота, апаратне забезпечення якого базується на чотириколісному роботі з повноприводним шасі Multi Chassis-4WD Robot Kit ATV і мікроконтролером Arduino Mega, набором Motor shield, модулем wi-fi esp8266, десятьма інфрачервоними датчиками відображення ку-033 для сприйняття розмітки на підлозі, ультразвуковим датчиком HC-SR04, встановленим на поворотній платформі з сервоприводом SG90, і датчиком

одометром H206 [16]. Ситуація навколо робота подана як гранулярна модель, побудована на основі даних від ультразвукового сенсора на сервоприводі, що встановлює напрямок і вимірює місцезнаходження об’єкта, ідентифікованого сенсором, швидкість і напрямок руху. На рис. 2 модель відображення поточного стану оточення ко-бота запропонована у вигляді двомірної просторової карти. На рисунку наведено спрощений варіант, коли простір, що охоплює сенсор, розбитий на три напрямки. Розрахунки нечітких характеристик гранул 0-го рівня проводилися з моделлю з 18 секторів з кутом огляду  $\pm 15^\circ$ , похибками вимірювання відстані сенсором  $\pm 5$  см і точністю позиціонування поворотної платформи  $\pm 7^\circ$ .

Визначення сенсу цих ГЗ дано на їхніх предметних шкалах, як показано на рис. 1. На рис. 3 наведено фрагмент БЗ, що дає визначення ситуації на перехресті шляхів. Гранули знань поділені за рівнями абстрагування. Рівень указаний першою цифрою ідентифікатора ГЗ, наприклад *0.Speed* вказує на приналежність сенсорної модальності *Speed* 0-му рівню. Ця порція знань дає визначення трьом ГЗ у вигляді понять швидкості руху, а саме об’єкт не рухається (*stop*), рухається повільно (*slow*), рухається швидко (*fast*). Визначення ЗСГЗ цих гранул задано на універсумі швидкості руху, см/с, параметрами функції НФП, як показано на рис. 1. На нульовому рівні БЗ дано визначення 11 гранулам. Це чотири ГЗ модальності *0.Loc* з ідентифікаторами ГЗ *1sector*, *2sector*, *3sector*, що дають визначення, чи знаходиться об’єкт-перешкода в *першому*, другому або третьому секторі; три ГЗ *stop*, *slow*, *fast* модальності *0.Speed* швидкості руху об’єкта і дві ГЗ *approached*, *removed* модальності *0.DirMov*, що визначають, наближується

чи віддаляється об'єкт від ко-бота, і три ГЗ *left*, *forward*, *right* модальності *0.Direc*.

1. <**3.EverywhereSafe**, *Everywhere safe*, {<**2.RSafe**, (0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**2.LSafe**, (0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**2.FSafe**, (0.75, t, 0.1, 0.33)>}>;
2. <**3.EverywhereDangerous**, *Everywhere dangerous*, {<**2.FDirecDang**, (0.75, t, 0.1, 1.0)>, <**2.LDirecDang**, (0.75, t, 0.1, 1.0)>, <**2.RDirecDang**, (0.75, t, 0.1, 1.0)>}>;
- 3 <**2.FSafe**, *Forward safe*, {<**1.FSafe1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.FSafe2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
4. <**2.LSafe**, *Left safe*, {<**1.LSafe1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.LSafe2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
5. <**2.RSafe**, *Right safe*, {<**1.RSafe1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.RSafe2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
- 6 <**2.FDang**, *Forward safe*, {<**1.FDirecDang1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.FDirecDang2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
7. <**2.LDang**, *Left safe*, {<**1.LDirecDang1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.LDirecDang2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
8. <**2.RDang**, *Right safe*, {<**1.RDirecDang1** (0.75, t, 0.1, 1.0)>, **1.RDirecDang2** (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
9. <**1.FSafe1**, *Forward safe 1<sup>st</sup>-case*, {<**0.ObjectForward\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&3sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>}>;
10. <**1.LSafe1**, *Left safe 1<sup>st</sup>-case*, {<**0.ObjectLeft\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&3sector**, (0.75, t, 0.1, 0.33)>}>;
11. <**1.RSafe1**, *Right safe 1<sup>st</sup>-case*, {<**0.ObjectRight\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&3sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.33)>}>;
12. <**1.FSafe2**, *Forward safe 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectForward\*0.DirMov&removed**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
13. <**1.LSafe2**, *Left safe 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectLeft\*0.DirMov&removed**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
14. <**1.RSafe2**, *Right safe 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectRight\*0.DirMov&removed**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>;
15. <**1.FDirecAlmSafe**, *Forward direction almost safe*, {<**0.ObjectForward\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&3sector**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectForward\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectForward\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.2)}>}>;
16. <**1.LDirecAlmSafe**, *Left direction almost safe*, {<**0.ObjectLeft\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&3sector**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectLeft\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectLeft\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.2)}>}>;
17. <**1.RDirecAlmSafe**, *Right direction almost safe*, {<**0.ObjectRight\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&2sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&3sector**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectRight\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.2)>, <**0.ObjectRight\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.2)}>}>;
18. <**1.FDirecAlmDang**, *Forward direction almost dangerous*, {<**0.ObjectForward\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
19. <**1.LDirecAlmDang**, *Left direction almost dangerous*, {<**0.ObjectLeft\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectLeft\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
20. <**1.RDirecAlmDang**, *Right direction almost dangerous*, {<**0.ObjectRight\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.Speed&slow**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
21. <**1.FDirecDang1**, *Forward direction dangerous 1<sup>st</sup>*, {<**0.ObjectForward\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Speed&fast**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
22. <**1.LDirecDang1**, *Left direction dangerous 1<sup>st</sup>*, {<**0.ObjectLeft\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectLeft\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectLeft\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectForward\*0.Speed&fast**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
23. <**1.RDirecDang1**, *Right direction dangerous 1<sup>st</sup>-case*, {<**0.ObjectRight\*0.Loc&1sector**, (-0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.Loc&2sector**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.DirMov&approached**, (0.75, t, 0.1, 0.25)>, <**0.ObjectRight\*0.Speed&fast**, (0.75, t, 0.1, 0.25)}>}>;
24. <**1.FDirecDang2**, *Forward direction dangerous 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectForward\*0.Loc&1sector**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>}>;
25. <**1.LDirecDang2**, *Left direction dangerous 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectLeft\*0.Loc&1sector**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>}>;
26. <**1.RDirecDang2**, *Right direction dangerous 2<sup>nd</sup>-case*, {<**0.ObjectRight\*0.Loc&1sector**, (0.75, t, 0.1, 1.0)}>}>;
27. <**0.ObjectRight\***, *Object in right allocated by attention*, {<**Event(0.Direc&right)**>, <**0.Loc**>, <**0.Speed**>, <**0.DirMov**>}>;

28. <**0.ObjectForw\***, Object in forward allocated by attention, {<Event(**0.Direc&forw**)>,<**0.Loc**>, <**0.Speed**>, <**0.DirMov**>}>;
29. <**0.ObjectLeft\***, Object in left allocated by attention, {<Event(**0.Direc&left**)>,<**0.Loc**>, <**0.Speed**>, <**0.DirMov**>}>;
30. <**0.DirMov**, direction of movement, {<**approached**, (-300,-25,25,300,300,300)>, <**removed**, (-300,-300,-300,-25,25,300)>}>;
31. <**0.Speed**, Speed of movement, {<**stop**, (0,0,0,0.2,0.4,4.0)>, <**slow**, (0,0.5,0.8,1.3,1.5,4.0)>, <**fast**, (0,1.3,2.0,4.0,4.0,4.0)>}>;
32. <**0.Direc**, Direction of the ultrasonic sensor, {<**left**, (-90,-90,-90,-35,-25,90)>, <**forward**, (-90,-35,-25,25,35,90)> <**right**, (-90, 25, 35, 90, 90,90)>}>;
33. <**0.Loc**, Object location, {<**1sector**,(0,0,0,40,60,300)>, <**2sector**,(0,40,60,90,110,300)>, <**3sector**,(0,90,110,135,165,300)>}>.

Рис. 3. Фрагмент БЗ, що дає визначення ситуації на перехресті шляхів

У визначеннях ЗСГЗ на рисунку ідентифікатори ГЗ зчеплені з ідентифікаторами сенсорної модальності, до якої вони належать. Наприклад, посилення на ГЗ **fast** модальності **0.Speed** дано у вигляді **0.Speed&fast**. Особливу увагу заслуговує визначення трьох структур об'єкта-перешкоди. Так, коли поворотна платформа встановлена в певну позицію, наприклад  $right^{+75^\circ}$ , отримані дані характеризують цей певний напрямок. Тому вони мають бути «прив'язані» до цього значення, а саме показань сенсора модальності **0.Direc**. Зірочка наприкінці ідентифікатора вказує, що це є структура **0.ObjectRight\*** з ГЗ трьох модальностей (на рис. 3 визначення 27). Ця структура містить НФВ для 8 ГЗ трьох модальностей **0.Loc**>, <**0.Speed**>, <**0.DirMov**>. У визначенні, наприклад 27 на рис. 3, запис **Event(0.Direc&right)** означає, що як тільки трапиться подія (поворотна платформа займе позицію  $right^{+75^\circ}$ ), механізм уваги «зосередиться» на цьому напрямку (усі дані, отримувані від датчиків, зберігаються в структурі **0.Direc&right**).

ВСГЗ є чисельна оцінка ступеня відповідності ЗСГЗ (1) ситуації, поданій даними від сенсорів. Числове значення оцінки ВСГЗ залежить, по-перше, від параметрів ЗСГЗ у виразі (1), по-друге, від ВСГЗ  $M_i \in \Omega_N$ , розрахованих для тих самих даних від сенсорів. Іншими словами, ВСГЗ – це оцінювання відповідності вербального подання (1) ЗСГЗ даним від датчиків, на основі яких визначається сенс ГЗ. Формальну обчислювальну модель ЗСГЗ наведено в роботі [14].

Кількісно ЗСГЗ оцінюється НФВ.

У роботі [14] введено НФВ як нечітке LR число X

Алгоритм обчислення ВСГЗ наведено на рис. 4.

**Input** data from sensors modality, domain KB in the form of a structure Fig. 4, in which the KG is the definition of “What is it” in the form of prototypes (1)

**Output** set of  $cf(KG_{il})$ ,  $\forall KG_{il} \in \Omega_{KG}$ ,  $\forall \Omega_{KG}^l \in \Omega_{KG}^0 \cup \Omega_{KG}^1 \dots \cup \Omega_{KG}^k$ , where  $cf(KG_{il})$  is a numerical assessment of the confidence that the data from sensors of given modality are consistent with the verbal definition of the situation presented by the  $KG_{il}$

**Precalculations of time delays**

**while**  $l \leq L$ , where  $l = 1, 2, \dots, L$ ,  $L$  is quantity of levels of KB **do**

**while**  $n \leq N$ , where  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  is quantity of KG of  $l$ th levels **do**

$$X : \{x \mid m_X(x), \forall x \in [-q, +q], q \geq +1\} \quad (2)$$

з гаусовою L-R функцією приналежностей

$$m_X^L(x) = \exp(-(x-\alpha)^2 / 2 \cdot (v_L \cdot t_L)^2), \forall x \in [-1, \alpha] \quad (3)$$

$$m_X^R(x) = \exp(-(x-\alpha)^2 / 2 \cdot (v_R \cdot t_R)^2), \forall x \in (\alpha, +1]$$

з трьома параметрами:  $(-1.0 \leq \alpha \leq +1.0)$  впевненість;  $t_L$  – інтервал часу з моменту отримання даних;  $t_R$  – інтервал часу з моменту зміни даних.

Передбачувана впевненість (ПВ) є чисельною оцінкою НФВ, що враховує старіння даних, розраховується на підставі формул (2) і (3) як

$$cf = \alpha \cdot k_t, \quad (4)$$

де  $v_L, v_R$  – коефіцієнти швидкості старіння даних;

$$k_t = 1 - \frac{\sum_{\forall x \in [-1, \alpha]} m_X^L(x) + \sum_{\forall x \in (\alpha, +1]} m_X^R(x)}{\text{Card}([-1, +1]) - 1}.$$

Старіння даних з часом призводить до того, що впевненість прагне до нуля (повна відсутність впевненості), тобто  $cf \approx 0$ . Для випадків, коли інтервали часу невеликі (з моменту отримання інформації чи в спеціальних випадках з моменту змінення даних), впевненість не дуже змінюється порівняно з  $\alpha$ , тобто  $cf \approx \alpha$ .

```

 $t_{L}^{ln} = t_{L}^{ln-1} + 1; t_{R}^{ln} = t_{R}^{ln-1} + 1;$ 
end while
end while
if data from the sensor was not received then goto end DbA
Step 1. Quantitative Abstraction
while  $j \leq J$ , where  $J$  is quantity of modality sensors do
    get  $x^*$  data from sensor  $j$ 
    while  $h \leq H$ , where  $H$  is quantity of sensor IGs do
        Calculate fuzzy certainty factor:
        
$$\alpha_{jh} = \begin{cases} -1.0, & \text{if } x^* \in [a_{jh}, b_{jh}) \text{ or } x^* \in [e_{jh}, f_{jh}] \\ -1.0 + 2 \frac{x^* - b_{jh}}{c_{jh} - b_{jh}}, & \text{if } x^* \in [b_{jh}, c_{jh}) \\ +1.0 - 2 \frac{x^* - d_{jh}}{e_{jh} - d_{jh}}, & \text{if } x^* \in [d_{jh}, e_{jh}) \\ +1.0, & \text{if } x^* \in [c_{jh}, d_{jh}) \end{cases}$$

    end while
end while
Step 2. Abstraction by Generalization
while  $l \leq L$ , where  $l = 1, 2, \dots, L$ ,  $L$  is quantity of levels of KB do
    while  $n \leq N$ , where  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  is quantity of KG of  $l$ th levels do
        Calculate fuzzy certainty factor of  $KG_{ln}$ 
         $\alpha_{ln}$  using formulas (3.10)-(3.20) in [14]
         $t_L^{ln} = 0$ 
        
$$t_R^{ln} = \begin{cases} 0, & \text{if } (\alpha_{ln} \geq \varepsilon \ \& \ \neg q_{ln} = 0) \text{ or } (\alpha_{ln} \leq -\varepsilon \ \& \ \neg q_{ln} = 1) \\ -t_R^{ln}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

        
$$q_{ln} = \begin{cases} 1, & \text{if } (\alpha_{ln} \geq \varepsilon \ \& \ \neg q_{ln} = 0) \\ 0, & \text{if } (\alpha_{ln} \leq -\varepsilon \ \& \ \neg q_{ln} = 1) \\ \neg q_{ln}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

    end while
end while
end DbA

```

Рис. 4. Алгоритм обчислення ВСГЗ

### Експерименти з застосуванням алгоритму обчислення ВСГЗ.

У статті наведено результати експериментів з алгоритмом обчислення ВСГЗ. Перша частина експериментів присвячена дослідженню старіння з часом отриманих даних від датчиків і, як наслідок, старіння знань ВСГЗ, що описують ситуацію на перехресті. Розглядається випадок, коли ко-бот під'їхав в'їзною дорогою до перехрестя, як показано на рис. 2, зупинився для отримання даних і побудови моделі ситуації на перехресті. Сканування оточення виконується покроковим позиціонуванням справа наліво поворотної платформи, на якій встановлено ультразвуковий датчик. Відповідно до технічних характеристик датчика встановлено кількість і послідовність проходження таких позицій поворотною

платформною (напрямки зору датчика):  $right^{+75^\circ}$ ,  $right^{+45^\circ}$ ,  $forward^{+15^\circ}$ ,  $forward^{-15^\circ}$ ,  $left^{-45^\circ}$ ,  $right^{-75^\circ}$ . Побудова моделі ситуації за одним таким напрямком (поворот платформи з поточної позиції до наступної, отримання й обробка даних від датчика та обчислення за алгоритмом ВСГЗ) займає 200 мс. При налаштуванні моделі НФВ у розглянутому експерименті було прийнято за одиницю часу  $t_L$  і  $t_R$  100 мс реального часу. Відповідно й параметр  $b$  у виразі (1) пов'язаний з реальним часом експерименту співвідношеннями 1:100.

Стан оточення ко-бота на перехресті на довільний момент часу  $t$  подано ВСГЗ як ПВ на такій множині гранул:

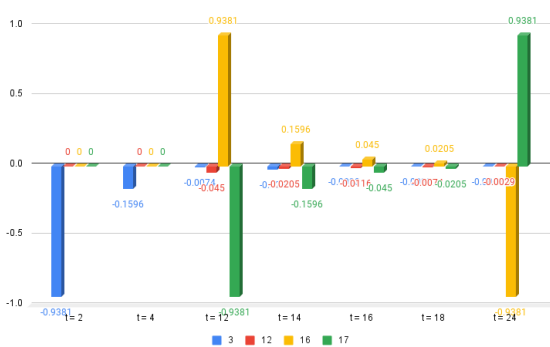
$$\begin{aligned}
 &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec3}}(t), cf_{right^{+45^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{right^{+45^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{right^{+45^\circ} \text{ sec3}}(t), \\
 &cf_{forward^{+15^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{forward^{+15^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{forward^{+15^\circ} \text{ sec3}}(t), \\
 &cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec3}}(t), \\
 &cf_{left^{-45^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{left^{-45^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{left^{-45^\circ} \text{ sec3}}(t), cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec1}}(t), cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}}(t), cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}}(t).
 \end{aligned} \tag{5}$$

У формулах (5)  $cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}}(t)$  означає ПВ, кольором – значення  $cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}}$ , жовтим і що оцінює впевненість у наявності об’єкта-перешкоди в першому секторі (рис. 2) напрямку  $right^{+75^\circ}$ . зеленим – значення ПВ  $cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}}$  і  $cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}}$

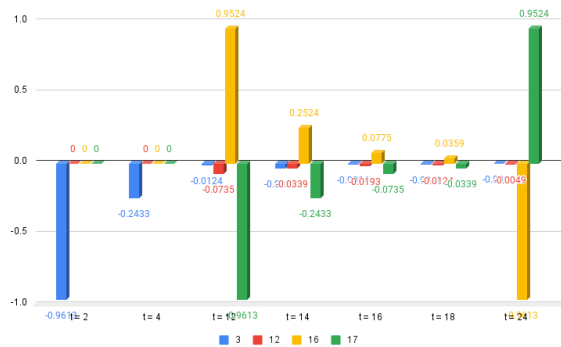
На рис. 5 у графічному вигляді наведені не всі ГЗ (5), а тільки чотири. Синім кольором зображені значення ПВ  $cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}}$  ГЗ  $right^{+75^\circ} \text{ sec1}$ , червоним відповідно. На графіках рис. 5 по осі ординат вказано значення  $cf$  (4), а по осі абсцис час у масштабі 1:100 мс. Наведено такий часовий фрагмент для семи моментів часу  $t$ :

$$\begin{aligned}
 t = 2, right^{+75^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = -0.94, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = 0, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = 0, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = 0, \\
 t = 4, right^{+45^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = -0.16, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = 0, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = 0, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = 0, \\
 t = 12, left^{-75^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = -0.007, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = -0.05, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = -0.94, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = 0.94, \\
 t = 14, right^{+75^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = -0.02, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = -0.02, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = 0.16, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = -0.16, \\
 t = 16, right^{+45^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = -0.003, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = 0.02, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = -0.05, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = 0.05, \\
 t = 18, forward^{+15^\circ} : &cf_{right^{+75^\circ} \text{ sec1}} = 0.003, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = 0.007, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = -0.02, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = 0.02, \\
 t = 24, left^{-75^\circ} : &cf_{right^{+45^\circ} \text{ sec1}} = -0.002, cf_{forward^{-15^\circ} \text{ sec1}} = -0.003, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec2}} = 0.94, cf_{left^{-75^\circ} \text{ sec3}} = -0.94
 \end{aligned} \tag{6}$$

У формулах (6) кожен рядок містить дані для окремого моменту часу.



а



б

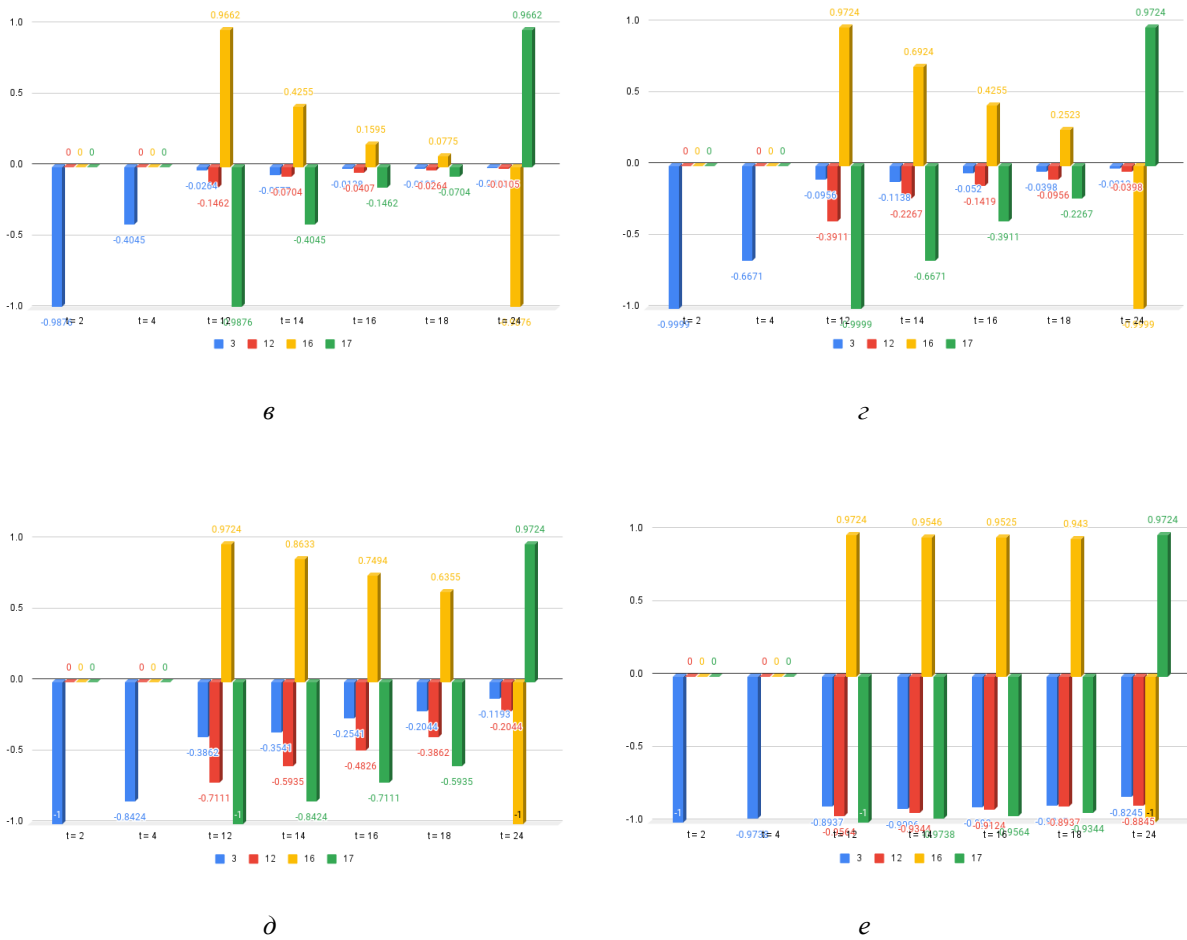


Рис. 5. Залежність фактора впевненості від коефіцієнта швидкості старіння даних:

а –  $v_R=v_L=1.0$ ; б –  $v_R=v_L=0.75$ ; в –  $v_R=v_L=0.5$ ; г –  $v_R=v_L=0.25$ ; д –  $v_R=v_L=0.1$ ; е –  $v_R=v_L=0.01$

Так, наприклад, у другому рядку показані дані для часу  $t=4$ , коли поворотна платформа позиціонована за напрямком  $right^{75^\circ}$  і містить значення ПВ чотирьох ГЗ  $cf_{right^{+75^\circ}sec1}$ ,  $cf_{forward^{-15^\circ}sec1}$ ,  $cf_{left^{-75^\circ}sec2}$ ,  $cf_{left^{-75^\circ}sec3}$

на цей час. Оскільки дані напрямку  $right^{75^\circ}$  були отримані раніше на дві одиниці часу, то ПВ гранули  $right^{75^\circ}sec1$  відповідно до виразу (4) було обчислено з урахуванням старіння на  $t=2$  одиниці часу. ПВ останніх трьох ГЗ обчислено на підставі зовсім старих даних, оскільки з цих напрямків ще не було отримано даних. Тому значення ПВ у них  $cf=0$ , тобто повна невпевненість щодо присутності чи відсутності об'єкта-перешкоди в цих секторах. ВСГЗ у вигляді ПВ у випадках (б) обчислені для найбільшого значення коефіцієнта швидкості старіння даних  $v_L=v_R=1$ . Тому і

ПВ гранули  $right^{75^\circ}sec1$ , значення якої було отримано на попередньому кроці моніторингу, наближається до нуля, незважаючи на те, що дві одиниці часу раніше воно дорівнювало  $cf=-0.94$ . На рис. 5 наведено результати обчислення ВСГЗ одних і тих самих ГЗ для одного і того самого часового фрагменту для різних коефіцієнтів швидкості старіння даних. Аналіз піктограм показує, що коефіцієнт  $v_L, v_R$  суттєво впливає на ПВ. При  $v_L=v_R=1$  достатньо 3-5 одиниць часу, щоб отримати повну невпевненість у даних, отриманих попереднє. З іншого боку, при  $v_L=v_R=0.01$  (рис. 5, е) дані практично не старіють з часом, що є дуже небезпечно для прийняття рішень у динамічному оточенні, коли ситуація змінюється з часом. Аналіз піктограм за наявності даних про динамічні характеристики оточення дає змогу підібрати значення коефіцієнтів швидкості старіння так, щоб мінімізувати ризики АБС при прийнятті рішень.

## Висновки

Модель КС здатна забезпечити необхідну автономність АІБС завдяки двом рішенням. По-перше, дистильоване знання високого рівня абстракції, що підтримується моделями ЗСГЗ та ВСГЗ, відкриває можливість використання НЛС як механізму прийняття рішень і управління. По-друге, модель КС, крім проблеми великої розмірності простору прийняття рішень ФЛС, вирішує й проблему великої ресурсоемності алгоритму обчислення ВСГЗ завдяки врахуванню впливу старіння даних і знань про динамічне оточення АІБС на НФВ при прийнятті рішень. Комп'ютерні обчислення й експерименти з прототипом АІБС підтверджують можливість застосування штучного інтелекту третього покоління ШІВ в управлінні АІБС і відкривають перспективи подальшого розвитку цього напрямку.

Надалі планується розроблення моделі навчання ШІВ в оперативному (on-line real-time) режимі з метою автоматичного формування нових ГЗ у БЗ.

#### Список використаних джерел

- Shakhatreh H. et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. J. IEEE Access. Vol. 7. P. 48572–48634. Apr. 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- Unmanned Systems. (2022). NovAtel. Accessed: August 25. 2022. [Online]. URL: <https://novatel.com/industries/unmanned-systems>.
- The Future of Autonomy. Isn't Human-Less. It's Human More. (2022). Lockheed Martin. Accessed: August 25. 2022. [Online]. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>.
- Rasmussen S., Kingston D. and Humphrey L. Brief Introduction to Unmanned Systems Autonomy Services (UxAS). 2018 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS). Jun. 2018. P. 257-268. doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453287.
- Litman T. A. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Inst., Rep. Aug. 2022.
- Zhang T. et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng. Vol. 18. Feb. 2017. P. 68–85. doi: 10.1631/FITEE.1601650.
- Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems. Conference Proceedings of 2022 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT) Alamein New City, Egypt, 18-21 December 2022. P. 88-93.
- Garcia G., Luengo J., Herrera F. Data preprocessing in data mining. Intelligent Systems Reference Library. Springer Cham, 2015. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>.
- West P. et al. Symbolic Knowledge Distillation: from General Language Models to Commonsense Models. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.07178>.
- Каргин А. А. Введение в интеллектуальные машины. Кн. 1. Интеллектуальные регуляторы. Донецк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. 526 с.
- Kargin A., Petrenko T. Internet of Things Smart Rules Engine. 2018 IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). P. 639-644. URL: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632027>.
- Kargin A., Petrenko T. Multi-level Computing With Words Model to Autonomous Systems Control, in: Proc. 9th Int. Conf. Inf. Control Sys.&Tech (ICST-2020), A. Pakštas, T. Hovorushchenko, V. Vychuzhanin, H. Yin, N. Rudnichenko. Eds. Odessa, Ukraine, 2020, CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2711. P. 16-30. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>.
- Zadeh L. A. Computing with words. Principal concepts and ideas. Studies in Fuzziness and Soft Computing 277. Springer, Berlin. 2012. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27473-2>.
- Kargin A., Petrenko T. Spatio-Temporal Data Interpretation Based on Perceptual Model. In: Mashtalir V., Ruban J., Levashenko V. (eds) Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data. Studies in Computational Intelligence. Vol. 876. Springer, Cham. 2020. P. 101-159. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0>.
- Kargin A., Petrenko T. Method of Using Data from Intelligent Machine Short-Term Memory in Fuzzy Logic System. 2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2021. P. 842-847. URL: <https://doi.org/10.1109/wf-iot51360.2021.9594918>.
- Каргин А. О., Жуков С. В., Сергеев Д. А., Сілін Є. Л. Модель базового рівня штучного оточення автономних інтелектуальних безлюдних систем на прикладі мобільного робота, що обслуговує. Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. Вип. 2 (72). С. 107-113.

**Kargin A. O., Silin E. L. Computer experiments with a model of cognitive perception of an autonomous intelligent unmanned system: the effect of aging data from sensors on the confidence of assessing the situation when making decisions**

**Abstract.** The need for more advanced Unmanned Systems (US) is supported by the development trends of



world society. Artificial Intelligence (AI) plays an important role in maintaining the required level of autonomy. AI-enabled US developers are focusing on the creation of the third generation of Feeling AI (FAI) for autonomous intelligent US (AIUS). One of the components of the FAI architecture is a system of cognitive perception, which overcomes the gap between the two paradigms «data from sensors» and «natural words», which was the main problem for the deployment of AIUS. The article considers an algorithm implemented on the basis of a model of cognitive perception. The algorithm distills the sense of data from form sensors by calculating the internal meaning of a word based on the external meaning of knowledge. Formal models of the representation of the external meaning of knowledge used in distillation and the processing algorithm are presented. The results of computer and real experiments in which a wheeled warehouse robot was used as AIUS are given.

**Keywords.** feeling artificial intelligence, cognitive perception, autonomous intelligent unmanned system, sense distillation of meaning

*Надійшла 12.06.2023 р*

**Каргін Анатолій Олексійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [kargin@kart.edu.ua](mailto:kargin@kart.edu.ua). ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Сілін Євгеній Леонідович**, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [silin@kart.edu.ua](mailto:silin@kart.edu.ua). ORCID ID <https://orcid.org/0009-0001-2948-5537>.

**Anatolii Kargin**, Doctor of technical science, professor, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [kargin@kart.edu.ua](mailto:kargin@kart.edu.ua). ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Yevhenii Silin**, PhD student, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [silin@kart.edu.ua](mailto:silin@kart.edu.ua). ORCID ID <https://orcid.org/0009-0001-2948-5537>.

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н., доцент,  
ПРОХОРОВ В. М., к.т.н., доцент,  
КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к.т.н., доцент,  
ШАНДЕР О. Е., к.т.н., доцент  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень

*На сучасному транспортному ринку інтермодальні контейнерні перевезення відіграють важливу роль, забезпечуючи ефективне транспортування вантажів як на міжнародному, так і внутрішньому рівні. У цьому контексті використання залізничного транспорту на сухопутних ділянках перевезення набуває все більшої значущості завдяки більшій вантажопідйомності, енергоефективності та екологічності.*

*Метою цього дослідження є удосконалення моделі управління процесами формування контейнерних поїздів і забезпечення їхньої своєчасної доставки на судно-контейнеровоз. Пропонується модель, що враховує особливості взаємодії різних учасників процесу разом із портовими терміналами, залізничними станціями та судновими операторами.*

*Дослідження виявило, що ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів відіграє важливу роль у забезпеченні своєчасної доставки вантажів. Особливу увагу приділено ймовірнісним складовим моделі, пов'язаним із процесом накопичення контейнерів і їхнього просування до порту. Модель дає змогу ефективно оптимізувати моменти завершення формування поїздів з урахуванням низки обмежень.*

*Результати розрахунків і аналізу свідчать про недотримання оптимальних умов формування контейнерних поїздів, що з високою ймовірністю призведе до значних додаткових операційних витрат логістичних операторів в інтермодальних перевезеннях. Запропонована модель може слугувати основою для системи підтримки прийняття рішень (СППР) у сфері управління доставкою контейнерів до порту сухопутною частиною шляху під час використання контейнерних поїздів. Це дасть змогу підвищити надійність планування і покращити координацію процесів, забезпечуючи своєчасну доставку контейнерів на судно-контейнеровоз і підвищуючи ефективність інтермодальних перевезень.*

*Загалом використання розробленої математичної моделі сприятиме підвищенню операційної ефективності та забезпеченню високої якості послуг, що є значущим фактором для портових операторів, логістичних компаній та інших учасників логістичного ланцюга.*

**Ключові слова:** інтермодальні контейнерні перевезення, контейнерний поїзд, випадковий потік, теорія точкових процесів.

### Постановка проблеми

У сучасному світовому економічному контексті контейнерні перевезення відіграють вирішальну роль у глобальній логістиці, забезпечуючи ефективне і швидке доставлення вантажів по всьому світу. Обсяги контейнерних перевезень продовжують стрімко збільшуватися, відображуючи зростаючу потребу в

глобальній торгівлі та розширенні міжнародних торговельних зв'язків. За останніми даними, у 2020 році глобальні контейнерні перевезення склали понад 180 мільйонів TEU (Twenty-foot Equivalent Unit), що є рекордним значенням і свідчить про значущість цього сектору. У сучасному світі інтермодальні перевезення, що об'єднують різні види транспорту, стають дедалі більш затребуваними в контексті глобальної логістики.

У рамках таких перевезень особливого значення набуває ефективна взаємодія між залізничним і морським транспортом у процесі доставки контейнерів на судно-контейнеровоз. Оптимізація цієї взаємодії є необхідною умовою для забезпечення більш ефективних і надійних інтермодальних перевезень. Співпраця і координація між залізничними та морськими перевізниками, портовими операторами та логістичними компаніями стають ключовими факторами для успішної реалізації інтермодальних перевезень. Оптимізація планування і синхронізація графіків руху поїздів і суден, точне визначення часу навантаження і розвантаження контейнерів, а також ефективне використання інфраструктури портів і залізничних терміналів – усе це невід’ємна частина оптимізації процесу взаємодії між залізничним і морським транспортом.

У сучасних інтермодальних перевезеннях між континентами ефективна організація транспортування контейнерів від їхнього відправлення зі складів до фінальної доставки на судно-контейнеровоз є ключовим фактором для забезпечення своєчасного і надійного постачання вантажів. Оптимізація процесу формування контейнерних поїздів і їхнього просування в бік порту має велике значення для мінімізації часу зберігання і перебування контейнерів, а також підвищення операційної ефективності в ланцюжку поставок.

При створенні моделей управління та систем підтримки прийняття рішень для інтермодальних операторів слід звертати особливу увагу на взаємозв'язок між процесами надходження контейнерів на залізничну станцію і формування контейнерних поїздів. Раціональний підхід для створення таких моделей має базуватися на тому, що надходження контейнерів на станцію є випадковим потоком, який потребує врахування ймовірнісної природи процесу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Стаття [1] аналізує якість доступу до промислових районів за допомогою залізничного сполучення з трьома портовими кластерами (Роттердам, Дурбан і Lower Mississippi Port Cluster). Автори застосовують теоретичний фреймворк і опитувальні дані для оцінювання якості сполучення між портами та промисловими районами в глибині континентів, які вони обслуговують, виявляють суттєві відмінності між ними та обговорюють можливості поліпшення цього режиму. Незважаючи на це, стаття не уточнює конкретних параметрів якості доступу і не описує потенційні обмеження, що можуть вплинути на узагальнення результатів дослідження. У публікації [2] вирішується проблема операцій перевалки вантажів у

залізничних терміналах морських портів. Автори пропонують оптимізаційну модель та алгоритм для поліпшення ефективності перевалки контейнерів і зменшення часу зберігання. Позитивні сторони роботи – практичне застосування моделі та виявлення впливу пропускної спроможності вантажопідйомних кранів. Недоліком роботи є відсутність зазначення конкретних параметрів якості доступу та потенційних обмежень. Наступна стаття [3] досліджує проблему інтегрованого та ефективного транспорту в портовій зоні, пропонуючи оптимізаційну модель для переміщення контейнерів і транспортних засобів між терміналами. Робота визначає, що взаємопов'язаність терміналів і гнучкого графіка залізничних відправлень можуть поліпшити транспортну продуктивність. Позитивні сторони – використання реалістичного тестового випадку та практичної значущості для портових операторів. Однак недоліком роботи є відсутність конкретних результатів і врахування потенційних обмежень моделі. У наступній публікації [4] досліджується проблема оперативного планування залізничного транспорту в системі інтермодальних перевезень і пропонується використання стохастичної оптимізаційної моделі для підвищення ефективності транспортування контейнерів. Автори наголошують на важливості врахування ймовірнісної природи процесів формування та обробки контейнерних поїздів на станціях і пропонують автоматизовану технологію організації транспортування контейнерів. Недоліком роботи є обмежена інформація про застосовані методи й алгоритми та недостатній рівень розкриття механізмів, що обумовлюють імовірнісний характер процесів формування контейнерних поїздів і надходження контейнерів до порту під час здійснення інтермодальних перевезень.

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Як показав аналіз наукових публікацій останніх років, оптимізація використання залізничного транспорту при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень є актуальним завданням. Однак переважна більшість наукових досліджень, присвячених цій темі, зосереджені безпосередньо на процесі взаємодії між залізничним і морським транспортом, причому під оптимізацією взаємодії часто розуміються процеси, що відбуваються в припортових терміналах під час перевантаження контейнерів із залізничних вагонів. Дійсно, трансферні операції, тобто операції, при яких контейнеропотоки переходять від одного виду транспорту до іншого, є важливими. Їхня оптимізація є складним і важливим завданням, якісне вирішення якого дасть можливість позбутися багатьох проблем, таких як брак пропускної



спроможності терміналів, перевантаження транспортної інфраструктури припортових міст тощо. У деяких дослідженнях постає завдання узгодження режиму роботи терміналу з залізничним розкладом, і цей підхід також має раціональне зерно. Однак слід зазначити, що процес взаємодії залізничного і морського транспорту починається не в момент надходження поїзда до терміналу або його відправлення залізничною лінією в напрямку порту, а ще на стадії початку накопичення контейнерної партії для формування контейнерного поїзда. Отже, фактично від моменту надходження першого контейнера до залізничної термінальної станції до моменту відправлення з порту судна-контейнеровоза на цей процес впливає сукупність факторів, що і обумовлює його складну ймовірнісну природу.

### Формулювання цілей

Метою дослідження є удосконалення моделі управління процесами формування контейнерних поїздів і подолання залізничної ділянки шляху для забезпечення своєчасної доставки контейнерів на судно під час здійснення інтермодальних перевезень.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Інтермодальні контейнерні перевезення пов'язані з необхідністю організації процесу просування вантажопотоків, які мають високу питому вартість порівняно з вантажами, що перевозяться залізницею у внутрішньому сполученні.

Використання залізничного транспорту в інтермодальних контейнерних перевезеннях обґрунтовано його перевагами, такими як висока вантажопідйомність, здатність перевозити великі обсяги вантажів та енергоефективність, особливо на далеких відстанях, і сприяє зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Технологія накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів є важливим аспектом контейнерних перевезень. Вона передбачає координацію різних логістичних процесів, таких як завантаження, розвантаження і транспортування контейнерів, щоб забезпечити своєчасну і ефективну доставку контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Однією з ключових проблем у цьому процесі є необхідність управління великою кількістю контейнерів, зазвичай задіяних в операціях з контейнерних перевезень. Щоб вирішити цю проблему, багато судноплавних компаній використовують спеціалізовані програмні системи, які дають змогу відстежувати місцезнаходження окремих контейнерів у режимі реального часу. Ці системи

також можуть бути використані для оптимізації маршрутів і планування контейнерних перевезень, що допомагає мінімізувати час транзиту і знизити транспортні витрати.

Ще одним важливим аспектом контейнерних перевезень є використання контейнерних поїздів для транспортування контейнерів з внутрішніх районів до порту. Контейнерні поїзди, як правило, складаються з серії з'єднаних між собою вагонів, спеціально призначених для перевезення контейнерів, часто використовуються для перевезення великих обсягів контейнерів на великі відстані і можуть бути ефективним і економічно вигідним способом переміщення товарів з внутрішніх районів країни в порт.

Крім контейнерних поїздів, багато судноплавних компаній також використовують вантажівки та інші види транспорту для переміщення контейнерів з внутрішніх районів до порту. Це може включати використання спеціалізованих контейнеровозів, призначених для перевезення одного або декількох контейнерів за раз. Такі вантажівки можна використовувати для перевезення контейнерів на коротші відстані, і вони можуть бути особливо корисними для операцій з доставки «останньої милі».

Загалом технологія накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів є складною і динамічною сферою, що потребує високого ступеня координації та планування. Використовуючи передові програмні системи і спеціалізоване транспортне обладнання, судноплавні компанії можуть оптимізувати свої операції і забезпечити своєчасну і ефективну доставку контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Можливість відправлення неповних контейнерних поїздів є важливим моментом у логістиці контейнерних перевезень. Загалом судноплавні компанії прагнуть мінімізувати затримки в доставці контейнерів до порту, оскільки це може призвести до додаткових витрат і потенційних штрафів. Одним із підходів до досягнення цієї мети є відправлення неповних контейнерних поїздів, що дає змогу компанії своєчасно доставити контейнери в порт, не очікуючи, поки всі контейнери будуть зібрані.

Рішення про відправлення неповного контейнерного поїзда буде залежати від ряду факторів: об'ємів контейнерів, які необхідно перевезти, відстані до порту і наявності транспортних ресурсів. У деяких випадках може бути більш ефективним дочекатися, поки всі контейнери будуть зібрані, перш ніж відправляти поїзд, особливо якщо відстань до порту невелика, а транспортні ресурси легко доступні.

Однак у ситуаціях, коли час має вирішальне значення, а затримки можуть призвести до додаткових витрат, відправлення неповного контейнерного поїзда



може бути найбільш практичним рішенням. Такий підхід може допомогти забезпечити своєчасну доставку контейнерів у порт, навіть якщо не всі контейнери будуть зібрані на момент відправлення. У деяких випадках судноплавні компанії можуть також визначити пріоритетність певних контейнерів або вантажів, особливо чутливих до часу або цінних, щоб мінімізувати вплив затримок на свою діяльність.

Загалом доцільність відправлення неповних контейнерних поїздів буде залежати від конкретних обставин кожної транспортної операції. Хоча це може бути ефективною стратегією для мінімізації затримок і уникнення штрафів, проте не завжди найбільш практичний або ефективний підхід, особливо в ситуаціях, коли транспортні ресурси обмежені або відстань до порту значна. Зрештою, судноплавні компанії мають ретельно зважувати компроміси між витратами на затримку і транспортними витратами при прийнятті рішень про те, як збирати і транспортувати контейнерні поїзди.

Отже, основною номінальної складовою витрат у складі цільової функції є витрати, пов'язані з простоем контейнерів під накопиченням на термінальних станціях формування маршрутних контейнерних поїздів. Якщо функція залежності від часу кількості контейнерів, що надійшли на станцію, являє собою визначений інтеграл від функції інтенсивності, то функція залежності витрат контейнеродин від часу в процесі накопичення контейнерної партії може бути визначена як інтеграл від добутку функції інтенсивності та змінної часу:

$$B = \int_{\tau_0}^t \lambda^*(t) dt, \quad (1)$$

де  $\lambda^*$  – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку контейнерів, що надходять до залізничної термінальної станції;

$\tau_0$  – момент часу початку розрахункового (планового) періоду;

$t$  – час як змінна величина.

Отже, формула (1) містить інтеграл зі змінною верхньою границею.

Функція умовної інтенсивності є поняттям, застосовуваним у теорії випадкових процесів і статистиці та теорії точкових процесів. Нестационарність потоків надходження контейнерів до станції обумовлена сукупністю багатьох факторів: режимами роботи підприємств-вантажовідправників, ритмічністю роботи цих підприємств і їхніх транспортних відділів, наявністю автомобільного транспорту і водіїв для здійснення перевезення,

затворами на дорогах тощо. Під нестационарністю випадкових потоків розуміється зміна в часі їхніх характеристик, у першу чергу їхньої інтенсивності.

На відміну від звичайної функції інтенсивності, яка описує швидкість настання подій у заданій точці або інтервалі часу, функція умовної інтенсивності враховує передісторію та події, що відбуваються до заданого моменту часу. Вона визначає ймовірність настання події в зазначений момент часу або інтервал часу за умови певної передісторії та подій. Функція умовної інтенсивності надає інформацію про ймовірність настання події з урахуванням подій, що вже відбулися, і контексту, у якому вони відбуваються. Отже, у стаціонарного випадкового потоку інтенсивність є не лише бузумовною, а й взагалі сталою величиною.

Функція умовної інтенсивності в нестационарному випадковому потоці контейнерів, що надходять на термінальну залізничну станцію для формування контейнерного поїзда, являє собою міру інтенсивності надходження контейнерів у заданий момент часу або інтервал часу за умови певної передісторії та подій, що відбуваються на станції. Вона визначає ймовірність появи нового контейнера в зазначений момент часу або інтервал часу з урахуванням уже наявних контейнерів, які складають потяг, що формується, а також фактори, що впливають на процес накопичення і відправлення контейнерів. Функція умовної інтенсивності дає змогу оцінювати темпи надходження контейнерів на станцію з урахуванням динаміки формування поїзда і вплив зовнішніх факторів на цей процес.

За термінологією теорії точкових процесів (англ. theory of point processes), функція умовної інтенсивності – це функція залежності інтенсивності нестационарного випадкового процесу від часу, що враховує залежність імовірності настання наступних подій потоку від подій цього потоку в минулому, тобто ця функція безпосередньо залежить від історичних даних процесу, до того ж фактично є функцією ризику (англ. hazard function) [5]. Отже, з одного боку, часовий точковий процес (англ. temporary point process, TPP) – це розподіл імовірностей з послідовністю подій змінної довжини в безперервному часі. З іншого боку, часовий точковий процес можна розглядати як модель авторегресії. У той же час часовий точковий процес є також і лічильним процесом, тобто процесом підрахування кількості випадкових подій. Функція умовної інтенсивності дає змогу об'єднувати ці точки зору і моделювати точкові процеси, що мають різну природу та відповідну їй поведінку. Для вирішення цього завдання згідно з поставленою метою пропонується отримувати функції умовної інтенсивності шляхом генерації з використанням прогнозової моделі на основі нейронної мережі – так вона буде враховувати історичні дані.



Однак фактично функція умовної інтенсивності часового точкового процесу є тією самою функцією інтенсивності випадкового потоку, за термінологією теорії випадкових потоків, більш відомою в науковому та освітньому середовищі країн Східної Європи та СНД. Однак саме теорія точкових процесів є більш загальною і фактично єдиним стандартним і загальноприйнятним у науковому світі підходом, застосовуваним при дослідженні.

Першу складову експлуатаційних витрат можна записати як

$$C_1 = \sum_{i=1}^{N^{мер}} c_i^{к.хв} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt, \quad (2)$$

де  $N^{мер}$  – кількість термінальних станцій формування контейнерних поїздів;

$\lambda_i^*(t)$  – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку надходження контейнерів до  $i$ -ї термінальної станції;

$t_i$  – момент часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на  $i$ -й термінальній станції;  $c_i^{к.хв}$  – вартість контейнеро-хвилини простою контейнера на  $i$ -й термінальній станції, яка може включати як вартість хвилини використання контейнера, вартість перебування контейнера на контейнерному майданчику станції або платформі та його охорона тощо.

Іншою складовою цільової функції, яку необхідно врахувати, є додаткові витрати, пов'язані з неповносоставністю маршрутного поїзда. Отже, враховуючи те, що недоцільно засмічувати цільову функцію елементами, що не залежать від керуючих або звичайних змінних моделі, такі як, наприклад, витрати, пов'язані безпосередньо з просуванням контейнерних поїздів, адже вони в будь-якому випадку будуть реалізовані у разі відправлення цих поїздів. Однак слід зазначити необхідність врахування додаткових витрат у разі відправлення неповносоставних поїздів, адже в такому випадку собівартість транспортування даної партії контейнерів зростає та відповідно зростає питома собівартість транспортування контейнера для залізничної компанії. Це факт можна пояснити тим, що у разі відправлення неповносоставного контейнерного поїзда собівартість його спорядження, відправлення та просування по лінії майже не зміниться однак частина вагоно-місць або контейнеромісць у поїзді фактично не будуть оплачені клієнтами. Таким чином, додаткові витрати виникають в обсязі вартості перевезень контейнерів у кількості,

що дорівнює різниці між нормативною кількістю у складі поїзда і фактичною кількістю:

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left( \left( m_i - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left( m_i > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \frac{c_i^{кн}}{m_i} \right), \quad (3)$$

де  $m_i$  – норма кількості фітингових платформ і відповідної кількості контейнерів у перерахуванні на сорокафутові контейнери (FEU) у складі контейнерного поїзда, що формується на  $i$ -й термінальній станції;

$c_i^{кн}$  – вартість просування контейнерного поїзда, що відповідає нормативній кількості вагонів, від  $i$ -ї термінальної станції до порту.

Як було зазначено вище, контейнерні перевезення і особливо інтермодальні, у яких одночасно беруть участь декілька незалежних транспортних операторів і компаній, пов'язані з ризиком.

Також слід зазначити, що відправлення контейнерного поїзда з перевищенням норми кількості вагонів також може бути економічно виправданим, оскільки у випадку доставлення партії контейнерів у неповному обсязі може призвести до накладення штрафних санкцій. Є звісно гранична межа кількості контейнерів і відповідної кількості фітингових платформ, обумовлена максимальною умовною довжиною колій на попутних станціях, максимальною вагою поїзда, обумовленою потужністю локомотива, тощо. Отже, склад контейнерного поїзда може за чисельністю вагонів перевищувати нормативне значення, проте знаходиться у межах граничних показників. У такому разі можуть виникати додаткові витрати, пов'язані з необхідністю проведення додаткових маневрових робіт при формуванні поїзда. Однак у першу чергу проведення додаткових маневрових робіт у цьому випадку виникає в процесі розвантаження поїзда в порту, адже колії припортової станції, розраховані на довгосоставні поїзди, можуть бути зайняті іншими поїздами. До того ж колії, що знаходяться безпосередньо в порту біля причалів, взагалі не розраховані на довгосоставні поїзди, і тому доведеться здійснювати їхнє розчеплення з послідовним подаванням частин на портову колію для розвантаження. Отже, ці додаткові витрати необхідно розраховувати як

$$C_3 = c^{\partial 6} \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left( \left( \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt - m_i \right) \left( \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt > m_i \right) \right), \quad (4)$$

де  $C^{дв}$  – питомі додаткові витрати, що припадають на кожен вагон, причеплений до контейнерного поїзда поза нормою кількості вагонів.

Як було зазначено вище, якщо фактична кількість наданих контейнерів виявиться меншою, ніж кількість, заявлена оператором для завантаження на контейнеровоз, можуть бути застосовані штрафні санкції. Такі види штрафних санкцій останнім часом вводяться все більшою кількістю морських перевізників, що обумовлено їхнім небажанням втрачати прибутки та відповідним стимулюванням інтермодальних операторів до запобігання порожньому пробігу контейнеромісць, особливо на тлі кардинального підвищення тарифів на контейнерні перевезення у світі. Так, всесвітньо відомий морський перевізник – компанія MSC (Mediterranean Shipping Company) – запровадила штраф за неподання контейнера до перевезення «no show bookings surcharge», який становить 600 дол. за 1 FEU. Отже, необхідно включити до цільової функції елемент, що буде враховувати ці витрати:

$$C_4 = c^{шн} \left( n^{фр} - \sum_{i=1}^{N^{мер}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right), \quad (5)$$

де  $n^{фр}$  – кількість контейнеромісць, зафрахтованих оператором на контейнеровозі в перерахунку на FEU;

$c^{шн}$  – сума штрафу за один FEU, що не був поданий для навантаження на судно.

Поняття ризику, застосовуване в технічній, економічній і фінансовій сферах, передбачає можливість здійснення не лише якісного, але в першу чергу кількісного оцінювання ризику. Величина ризику вимірюється зазвичай у грошовому еквіваленті і може бути обчислена як добуток імовірності небажаної події та величини матеріального збитку, що виникає внаслідок настання цієї події:

$$R = Q \cdot c^{зб}, \quad (6)$$

де  $Q$  – імовірність настання небажаної події;

$c^{зб}$  – величина матеріального або фінансового збитку.

Організація формування та доставки контейнерних партій до порту не виключає можливості несвоєчасного прибуття хоча б одного з контейнерних поїздів, що у свою чергу призведе до затримки судна з вини залізничного перевізника, і накладання портом відповідних штрафних санкцій. Ця

можливість несвоєчасного прибуття поїздів до порту є наслідком впливу багатьох факторів, більшість з яких знаходиться поза межами контролю залізничного оператора, або цей контроль є лише поодиноким і не дає змогу повністю виключити можливість настання цієї небажаної події. До того ж імовірність запізнення контейнерного поїзда безпосередньо залежить від управлінських рішень, пов'язаних із процесом накопичення контейнерних партій на термінальних залізничних станціях. Час на просування поїзда від термінальної залізничної станції до порту має бути в часовому проміжку між моментом завершення накопичення контейнерної партії на термінальній станції та моментом відправлення судна, урахувавши також тривалість навантаження. Через те, що перевезення здійснюється маршрутним поїздом, то, на перший погляд, раціональним рішенням може бути приймання цього часу просування за сталу величину, що залежить від довжини маршруту, або принаймні моделювання його як випадкової величини, що має незначні коливання, з використанням нормального закону розподілу. Однак такий підхід був би можливим лише в умовах розвинених європейських країн, якщо, наприклад, контейнери перевозяться поїздом типу shuttle train, тобто залізничним контейнерним експресом, що прямує практично без зупинок і зі сталою швидкістю по спеціально виділених нитках графіка та в умовах, коли вантажний залізничний рух відокремлений від пасажирського. В умовах української залізничної системи вантажний і пасажирський рух здійснюються з використанням однієї інфраструктури, до того ж пасажирські поїзди мають вищий пріоритет. Такий суміщений рух у купі з високою вантажонапруженістю ліній призводить до швидкого зносу рейок і виходу з ладу елементів верхньої будови колії, частой необхідності виділення вікон для здійснення планових і позапланових ремонтів. Довжина ліній, на яких діють попередження про необхідність обмеження швидкості руху поїздів, пов'язані або зі станом колій, або проведенням ремонтних робіт, становить у середньому більше половини загальної протяжності ліній залізничної системи України. До того ж рух переважної більшості вантажних поїздів здійснюється не за сталим розкладом, а готовністю і диспетчерським розкладом. Однак найбільш дестабілізуючим фактором, що призводить до значних затримок при просуванні контейнерних поїздів, є припортові станції. На припортових станціях зазвичай відбувається скупчення великої кількості составів унаслідок нестачі магістральних і маневрових локомотивів, локомотивних бригад, невідповідності колійного розвитку станцій сучасним обсягам руху, сезонним перенавантаженням тощо. Це може призводити до багаточасових затримок при просуванні

контейнерного поїзда від припортової станції до порту. У декількох попередніх дослідженнях було доведено, що цей час зазвичай підпорядковується закону Ерланга. Отже, особливо враховуючи його певну універсальність, саме цей закон розподілу доцільно використовувати для моделювання тривалості просування контейнерного поїзда від термінальної залізничної станції до порту як випадкову величину безперервного типу. Запізнення поїзда відбудеться при перевищенні часу його

просування на шляху між термінальною станцією та портом часового інтервалу, між моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та гранично можливим моментом часу початку навантаження контейнерної партії на судно-контейнеровоз з урахуванням планового моменту часу його відбуття.

Отже, величина імовірності запізнення поїзда є комплементарною до величини імовірності його вчасного прибуття, яку можна розрахувати як

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda) \quad (7)$$

де  $\tau^{np}$  – тривалість просування контейнерного поїзда як випадкова величина;

$\tau^{нав}$  – тривалість навантаження контейнерів на судно-контейнеровоз, яка залежить від обсягу контейнерної партії;

$t$  – змінна, що набуває значення моменту часу завершення накопичення контейнерної партії;

$T^c$  – момент часу відбуття судна за графіком його руху;

$$P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\} \quad \text{та}$$

$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\}$  – імовірність того,

що час просування поїзда не перевищить тривалість часового вікна, обмеженого моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та моментом часу

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{\Gamma(k)} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{(k-1)!} = 1 - \left( 1 - \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda(T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!} \right) = \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda(T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!} \quad (8)$$

де  $\gamma(\dots)$  – нижня неповна гамма-функція.

Перехід від гамма-функції  $\Gamma(k)$  до факторіала  $(k-1)!$  був здійснений завдяки тому,

відправлення контейнеровоза за його розкладом з урахуванням часу на навантаження, тобто імовірність вчасного прибуття поїзда до порту та відповідно його запізнення як функція від  $t$ ;

$$F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda) \quad \text{– кумулятивна}$$

функція розподілу закону Ерланга (англ. Cumulative Distribution Function, CDF), де  $k$  та  $\lambda$  – параметри розподілу Ерланга.

Отже, імовірність затримки судна-контейнеровоза через запізнення прибуття контейнерного поїзда до порту можна розрахувати як

що  $k \in \Gamma^+$ , тобто параметр  $k$  належить до множини додатних цілих чисел.

На рис. 1 наведений механізм визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда в разі розподілу величини тривалості часу перевезення за законом Ерланга за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону.

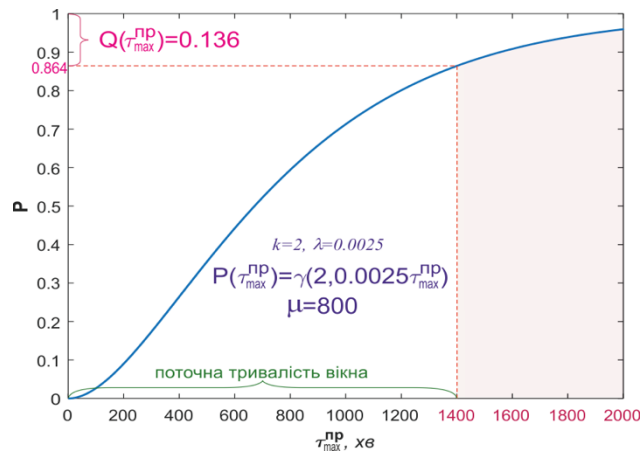


Рис. 1. Визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда в разі розподілу величини тривалості часу перевезення за законом Ерланга, за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону

На рис. 2 наведена схема визначення імовірностей затримки судна внаслідок запізньєнь контейнерних поїздів, потрібна для визначення сумарної функції ризику, адже фактично штрафна функція є дискретною, оскільки затримка, наприклад, на 15 год від наступної години все одно призводить до штрафної виплати за цілу годину.

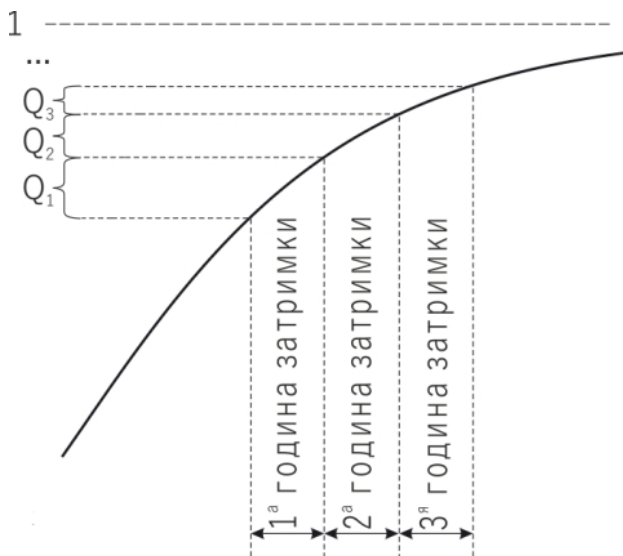


Рис. 2. Визначення погодинних імовірностей затримки судна внаслідок запізньєнь контейнерних поїздів

Однак у разі одночасного накопичення контейнерних партій на декількох термінальних станціях і відповідно відправлення з кожної цієї

станції маршрутного контейнерного поїзда в бік порту імовірність затримки судна дорівнює імовірності випадку, коли хоча б один з цих поїздів прибуде до порту з запізненням. Отже, ураховуючи те, що запізнення кожного окремого поїзда є незалежною подією, та одночасно ці події є сумісними, тобто не виключається той факт, що вони можуть відбуватися разом, імовірність випадку, що принаймні один поїзд прибуде з запізненням, за теоремою про додавання імовірностей для сумісних подій, дорівнюватиме сумі імовірностей запізньєнь кожного окремого поїзда.

Отже, імовірність затримки судна можна розрахувати як

$$Q^{зс} = \sum_{i=1}^{N^{мер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i)} \left( \lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i) \right)^j}{j!}, \quad (9)$$

де  $k_i$  та  $\lambda_i$  – відповідно параметр ступеня (або форми) і параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга, якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від  $i$ -ї термінальної станції до порту.

Тоді наступну складову цільової функції, що являє собою ризик затримки судна-контейнеровоза з провини залізничного оператора, можна записати як

$$C_5 = R = Q^{3c} c^{3c} = c^{3c} \sum_{i=1}^{N^{мер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i)} \left( \lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i) \right)^j}{j!}. \quad (10)$$

Отже, цільову функцію можна подати як

$$E\left(\{t_1, t_2 \dots t_n\}, \{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}, \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}\right) = \sum_{i=1}^5 C_i, \quad (11)$$

де  $\{t_1, t_2 \dots t_n\}$  – змінний вектор моментів завершення накопичення контейнерних поїздів;

$\{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}$  – множина функцій умовної інтенсивності, що являють собою потоки надходження контейнерів;

$\{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}$  – множина розподілів тривалостей просування контейнерних поїздів (поданих як відповідні параметри) між термінальними залізничними станціями і портом.

Також необхідно врахувати обмеження, що накладаються на керуючі змінні технологічним процесом. Так, необхідно врахувати обмеження за максимальною довжиною поїздів, що формуються, у фізичних вагонах:

$$\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \leq m_i, \quad i = 1 \dots N^{мер} \quad (12)$$

На основі сформованої моделі було розроблене програмне забезпечення та проведено моделювання. У таблиці наведені вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Прогнозна умовна інтенсивність нестационарного пуассонівського процесу надходження контейнерів (у перерахуванні на TEU) до першої термінальної станції $\lambda_1^*(t)$	$8.2019 \cdot 10^{-27}t^8 - 4.869 \cdot 10^{-24}t^7 - 4.7899 \cdot 10^{-19}t^6 + 2.519 \cdot 10^{-15}t^5 - 5.0406 \cdot 10^{-12}t^4 + 4.0412 \cdot 10^{-9}t^3 - 7.2505 \cdot 10^{-7}t^2 - 0.0001538t + 0.10832$	FEU/хв
Прогнозна умовна інтенсивність нестационарного пуассонівського процесу надходження контейнерів (у перерахуванні на TEU) до другої термінальної станції $\lambda_2^*(t)$	$5.5929 \cdot 10^{-26}t^8 - 7.8894 \cdot 10^{-22}t^7 + 4.6203 \cdot 10^{-18}t^6 - 1.441 \cdot 10^{-14}t^5 + 2.5387 \cdot 10^{-11}t^4 - 2.4372 \cdot 10^{-8}t^3 + 1.0803 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.0012039t + 0.09046$	FEU/хв
Вартість контейнеро-хвилини при перебуванні контейнерів на термінальних залізничних станціях	$c_1^{к \cdot хв} = 0,1, c_2^{к \cdot хв} = 0,2$	$\frac{\$}{FEU \cdot хв}$
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту	4000	дол.
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту	5500	дол.
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту, як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_1 = 2, \mu_1 = 400$	од., хв
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту, як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_2 = 2, \mu_2 = 500$	од., хв
Додаткові витрати при перевищенні норми кількості фітінгових платформ у складі контейнерного поїзда на одну одиницю (на обох напрямках)	200	дол.
Кількість заброньованих на судні контейнеромісць у перерахуванні на FEU	73	FEU
Момент часу закінчення навантаження судна і його відплигтя, хв, від моменту початку планового розрахункового періоду, хв	1600	хв
Тривалість навантаження одного контейнера	5	хв/FEU

Штраф за неподання до навантаження на судно 1 FEU	600	дол./FEU
Вартість години затримки судна	5000	дол./год

На рис. 3 графічно зображено функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів до термінальних станцій, наведених у таблиці.

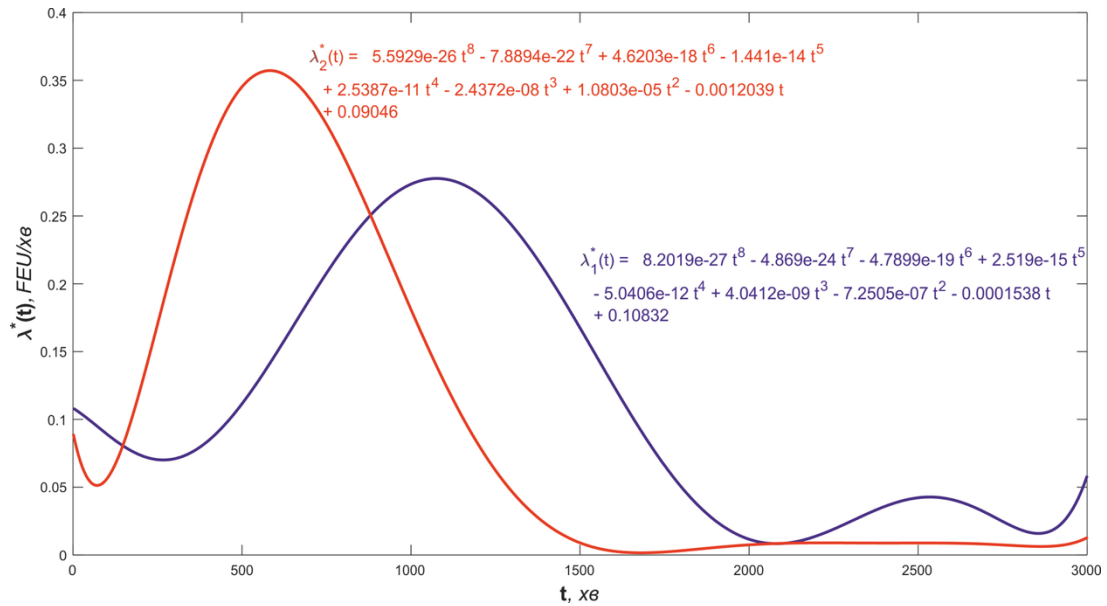


Рис. 3. Функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів

На рис. 4 графічно зображено цільову функцію моделі та результат її оптимізації. У випадку двох термінальних станцій цільова функція являє собою поверхню. Однак у випадку більшої кількості термінальних станцій і відповідно більшої кількості контейнерних поїздів цільову функцію неможливо буде подати у графічному вигляді та знайти її мінімум

методами функціонального аналізу. Отже, оптимізацію запропонованої моделі в загальному випадку можна класифікувати як задачу нелінійної оптимізації. Тому розроблена процедура оптимізації запропонованої моделі використовує сучасний математичний апарат генетичних алгоритмів.



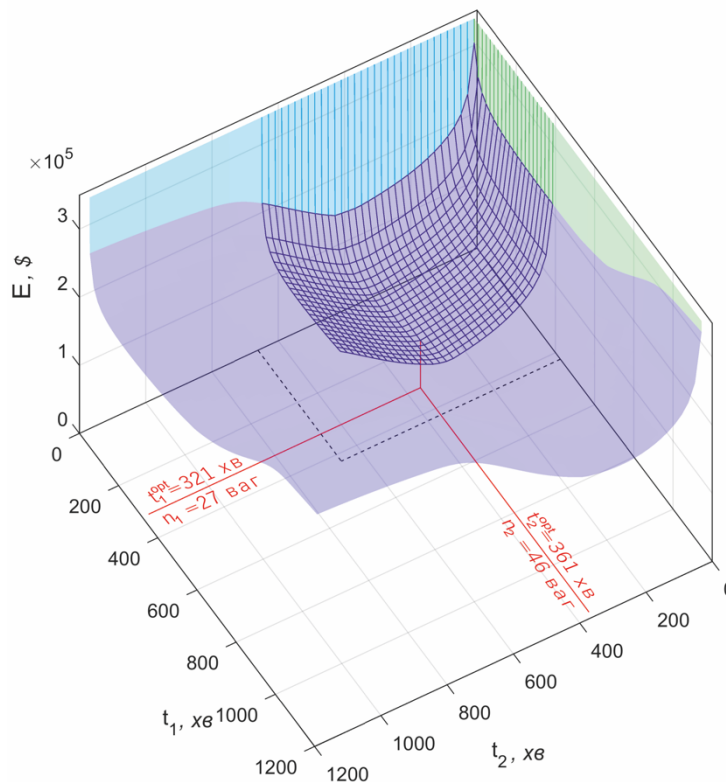


Рис. 4. Цільова функції моделі та результат її оптимізації

Як видно з рисунка, отримані оптимальні тривалості формування контейнерних поїздів становлять відповідно 321 хв для першого поїзда та 361 хв для другого поїзда, передбачається, що за ці періоди буде накопичено для першого поїзда 27 контейнерів і 46 контейнерів для другого поїзда відповідно. При цьому було досягнуто мінімального значення цільової функції, що дорівнює 69168,9.

#### Висновки

Отримані результати розрахунків і характер цільової функції свідчать про те, що недотримання оптимальних умов режимів формування контейнерних поїздів для просування контейнеропотоків до порту з великою імовірністю призведе до значних додаткових експлуатаційних витрат логістичних операторів при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень. Отже, у результаті дослідження було з'ясовано, що ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів відіграє важливу роль у забезпеченні своєчасного доставлення вантажів у міжнародному сполученні. Важливим аспектом запропонованої моделі є врахування ймовірнісних складових моделі, що належать як до процесу накопичення контейнерів, так і процесу просування контейнерних поїздів до порту. У цьому контексті планування доставки контейнерів декількома поїздами

– складне завдання, з практичної точки зору, однак запропонована модель дає змогу достатньо ефективно передбачити оптимальні моменти завершення формування поїздів завдяки приведенню всіх імовірнісних складових до єдиного імовірнісного поля. Введення до складу моделі ризикової складової забезпечує мінімізацію імовірності отримання штрафних санкцій і їхнього обсягу для залізничних або інтермодальних операторів і є одним із ключових її елементів.

Отримані результати розрахунків довели, що оптимізація процесу формування контейнерних поїздів з урахуванням зазначених вище факторів дає змогу знизити затримки, підвищити ефективність перевезень і забезпечити своєчасне доставлення вантажів на судно-контейнеровоз. Це має значне практичне значення для портових операторів, логістичних компаній та інших учасників логістичного ланцюга, які прагнуть підвищити операційну ефективність і забезпечити високу якість послуг.

Отже, сформована математична модель може бути застосована як основа для побудови СППР для інтермодальних операторів, що використовують залізничний транспорт при здійсненні міжнародних контейнерних перевезень.

#### Список використаних джерел

1. De Langen P. W., Chouly A. Hinterland access regimes in seaports. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2004. 4(4). P. 361–380.
2. Yan B., Zhu X., Lee D-H. Jin J. G., Wang L. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 141(6):106296.
3. Hu Q., Wiegmans B., Corman F., Lodewijks G. Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019. 31. P. 807–831.
4. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1(3). P. 6–12.
5. Fathi-Vajargah B., Khoshkar-Foshtomi H. Simulating of poisson point process using conditional intensity function (Hazard function). *International Journal of Advanced Statistics and Probability*. 2014. 2(1). P. 34–41.

**Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu., Shander O. E. Development of an DSS to manage the process of forming container trains within the intermodal transportation system.**

**Abstract.** In today's transportation market, intermodal container transportation plays an important role in ensuring the efficient transportation of goods both internationally and domestically. In this context, the use of rail transport on land transportation routes is becoming increasingly important due to its higher carrying capacity, energy efficiency, and environmental friendliness.

The purpose of this study is to improve the model for managing the processes of forming container trains and ensuring their timely delivery to a container ship. A model is proposed that takes into account the peculiarities of interaction between various participants in the process, including port terminals, railway stations and ship operators.

The study has shown that effective management of the container train formation process plays an important role in ensuring timely delivery of goods. Particular attention is paid to the probabilistic components of the model related to the process of accumulation of containers and their movement to the port. The model allows for efficient optimization of the moments of train formation completion, taking into account a number of constraints.

The results of calculations and analysis have shown that failure to comply with the optimal conditions for the formation of container trains is likely to lead to significant additional operating costs for logistics operators in intermodal transportation. The proposed model can serve as a basis for a decision support system (DSS) in the field of managing the delivery of containers to the port by land when using container trains. This will increase the reliability of planning and improve the coordination of processes, ensuring timely delivery of containers to the container ship and increasing the efficiency of intermodal transportation.

In general, the use of the developed mathematical model will help to improve operational efficiency and ensure high quality of services, which is a significant factor for port operators, logistics companies and other participants in the supply chain.

**Keywords:** intermodal container transportation, container train, random flow, point process theory.

Надійшла 13.07.2023 р

**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](mailto:parhomenko@kart.edu.ua).

**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](mailto:prokhorov@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\\_tv@ukr.net](mailto:bulavina_tv@ukr.net).

**Шандер Олег Едуардович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>.

E-mail: [shander@kart.edu.ua](mailto:shander@kart.edu.ua).

**Shander Oleg**, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>. E-mail: [shander@kart.edu.ua](mailto:shander@kart.edu.ua).

**Parkhomenko Larysa**, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: [parhomenko@kart.edu.ua](mailto:parhomenko@kart.edu.ua).

**Prokhorov Viktor**, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua).

**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\\_ty@ukr.net](mailto:bulavina_ty@ukr.net).

УДК 658.14:656.025.2

DOI: 10.18664/iksz.v28i3.290118

ЛОМОТЬКО Д. В., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),  
КРАСНОШТАН О. М., к.т.н., доцент (Національний транспортний університет),  
КАВА О. С., магістр, заступник Міністра фінансів України  
НОВИЦЬКИЙ Б. О., магістр, аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)  
ПИШНЯК С. П., інженер

## **Визначення оптимальних структур модернізації дизель-поїздів ДР-1А для відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці**

*У статті проаналізовано можливі варіанти здійснення модернізації парку дизель-поїздів ДР-1А, одних з основних дизель-поїздів в Україні, що забезпечують приміські перевезення пасажирів на залізницях України. Визначено основні недоліки в поточній конструкції, а також причини, згідно з якими необхідно спланувати і реалізувати програму реалізації існуючого в Україні парку дизель-поїздів ДР-1А.*

*Проведено аналіз досвіду проведення модернізації дизель-поїздів ДР-1А у країнах, де такий рухомий склад історично експлуатується. Проаналізовано досвід проведеної модернізації таких дизель-поїздів у країнах Європейського Союзу – Литві та Латвії.*

*Зроблено висновок про необхідність формування програми модернізації дизель-поїздів для підвищення ефективності їхнього використання та відновлення мережі приміського сполучення на неелектрифікованих ділянках залізниці. Виявлено межі комплексної проблеми забезпечення приміським рухомим складом для перевезень на неелектрифікованих ділянках і синтезовано комплексний підхід щодо вирішення цієї проблеми.*

**Ключові слова:** приміські пасажирські залізничні перевезення, дизель-поїзди, модернізація, ремоторизація, розвиток систем, маршрутна мережа.

### **Вступ**

Приміські перевезення відіграють важливу роль у забезпеченні мобільності населення. При цьому перевезення необхідно забезпечувати як на електрифікованих, так і неелектрифікованих ділянках залізниці. Розвиток приміських пасажирських перевезень в Україні переважно обмежений наявністю необхідної кількості рухомого складу, а також ресурсів для його придбання. Тому модернізація існуючого рухомого складу є одним із варіантів раціонального вирішення цього завдання. Зокрема цим шляхом йдуть багато країн-членів ЄС.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Ряд вчених і дослідників як у нашій державі, так і за кордоном, зробили вагомий внесок у процес вирішення проблем організації та розвитку приміських залізничних пасажирських перевезень, що є базою для функціонування системи логістики пасажирських перевезень. Питання збереження і розвитку приміських перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниць досліджено в науковій праці [1]. Там же визначено подальші кроки в напрямі розвитку таких перевезень.

У роботі [2] проведено детальне дослідження в напрямі створення наукових основ створення моторвагонного рухомого складу та контролю його технічного стану.

**Визначення мети та завдання дослідження**

Дослідження здійснювалось з метою формулювання переліку робіт із модернізації парку рухомого складу дизель-поїздів ДР-1А, присвячених відновленню парку дизель-поїздів, необхідних для забезпечення приміських пасажирських перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці, що дасть змогу подолати негативну тенденцію скорочення обсягів перевезень, більш того, стане імпульсом для подальшого соціального та економічного розвитку громад і територій.

Актуальним є вирішення таких масштабних завдань [2]:

- якісне оновлення рухомого складу залізниці для здійснення приміських перевезень, у тому числі за рахунок модернізації;

- скорочення термінів проведення прогресивної модернізації рухомого складу з застосуванням ефективних технологій для переоснащення залізничного транспорту;

- модернізація рухомого складу з метою виходу його на новий технічний рівень, зокрема обладнання перетворювачами енергії, обладнаними цифровими системами управління та діагностики, побудованими на сучасній елементній базі;

- проведення досліджень щодо розроблення та впровадження на рухомому складі нових технологій і матеріалів тощо.

Іншими словами, вирішення завдань оновлення приміського рухомого складу потребує застосування системного підходу завдяки реалізації узгоджених синхронізованих дій між науковими установами, виробниками та операторами перевезень.

Проведений аналіз моторвагонного рухомого складу [2], що виробляється компаніями Alstom,

Bombardier, Jenbacher, SLM, Siemens Mobility, CAF, FIAT Ferraviaria тощо, свідчить, що на сьогодні на європейському ринку залізничних перевезень намітилася тенденція поступової відмови від експлуатації поїздів локомотивної тяги. Для підвищення місткості составів за інших рівних умов все більшого використання знаходять двоярусні вагони (однак вони мають і недолік при використанні такої схеми в приміському русі через небажання пасажирів, що подорожують на короткі відстані, займати місця на верхньому ярусі), розміщення силових установок під вагоном тощо. Тобто спостерігається стала тенденція переходу до нових компоновальних схем. Підвищення динамічних показників і скорочення часу подорожей потребує збільшення енергозброності составів, використання більш потужних ДВЗ з розрахунку 40-50 кВт додатково на один вагон до поточно прийнятої потужності на тягу, використання допоміжних силових установок для забезпечення власних потреб. Поширеним є використання інтегрованих інтелектуалізованих діагностичних комплексів, що дають змогу виконувати його обслуговування та ремонт за станом. При цьому не відмовляються від застосування стаціонарних систем діагностики. Спостерігається тенденція переходу до побудови за модульним принципом.

У табл. 1 [2] наведено технічні характеристики рухомого складу, що виготовлявся в різні періоди промисловістю України та частково задіяний зараз у процесі перевезення пасажирів у приміському сполученні в Україні. При цьому слід урахувати, що при проведенні модернізації необхідно ставити завдання досягнення показників і параметрів, які б перевищували наявні на сьогодні.

Таблиця 1

Технічні характеристики МВРС нового покоління

Показник	ДЕЛ-1	ДТЛ-2	ЕПЛ-160	ЕПЛ-200
Склад состава, ваг	1	8	8	8
Потужність номінальна/максимальна, кВт	260/300	5000/5500	5200/5600	5600/6000
Конструкційна швидкість, км/год	100-120	160	160	200
Маса тари, т	40-45	420-460	420-440	400-440
Загальна довжина, м	25...27	200	200	220-240
Кількість пасажирських крісел, од	100-120	440-580	560-640	480-520

Енергоозброєність, кВт/т	5,7÷7,5	10,8÷13,1	11,8÷14	12,7÷15
Питома маса на пасажиромісце, т/пас	0,33-0,45	0,72-1,0	0,62-0,78	0,76-0,9

Досягнення заявленої мети потребує вирішення таких завдань:

- детальний аналіз конструкції та технологічних особливостей дизель-поїздів ДР-1А;
- аналіз наявного досвіду проведення модернізації дизель-поїздів цієї та аналогічних серій;
- визначення необхідності реалізації додаткових функцій і зміни існуючих параметрів конструкції;
- формування переліку модернізацій.

### Основна частина дослідження

Експлуатаційний парк дизель-поїздів АТ «Укрзалізниця» налічує 301 секцію [5]. В основному парк складається з дизель-поїздів ДР-1А (Латвія) і Д-1 (Угорщина).

Орієнтовний розмір парку ДР-1А становить 50 од, зосереджений на регіональних філіях «Південно-Західна залізниця», «Львівська залізниця» і «Південна залізниця». Останні надходження дизель-поїздів цієї серії до Укрзалізниці відбулись у 1996 році.

Основні поточні проблеми експлуатації дизель-поїздів ДР-1А полягають у неможливості постачання запасних частин зараз. Силова установка М756Б (виробництво ЗАТ «Завод Звезда», Санкт-Петербург, рф) і гідропередача ГДП-1000 є російського

виробництва, відповідно запасні частини теж виробництва рф. Прийняті рішення щодо заборони імпорту товарів з рф [2] роблять неможливим постачання цих запасних частин.

Запровадження імпортозаміщення ускладнено через незначні потенціальні обсяги замовлення, що робить недоцільним їхнє виробництво з урахуванням значних обсягів НДДКР і питомих витрат на одиницю прогнозованого попиту, необхідних для постановки на виробництво.

Ще однією проблемою експлуатації дизель-поїздів є їхня надмірна пасажиромісткість при шестивагонному, «заводському» комплектуванні составів. Зниження ж пасажиромісткості шляхом зменшення составності з шести до трьох вагонів призводить до різкого зростання енергоозброєності состава (з 6,1 кВт/т до 10,5 кВт/т) [1].

Проведено аналіз досвіду модернізації дизель-поїздів ДР-1А, проведеної у 2016 році для залізниці Латвії (LDZ). У цілому модернізовані дизель-поїзди (після модернізації вони отримали серію ДР-1АС (рисунок)) отримують схвальні відгуки. Водночас є декілька проблемних питань, які важливо врахувати при плануванні модернізації таких дизель-поїздів в Україні.



Рис. Модернізований дизель-поїзд ДР-1АС Латвійських залізниць

Зокрема конструктивною особливістю системи управління, пристосування для перевезення зазначених дизель-поїздів є те, що основні органи маломобільних груп пасажирів, а також інклюзивна

туалетна кімната розташовані у проміжному (другому) вагоні. Цей факт не дає змогу експлуатувати поїзд у двовагонному виконанні та значно обмежує можливість приведення пасажиромісткості состава до фактичних параметрів пасажиропотоку і позбавляє можливості заощаджувати на експлуатаційних витратах на напрямках з низьким пасажиропотоком, а також при сезонному його зниженні.

Також при модернізації дизель-поїздів ДР-1АС використано значну кількість комплектуючих, систем, вузлів та агрегатів виробництва рф. Оскільки в умовах повномасштабної збройної агресії рф проти України використання комплектуючих виробництва рф недопустимо, для модернізації в умовах України ці комплектуючі слід замінити українськими виробами або виробами країн ЄС.

В оригінальній конструкції поїздів ДР-1А є ряд систем, що показали в експлуатації себе не з кращого боку, тому при модернізації їхня конструкція (а в ряді випадків і принцип дії) мають бути змінені. До того ж ряд систем (система кондиціонування повітря, інклюзивні туалети тощо) взагалі не були передбачені. Зокрема сюди належать:

- система опалення. В оригінальній конструкції дизель-поїздів ДР-1А опалення пасажирських вагонів здійснювалось за рахунок тепла двигунів. При цьому тепле повітря через повітровід подавалось до салонів головних і причіпних вагонів. Через недосконалість конструкції та негерметичність повітряного каналу ефективність опалення була незадовільною, особливо це було відчутно в третьому та четвертому (при шестивагонній схемі) вагонах. Це потребує використання принципово нового підходу до організації опалення салонів вагонів;

- живлення допоміжних систем і виконання допоміжних функцій в оригінальній конструкції, забезпечуване від тягового двигуна, призводить до непродуктивного використання моторесурсу двигуна та надлишкових витрат. Для уникнення цього пропонується при модернізації передбачити використання допоміжної дизель-генераторної установки, яка б забезпечила функціонування систем (кондиціонування, опалення, освітлення,

електроживлення, передпускового підігрівання основного двигуна тощо);

- використання в дизель-поїздах серії ДР-1А головного компресора поршневого типу. Компресори такої конструкції мають ряд недоліків (шум, вібрація, низька надійність, трудомістке ТО і Р) порівняно з сучасними аналогами. Цей факт потребує заміни головного компресора на сучасні аналоги;

- невідповідність кабіни управління дизель-поїздів ДР-1А сучасним уявленням щодо ергономіки, зокрема застарілий пульт управління, відсутність системи кондиціонування, зручностей для забезпечення потреб локомотивної бригади під час тривалих поїздок (мікрохвильова піч, холодильник, шафа для одягу тощо). Окрім того, необхідно підвищити рівень шумо- та віброізоляції кабіни для зменшення негативного впливу шумів і вібрацій на організм локомотивної бригади;

- системи управління та безпеки дизель-поїздів ДР-1А, що на сьогодні застарілі та потребують їхньої заміни та використання при модернізації більш сучасних аналогів. Окрім того, необхідно забезпечити встановлення систем відеоспостереження для підвищення рівня безпеки руху та пасажирів під час перевезень.

Необхідно звернути увагу також на той факт, що деякі модернізації спричиняють ряд інших. Так, встановлення системи кондиціонування створює необхідність встановлення автоматичних дверей пасажирських салонів, а також притульно-зеувних дверей вагонів. Окрім того, для підвищення ефективності роботи системи кондиціонування в умовах експлуатації доцільно обладнати модернізовані поїзди системою викличного відкриття дверей. Це дасть змогу відкривати лише ті двері, через які здійснюють висадку та посадку пасажирів, а решту тримати закритими. У такий спосіб буде забезпечено менше навантаження на систему кондиціонування.

За результатами аналізу існуючої конструкції дизель-поїздів ДР-1А та досвіду їхньої модернізації в країнах Європейського Союзу (Латвія та Литва) було сформовано перелік модернізацій, які необхідно та доцільно реалізувати при модернізації дизель-поїздів (табл. 2).

Таблиця 2

Перелік модернізацій дизель-поїздів ДР-1А

Номер з/п	Система/ вузол/ агрегат	Короткий зміст модернізації	Очікувані результати

**ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

1	Компонувальна схема	<p>Передбачається компонувальна схема Мг+0..1Пп+Пг (Мг – моторний головний вагон, Пп – причіпний проміжний, Пг – причіпний (безмоторний) головний вагон з кабіною управління); місткість состава після модернізації становить 168 (2 вагони)-292 місця (3 вагони).</p> <p><b>Передбачається експлуатація складів за системою багатьох одиниць</b></p>	<p>Оптимізація пасажиромісткості рухомого складу відповідно до пасажиропотоків. Заощадження експлуатаційних витрат</p>
2	Подовження строку служби	<p>Модернізація передбачає подовження строку служби рухомого складу від 10 до 20 років залежно від стану несучих конструкцій конкретного дизель-поїзда. Посилення несучих конструкцій кузова та візків виконується за типовим проектом або індивідуальними проектними рішеннями</p>	<p>Забезпечення рухомим складом для здійснення приміських перевезень на період до придбання нового рухомого складу</p>
3	Силова установка (двигун)	<p>Для зменшення експлуатаційних витрат, підвищення надійності та екологічності пропонується заміна штатних дизельних двигунів 756 (виробництво завод «Звезда», рф) на сучасні зі збільшеним моторесурсом двигуни.</p> <p><i>Для зменшення вартості проекту як варіант можливе придбання та встановлення дизельних двигунів виробництва західних країн, які були у використанні, придбані в рамках програми trade-in і капітально відремонтовані в умовах виробника.</i></p> <p><i>Додатковий шумо- та віброзахист, а також освітлення моторного відділення</i></p>	<p>Підвищення надійності, екологічності та ремонтпридатності. Зменшення витрат на паливо, мастильні матеріали, ремонт і технічне обслуговування. Зменшення шуму та вібрацій</p>
4	Трансмісія		
4.1	Гідропередача	<p>Для підвищення надійності, забезпечення можливості ремонту та обслуговування (постачання запасних частин, матеріалів і комплектуючих) пропонується встановлення гідропередачі виробництва компанії Voith або інших західних аналогів</p>	<p>Підвищення надійності та ремонтпридатності. Забезпечення кращих показників динаміки</p>
4.2	Редуктори	<p>Аналогічна заміна редукторів. Можливі два варіанти: використання редукторів одного з західних виробників або виробництво нових редукторів в умовах вітчизняних машинобудівних підприємств</p>	<p>Підвищення надійності та показників безпеки руху за рахунок модернізації відповідального вузла</p>
4.3	Карданні вали	<p>Необхідним є використання нових редукторів одного з українських західних виробників</p>	<p>Підвищення надійності</p>

**ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

5	Головний компресор	Пропонується заміна штатного поршневого компресора походження рф на сучасну високопродуктивну модель вітчизняного або іноземного виробництва зі зміною принципу дії (гвинтовий)	Підвищення надійності. Зменшення витрат на ТО та ремонт, шуму та вібрації
6	Кабіна управління		
6.1	Кабіна управління безмоторного вагона	Виготовлення кабіни управління безмоторного вагона. Варіанти:  а) лита кабіна з полімерних матеріалів вітчизняного виробництва;  б) зварна кабіна вітчизняного або імпортного виробництва	Забезпечення курсування поїздів у дво- або тривагонному виконанні. Створення належних умов праці для локомотивної бригади
6.2	Пульт машиніста	Заміна пульта машиніста на сучасний ергономічний варіант з новітніми системами контролю та безпеки руху на цифровій основі, поліпшення умов роботи локомотивної бригади. Усі системи управління та діагностики рухомого складу в обох кабінах управління (моторний і причіпний головний вагон) мають бути ідентичними та виконувати однакові функції, а також забезпечувати можливість використання рухомого складу за системою багатьох одиниць	Забезпечення комфортних умов роботи локомотивних бригад. Підвищення рівня безпеки руху
6.3	Системи кондиціонування	Встановлення системи кондиціонування кабіни управління	Комфорт локомотивних бригад
6.4	Освітлювальні прилади	Заміна світлосигнальних приладів кабіни управління (прожектор, буферні ліхтарі, система висадки-посадки пасажирів) і внутрішнього освітлення з регулюванням яскравості	Підвищення безпеки руху, комфорту роботи локомотивних бригад. Зменшення витрат енергії на освітлення
6.5	Прийняття заходів для забезпечення комфорту локомотивних бригад	Встановлення в кабінах управління мікрохвильової печі, холодильника, шафи для одягу, шафи для інструменту та інвентарю	Підвищення комфорту роботи локомотивних бригад
6.6	Вібро- та шумоізоляція	Додатковий шумо- та віброзахист кабіни управління моторного вагона	Комфорт локомотивної бригади. Зниження негативного впливу шуму та вібрації на організм



**ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

7	<b>Системи управління і безпеки</b>	<p>Пропонується в рамках модернізації забезпечити комплектування дизель-поїздів такими системами:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• контролю та управління силовим агрегатом;</li> <li>• діагностики основних вузлів, агрегатів і систем дизель-поїзда;</li> <li>• пожежної сигналізації та автоматичного пожежогасіння;</li> <li>• відеоспостереження:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ зовні состава (система заднього виду, бокові спостереження);</li> <li>○ салони і тамбури;</li> <li>○ органи управління та машинне відділення;</li> </ul> </li> <li>• продажу проїзних документів і підрахунку пасажирів;</li> <li>• безпеки руху;</li> <li>• аудіовізуальна інформування пасажирів (у т.ч. зовнішні маршрутовказівники та внутрішні табло);</li> <li>• радіозв'язок;</li> <li>• заміна контакторів, реле, блоків, запобіжників на сучасні (переважно вітчизняного виробництва)</li> </ul>	<p>Підвищення безпеки руху, зниження витрат на експлуатацію, ТО та ремонт, підвищення рівня пожежної безпеки, безпеки пасажирів (особливо під час висадки та посадки). Забезпечення комфорту пасажирів і підвищення ефективності збору, контролю та обліку виручки</p>
---	-------------------------------------	---	--



ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

8	Салони вагонів	<p>При проведенні модернізації пропонуються такі удосконалення пасажирських вагонів:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- забезпечення всіх вимог для перевезення людей з інвалідністю всіх нозологій: інклюзивна туалетна кімната, пандус, місця для пасажирів на кріслах колісних і супроводжуючих, дублювання написів шрифтом Брайля, зовнішні гучномовці;</li> <li>- заміна утеплення на сучасні енергоефективні та негорючі матеріали, що дасть змогу поліпшити умови перебування пасажирів у холодну пору року;</li> <li>- заміна облицювання інтер'єрів вагонів на сучасні вандалостійкі та негорючі матеріали;</li> <li>- заміна віконних блоків на енергозберігаючі тришарові склопакети з тонуванням;</li> <li>- освітлення світлодіодними енергозберігаючими пристроями зі збільшеним ресурсом роботи, підсвічування зон посадки (зовні та зсередини), перехідних площадок;</li> <li>- модульна туалетна кімната з системами дозування води, мила і туалетного паперу;</li> <li>- заміна блоків сидінь на сучасні антивандальні та ергономічні;</li> <li>- проектом може бути передбачена заміна зовнішніх, внутрішньосалонних і торцевих дверей на сучасні аналоги (у т. ч. з автоматичними приводами);</li> <li>- модернізація та герметизація системи опалення та примусової вентиляції</li> </ul>	<p>Підвищення комфорту пасажирів. Виконання вимог Конвенції ООН щодо захисту прав людей з інвалідністю [4]. Зменшення витрат на підтримання температурного режиму в салонах вагонів. Підвищення рівня пожежної безпеки</p>
9	Фарбування	Зовнішнє фарбування кузовів вагонів сучасними вандалостійкими (стійкими проти графіті) фарбами	Забезпечення на-лежного зовніш-нього вигляду рухомого складу. Заощадження витрат на перефарбування на подальших етапах ЖЦ
10	Антикорозійна та шумопоглинальна обробка кузовів	Антикорозійна та шумопоглинальна обробка кузовів	Підвищення ресурсу рухомого складу
11	Гальмівна система	Заміна повітряних резервуарів і автогальмівного обладнання, що вичерпали свій строк служби	Підвищення рівня безпеки руху

12	Кабельно-провідникова продукція	Заміна 100 % кабельно-провідникової продукції	Підвищення надійності та пожежної безпеки
13	Гасники коливачів	Заміна гасників коливачів	Підвищення плавності ходу та рівня безпеки руху

### Висновки

Результати аналізу існуючої конструкції та досвіду модернізації дизель-поїздів ДР-1А в країнах Європейського Союзу дали можливість синтезувати вичерпний перелік модернізацій, необхідних в умовах організації приміських перевезень в Україні.

Після виконання зазначених модернізацій зазначені дизель-поїзди отримують ряд функцій і параметрів, що зроблять їхню експлуатацію більш економічною, екологічною, безпечною, а перевезення пасажирів – більш комфортним та ефективним.

### Список використаних джерел

1. Ломотко Д. В., Красноштан О. М., Кава О. С. Шляхи відновлення логістики приміських пасажирських залізничних перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УДУЗТ, 2022. № 4. С. 41-47.
2. Басов Г. Г. Розвиток наукових основ створення та контролю технічного стану нового моторвагонного рухомого складу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Укр. держ. акад. залізничного транспорту. Харків, 2008. 42 с.
3. Про застосування заборони ввезення товарів з Російської Федерації: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.04.2022 р. № 426. *Офіційний вісник України*. 2022. № 1. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zastosuvannya-zaboroni-vvezennya-tovarov-z-rosijskoyi-federaciyi-426>.
4. Про ратифікацію Конвенції про права осіб з інвалідністю і Факультативного протоколу до неї: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2010. № 9. Ст. 77. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1767-17#Text>.
5. Статистичні дані про Українські залізниці. *Офіційний портал Міністерства інфраструктури України*. URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zalznici.html>. Назва з екрана.

Lomotko D., Krasnoshtan O., Kava O., Novitskiy B., Pyshnyak S.

### Defining of optimal modernization structure of DR-1A diesel motor units for suburban passenger rail logistics development on non-electrified railway lines

**Abstract.** The article analyzes possible options for the modernization of the fleet of DR-1A diesel trains, which is one of the main diesel trains in Ukraine, providing suburban transportation of passengers on the railways of Ukraine. The main shortcomings in the current design are identified, as well as the reasons, according to which it is necessary to plan and implement the implementation program of the existing fleet of DR-1A diesel trains in Ukraine.

An analysis of the experience of modernization of DR-1A diesel trains in countries where such rolling stock has been historically operated has been carried out. Thus, the experience of modernization of such diesel trains in the countries of the European Union - Lithuania and Latvia - was analyzed.

It was concluded that it is necessary to form a program for the modernization of diesel trains to increase the efficiency of their use and restore the network of suburban communication on non-electrified sections of the railway. The complex problem of providing rolling stock for suburban transportation in non-electrified areas is defined and a complex approach to solving problematic issues with its provision is proposed.

**Keywords:** suburban passenger rail transportation, diesel trains, modernization, remotorization, system development, route network.

Надійшла 18.07.2023 р

*Ломотко Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна, [orcid.org/0000-0002-7624-2925](https://orcid.org/0000-0002-7624-2925), [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua).*

*Красноштан Олександр Михайлович, кандидат*

технічних наук, доцент кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, [olexander.krasnoshtan@gmail.com](mailto:olexander.krasnoshtan@gmail.com), [orcid.org/0000-0001-9866-9930](https://orcid.org/0000-0001-9866-9930).

**Кава Олександр Степанович**, магістр, заступник Міністра фінансів України, [kavaua@gmail.com](mailto:kavaua@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-6981-7735](https://orcid.org/0000-0002-6981-7735).

**Новицький Борис Олександрович**, магістр, аспірант, [Highlinewot@gmail.com](mailto:Highlinewot@gmail.com), [orcid.org/0009-0008-1897-2736](https://orcid.org/0009-0008-1897-2736)

**Пишняк Сергій Петрович**, інженер, Фастів, Україна, [psp-2017@outlook.com](mailto:psp-2017@outlook.com), [orcid.org/0000-0003-3167-4422](https://orcid.org/0000-0003-3167-4422).

**Denis Lomotko**, Doctor of engineering, professor department of Transport system and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua) ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925> Scopus ID 57190438925.

**Olexander Krasnoshtan**, PhD (Engineering), associated professor, Department for Management, National transport univecrity, Kyiv, Ukraine. E-mail: [olexander.krasnoshtan@gmail.com](mailto:olexander.krasnoshtan@gmail.com), [orcid.org/0000-0001-9866-9930](https://orcid.org/0000-0001-9866-9930).

**Olexander Kava**, Master, Depputy Minister of finance of Ukraine, Kyiv, Ukraine. E-mail: [kavaua@gmail.com](mailto:kavaua@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-6981-7735](https://orcid.org/0000-0002-6981-7735).

**Borys Novytskyi**, PhD student, [Highlinewot@gmail.com](mailto:Highlinewot@gmail.com), [orcid.org/0009-0008-1897-2736](https://orcid.org/0009-0008-1897-2736)

**Serhii Pyshnyak**, engeneer, Fastiv, Ukraine. E-mail: [psp-2017@outlook.com](mailto:psp-2017@outlook.com), [orcid.org/0000-0003-3167-4422](https://orcid.org/0000-0003-3167-4422).

НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., к.т.н., доцент,

ГОРДІЄНКО Д. А., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

## Регулятор вихідної напруги активного випрямляча на основі ковзного режиму

У статті наведено дослідження методів керування трифазних випрямлячів з широтно-імпульсною модуляцією, що дають змогу покращити якість електричної енергії. Розглянуто схему активного випрямляча напруги з описом електромагнітних процесів у вхідній електричній мережі. Подано систему прямого керування потужністю активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги. Визначено параметри ковзного регулятора, що виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної потужності, що споживається з електричної мережі. Визначено параметри спостерігача напруги мережі з алгоритмом компенсації, що забезпечує точні результати з мінімальним коливанням. Проведено імітаційне моделювання системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму при зміні опору навантаження та зі спостерігачем навантаження за допомогою програмного середовища Matlab / Simulink. Відповідно до отриманих характеристик активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії з малим значенням коефіцієнта гармонічних спотворень і коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці.

**Ключові слова:** активний випрямляч напруги, ковзний режим, спостерігач напруги, система керування, коефіцієнт потужності, широтно-імпульсна модуляція.

### Вступ

У системах силової електроніки, що виконують перетворення напруги зі змінної в постійну, найчастіше використовуються діодні та тиристорні перетворювачі, що мають досить погані енергетичні показники, такі як емісія реактивної потужності та вищих гармонік у мережу живлення, додаткові втрати в електричних мережах, прискорене старіння ізоляції, а також негативні впливи електромагнітних полів від ліній електропередач, викликані вищими гармоніками [1, 2].

Гармонічне забруднення являє собою явище, що веде до погіршення якості електроенергії, особливо спотворення хвилі напруги, що збільшує коефіцієнт гармонічних спотворень струму, що може перевищувати величину 30 % [3, 4]. На жаль, це значення не відповідає встановленим спеціалізованими організаціями міжнародним стандартам: IEC 61000, EN 50160 і стандарту IEEE 519, які встановлюють межі THD – 3 % для напруги та 5 % для струмів [5, 6].

Завдяки більш високим характеристикам порівняно з традиційними тиристорним або діодним випрямними мостами більшого поширення набули активні випрямлячі напруги, що дають змогу за рахунок керування широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) і наявності зворотних зв'язків вхідної напруги, вхідного струму та вихідної напруги забезпечити [7, 8]:

- формування коефіцієнта потужності, близького до одиниці;
- здатність формування синусоїдальної форми струму, що споживається з електричної мережі;
- додаткові можливості компенсації вищих гармонік і реактивної складової потужності в електричній мережі, викликані іншими нелінійними та імпульсними навантаженнями.

Активні випрямлячі напруги використовуються в таких сферах промисловості, як перетворювачі зарядних станцій електромобілів, перетворювачі тягових підстанцій залізниць і метрополітенів, перетворювачі частоти, джерела живлення для мікроелектроніки, вітроенергетики, телекомунікаційного обладнання і т. п. [9, 10].

**Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій**

Для покращення якості електричної енергії до трифазних випрямлячів з широтно-імпульсною модуляцією застосовано багато методів керування. У публікаціях [11, 12] наведено схеми активних випрямлячів з послідовним з'єднанням двох мостів, що працюють на одне навантаження. Перевагами цих методів керування є менші значення напруги, прикладеної до ключів, що дає змогу реалізувати перетворювач більшої потужності. Недоліками цих рішень є необхідність використання гальванічно розв'язувальних трансформаторів, що здорожчує систему і знижує загальний ККД.

У публікаціях [13, 14] наведено методи керування, орієнтовані на контроль напруги в рухомому приводі змінного струму. Методи полягають в усуненні квадратичної складової напруги, щоб забезпечити непряме та розв'язане керування потужністю. Задавання напруги для прямої і квадратичної складових генеруються регуляторами струму. Оскільки дані про положення необхідні для всіх  $dq$ -перетворень у керуванні, орієнтованому на напругу, інформація може бути отримана за рахунок вимірювання або спостереження за напругою мережі. Проте в цих методах необхідно визначати еталон складової постійного струму, тоді як еталон квадратичної складової встановлюється на нуль, щоб мати одиничний коефіцієнт потужності.

Разом із прямим керуванням обертальним моментом приводів змінного струму відомі інші методи керування випрямлячами, орієнтовані на пряме керування потужністю [15, 16]. У такому випадку можна безпосередньо керувати активною та реактивною потужністю, вибираючи відповідний стан інвертора з визначеної таблиці перемикавання. Для кожного часу вибірки відповідні вектори напруги інвертора вибираються відповідно до різниці між активною та реактивною потужністю і їхніми опорними значеннями, а також положенням вектора напруги. Задавання активної потужності забезпечується пропорційно-інтегральним регулятором для напруги в колі постійного струму, тоді як задавання реактивної потужності підтримується на нулі для забезпечення одиничного коефіцієнта потужності.

У публікаціях [17, 18] наведено методи керування на основі вимірних або розрахункових векторів напруги, при яких положення визначається за векторами напруги, а миттєві потужності розраховуються за векторами напруги і струму.

У публікаціях [19, 20] наведено методи керування на основі віртуального потоку, де

контролюючи потоки визначають положення, а миттєві потужності розраховуються з векторів струму та потоків.

Однак такі класичні прямі керування потужністю мають значні недоліки: змінна частота комутації через гістерезисні компаратори, високе значення індуктивності фільтра для отримання плавного струму, для точної оцінки потужності потрібен малий період вибірки, а його реалізація потребує наявності швидкого мікропроцесора і аналого-цифрового перетворювача через вимоги до високої частоти дискретизації [21, 22].

Для покращення класичних методів керування активних випрямлячів напруги можна використати підхід ковзного режиму, що відрізняється стійкістю до параметричних варіацій і зовнішніх збурень [23, 24]. Крім того, такий метод використовується для розроблення простих, ефективних і економічніших спостерігачів, що усуває необхідність у фізичних датчиках і знижує вартість.

**Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є покращення динамічних характеристик регулятора вихідної напруги активного випрямляча за рахунок реалізації ковзного режиму та використання спостерігача навантаження, що дасть змогу більш точного регулювання напруги в колі постійного струму. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- огляд класичної схеми активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією;
- визначення параметрів системи прямого керування потужністю активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги;
- дослідження роботи системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму.

**Викладення основного матеріалу**

*Схема активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією.* Перевагою системи керування активного випрямляча напруги, заснованої на широтно-імпульсній модуляції, є реалізація значно менших частот комутацій [25, 26]. Активний випрямляч підвищує напругу, тим самим дає змогу реалізувати двонаправлену передачу потужності без зміни полярності вихідної напруги, що є суттєвою перевагою для перетворювача [27, 28]. Схему трифазного активного випрямляча напруги із ШІМ наведено на рис. 1 [29].



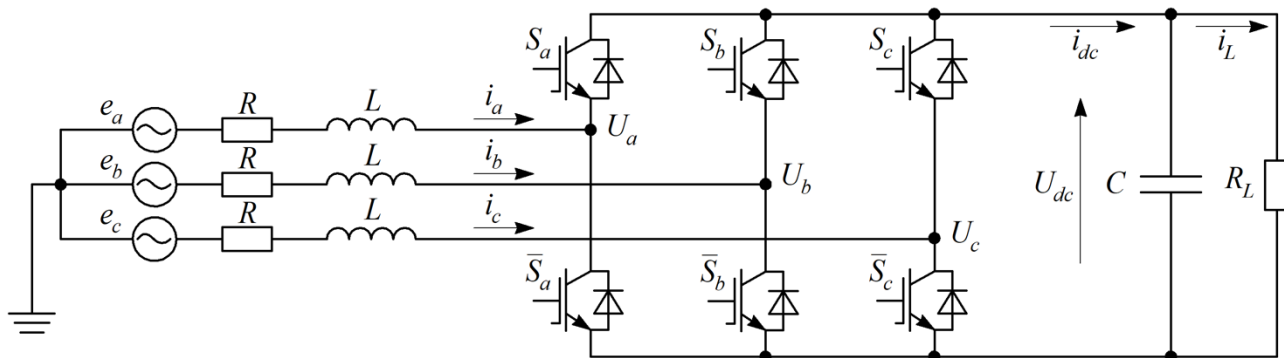


Рис. 1. Електрична схема трифазного активного випрямляча з ШІМ

На рис. 1 наведено такі позначення:  $e_a, e_b, e_c$  – електрорушійні сили у трьох фазах мережі;  $i_a, i_b, i_c$  – струми, що споживаються від трифазної мережі активним випрямлячем напруги;  $L$  – індуктивності вхідних дроселів;  $R$  – опір вхідних дроселів;  $U_a, U_b, U_c$  – потенціали, що додаються до вхідного дроселя активного випрямляча з боку транзисторного мосту;  $R_L$  – опір навантаження активного випрямляча напруги на боці постійного струму;  $C$  – ємність вихідного фільтра активного випрямляча.

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - R \cdot i_a - U_a; \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - R \cdot i_b - U_b; \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - R \cdot i_c - U_c, \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 2 наведено схему заміщення фази активного випрямляча, що формує синусоїдальну форму струму, спожитого з електричної мережі.

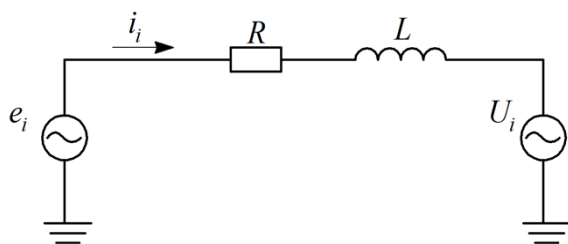


Рис. 2. Схема заміщення фази активного випрямляча

Відповідно до схеми заміщення, наведеної на рис. 2, можна розробити систему диференціальних рівнянь, що описує електромагнітні процеси у вхідній електричній мережі:

де  $i_i$  – миттєве значення струмів, що споживаються від електричної мережі;

$e_i$  – миттєве значення напруги фаз електричної мережі;

$U_i$  – миттєве значення потенціалу, прикладеного до вхідної індуктивності з боку силових ключів.

Диференціальне рівняння, що описує заряд вихідного конденсатора та залежність величини вихідної напруги від комутаційних станів силових ключів перетворювача, має вигляд [30]

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = (S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c) - \frac{U_{dc}}{R_L}, \quad (2)$$

де  $S_a$  – сигнал керування ключами активного випрямляча  $VT1$  і  $VT2$ ;

$S_b$  – сигнал керування ключами активного випрямляча  $VT3$  і  $VT4$ ;

$S_c$  – сигнал керування ключами активного випрямляча  $VT5$  і  $VT6$ .

**Система прямого керування потужністю активного випрямляча напруги на основі ковзного режиму.** Структурну схему трифазного активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги наведено на рис. 3.



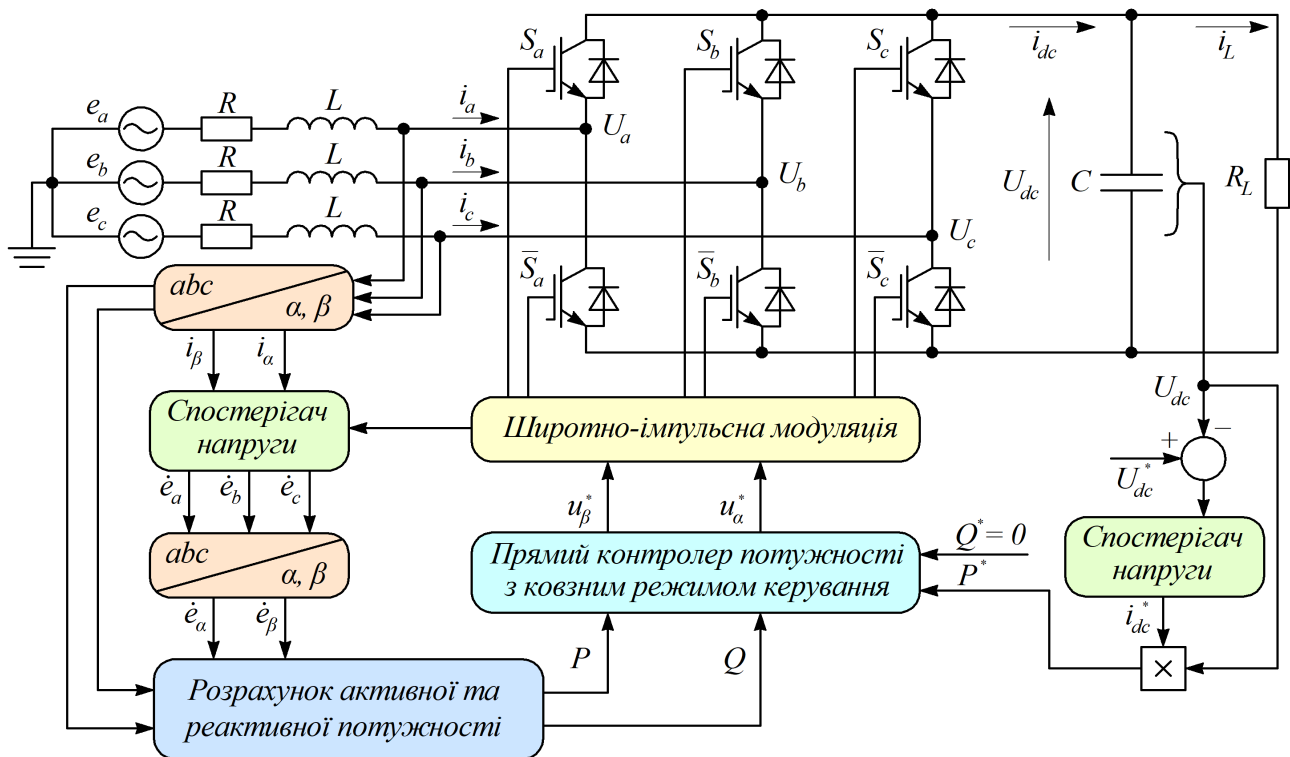


Рис. 3. Трифазний активний випрямляч напруги з системою керування, заснованою на прямому керуванні потужністю

Ковзний регулятор у наведеній структурі виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної потужності, що споживається з електричної мережі.

Диференціальне рівняння, що визначає ковзне регулювання, має вигляд [31]

$$S(t) = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} \cdot e(t) + K \cdot \int_0^t e(t) dt, \quad (3)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення системи;

$e_{dc}$  – величина сигналу похибки регулювання вихідної напруги.

В усталеному режимі при  $S_{dc} = 0$

де  $e(t)$  – величина похибки між опорною величиною (сигналом завдання) і вимірним контрольованим значенням;

$\lambda, K$  – константи системи, що мають бути більше одиниці;

$n$  – відносне значення ступеня системи, що корелюється з кількістю диференціювань.

При  $n = 1$  ковзне регулювання вихідної напруги активного випрямляча буде виражено через рівняння

$$\dot{S}_{dc} = \dot{e}_{dc} + K_1 \cdot e_{dc} = \dot{U}_{dc}^* + \frac{U_{dc}}{R_L \cdot C} + K_1 \cdot (U_{dc}^* - U_{dc}) - \frac{1}{C} \cdot i_{dc}, \quad (4)$$

$$i_{dc}^* = C \cdot \dot{U}_{dc}^* + \frac{U_{dc}}{R_L} + K_1 \cdot C (U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{dc} \cdot \text{sign}(S_{dc}). \quad (5)$$

Функція  $\text{sign}(S_{dc})$  замінюється функцією з насиченням, щоб мінімізувати ефект вібрації:

$$\text{sat}(S_{dc}) = \begin{cases} +1 & \text{якщо } S_{dc} > \gamma; \\ -1 & \text{якщо } S_{dc} < -\gamma; \\ \frac{S_{dc}}{\gamma} & \text{якщо } |S_{dc}| \leq \gamma, \end{cases} \quad (6)$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{e_\alpha}{L} & -\frac{e_\beta}{L} \\ -\frac{e_\alpha}{L} & \frac{e_\beta}{L} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт згладжування системи.

Сигнали завдання активної та реактивної потужності для запропонованої системи визначаються як:

$$\begin{cases} P^* = U_{dc} \cdot i_{dc}; \\ Q^* = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $i_{dc}$  – струм у колі постійного струму.

При керуванні активною та реактивною потужністю, що споживається з електричної мережі, вводяться контролери режиму ковзання, щоб гарантувати, що потужності відстежують задані бажані значення. Ковзне регулювання активної та реактивної потужностей описується як:

$$\begin{cases} \dot{S}_P = e_P + K_2 \cdot \int e_P dt; \\ \dot{S}_Q = e_Q + K_3 \cdot \int e_Q dt; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} e_P = P - P^*; \\ e_Q = Q - Q^*, \end{cases} \quad (9)$$

де  $K_2$  та  $K_3$  – позитивні сталі.

Підстановка активної та реактивної складових потужності у матричну форму має вигляд [32]:

$$\dot{S}_{PQ} = F + D \cdot U; \quad (10)$$

$$F = \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \cdot i_\alpha + \dot{U}_\beta \cdot i_\beta + \left(K_2 - \frac{R}{L}\right) \cdot P + \frac{1}{L} \cdot (U_\alpha^2 + U_\beta^2) - \dot{P}^* - K_2 \cdot P^* \\ \dot{U}_\beta \cdot i_\alpha - \dot{U}_\alpha \cdot i_\beta + \left(K_3 - \frac{R}{L}\right) \cdot Q - \dot{Q}^* - K_3 \cdot Q^* \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де  $U$  – узагальнений вектор напруги мережі;  $F$  – незалежний показник.

Розрахуємо спостерігач напруги вхідної мережі активного випрямляча. Рівняння динамічної моделі трифазного активного випрямляча напруги в  $\alpha\beta$ -системі координат може бути виражено як:

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (e_g - R \cdot i_g - U_g). \quad (14)$$

Узагальнений вектор струму:

$$i_g = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (15)$$

Узагальнений вектор напруги мережі:

$$e_g = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (16)$$

Узагальнений вектор напруги перетворювача:

$$U_g = \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (17)$$

Спостерігач ковзного режиму моделі можна виразити через рівняння:

$$\frac{d\hat{i}_g}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (G \cdot \text{sign}(S_g) - R \cdot \hat{i}_g - U_g), \quad (18)$$

де  $S_g$  – ковзний регулятор спостерігача струму:

$$S_g = i_g - \hat{i}_g. \quad (19)$$

Розрахунковий поточний вектор струму

$$\hat{i}_g = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha & \hat{i}_\beta \end{bmatrix}^T; \quad (20)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \end{bmatrix}^T, \quad (21)$$

де  $G_1, G_2$  – константи, більші нуля.

Коли ковзний режим досягне режиму  $\dot{S}_g = 0$ , визначене (розраховане спостерігачем) значення напруги мережі може бути обчислене як

$$e_g = G \cdot \text{sign}(S_g). \quad (22)$$

Фільтр нижчих частот (ФНЧ), що також зменшує вплив явища вібрації, може використовуватися для напруги мережі

$$e_{gf} = \text{ФНЧ} \cdot (G \cdot \text{sign}(S_g)). \quad (23)$$

Відфільтроване виведення спостерігача у  $\alpha\beta$  системі координат має вигляд

$$e_{gf} = \begin{bmatrix} e_{\alpha f} & e_{\beta f} \end{bmatrix}^T. \quad (24)$$

Використання фільтра нижчих частот для мінімізації вібрації спостерігача в ковзному режимі має недолік – ослаблення амплітуди сигналу, що спостерігається, і створення фазової затримки між оцінюваними сигналами [33, 34]. Щоб вирішити цю проблему, запропоновано адаптивний алгоритм для компенсації загасання, викликаного амплітудною та фазовою затримкою (рис. 4). Оскільки алгоритм нечутливий до зміни частоти напруги мережі, це підвищує точність спостереження.

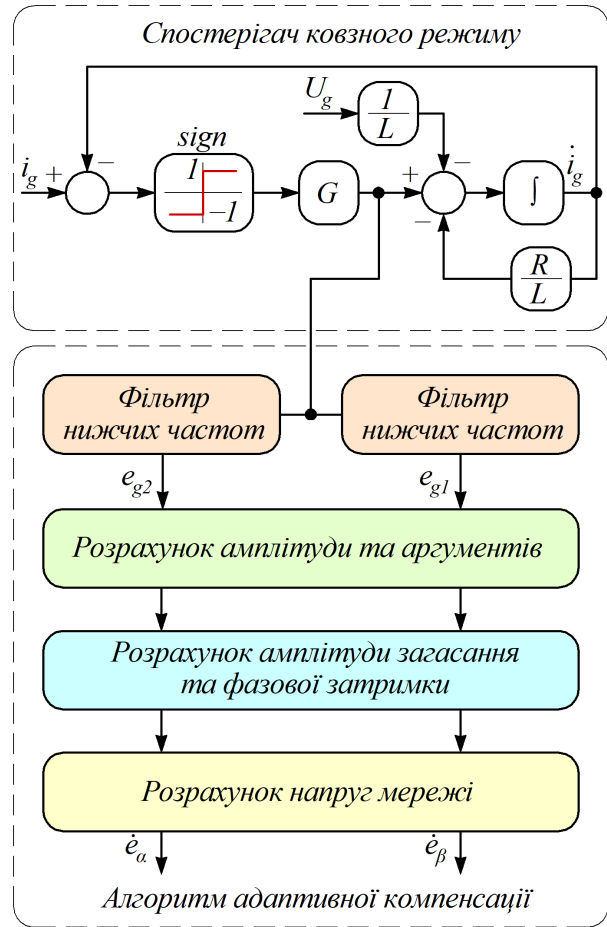


Рис. 4. Структура спостерігача напруги мережі на основі ковзного режиму

Стратегія такого алгоритму полягає у використанні в каскаді двох однакових фільтрів нижчих частот (з однаковою частотою зрізу  $\omega_3$ ).

$$\begin{cases} e_{g1} = \frac{\omega_3}{s + \omega_3} \cdot e_{gf}; \\ e_{g2} = \frac{\omega_3}{s + \omega_3} \cdot e_{g1}. \end{cases} \quad (25)$$

Амплітуди та аргументи виходів попередніх фільтрів можна розрахувати як

$$\begin{cases} E_1 = \|e_{g1}\|, & \theta_1 = \text{Arg}(e_{g1}); \\ E_2 = \|e_{g2}\|, & \theta_2 = \text{Arg}(e_{g2}). \end{cases} \quad (26)$$

Розрахунок амплітуди загасання та фазової затримки можна вивести як

$$\begin{cases} \Delta E = \frac{E_1}{E_2}; \\ \Delta \theta = \theta_1 - \theta_2. \end{cases} \quad (27)$$

Вирази для розрахункових напруг мережі з урахуванням компенсації амплітудного загасання та відхилення фази матимуть вигляд

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = E_2 \cdot \Delta E^2 \cdot \cos(\theta_2 + 2 \cdot \Delta \theta); \\ \hat{e}_\beta = E_2 \cdot \Delta E^2 \cdot \sin(\theta_2 + 2 \cdot \Delta \theta). \end{cases} \quad (28)$$

Диференціальні рівняння, що описують електричні процеси в колі постійного струму перетворювача, описуються як

$$\begin{cases} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta) - \frac{U_{dc}}{C \cdot R_L}; \\ \frac{d\hat{U}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta) - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} + \lambda \cdot \text{sign}(e_U), \end{cases} \quad (29)$$

де  $\hat{U}_{dc}$  – напруга в колі постійного струму;

$R_{L0}$  – номінальне значення опору навантаження.

Похибка спостерігача напруги визначається як

$$e_U = U_{dc} - \hat{U}_{dc}. \quad (30)$$

Динамічне рівняння помилки спостерігача має вигляд

$$\frac{de_U}{dt} = \frac{dU_{dc}}{dt} - \frac{d\hat{U}_{dc}}{dt} = - \left( \frac{U_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) - \lambda \cdot \text{sign}(e_U), \quad (31)$$

де  $\lambda$  – позитивна константа, що задовольняє вимоги,

$$\lambda > \left| - \left( \frac{U_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) \right|, \quad (32)$$

Коли ковзний режим досягне сталої часу, еквівалентне керування буде задовольняти рівняння

$$U_{dc} = \hat{U}_{dc} \Rightarrow \left( \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{U_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) = U_{R,eq}, \quad (33)$$

де  $U_{R,eq}$  – величина еквівалентного спостерігача. Його оцінка може бути згенерована фільтрацією нижчих частот,

$$\hat{U}_{R,eq} = \Phi_{НЧ} \cdot (\lambda \cdot \text{sign}(e_U)). \quad (34)$$

Отже, значення опору навантаження може бути визначене як

$$\hat{R}_L = - \frac{C \cdot \hat{U}_{R,eq}}{\hat{U}_{dc}} + R_{L0}. \quad (35)$$

Отримане значення  $i$  є вихідним сигналом спостерігача опору навантаження активного випрямляча.

**Імітаційне моделювання трифазного активного випрямляча з системою автоматичного керування на базі ковзного режиму.** Для оцінювання ефективності запропонованого алгоритму прямого керування потужності, заснованого на підході ковзного режиму, було проведено імітаційне моделювання за допомогою програмного середовища Matlab / Simulink.

Параметри трифазного випрямляча з ШІМ наведено в таблиці.

Параметри трифазного активного випрямляча

Параметр	Значення
Частота мережі $f$ , Гц	50
Напруга мережі $U$ , В	220
Сигнал задавання вихідної напруги $U_{dc}^*$ , В	600
Вхідна індуктивність $L$ , Гн	$16 \cdot 10^{-3}$
Активний опір електричної мережі $R$ , Ом	0,1
Ємність вихідного конденсатора $C$ , мкФ	1100
Опір навантаження $R_L$ , Ом	40...80
Частота ШІМ $f_p$ , кГц	15

Моделювання здійснювалося за таких умов: з вимірюванням напруги мережі за допомогою датчика напруги на інтервалі 0...1,5 с, а потім з використанням спостерігача ковзного режиму на інтервалі 1,5...3 с. Профіль змінного навантаження активного випрямляча наведено на рис. 5.

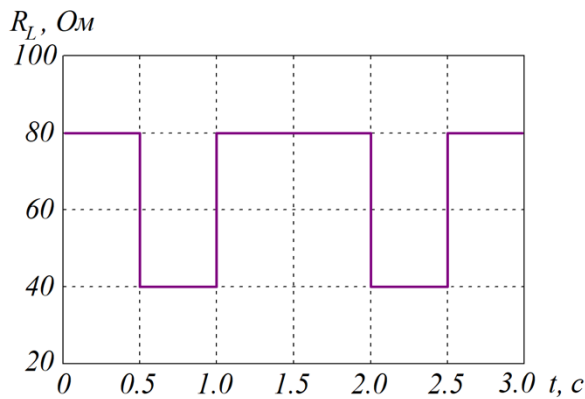


Рис. 5. Зміна опору навантаження

Відхилення вихідної напруги активного випрямляча при зміні величини опору навантаження наведено на рис. 6.

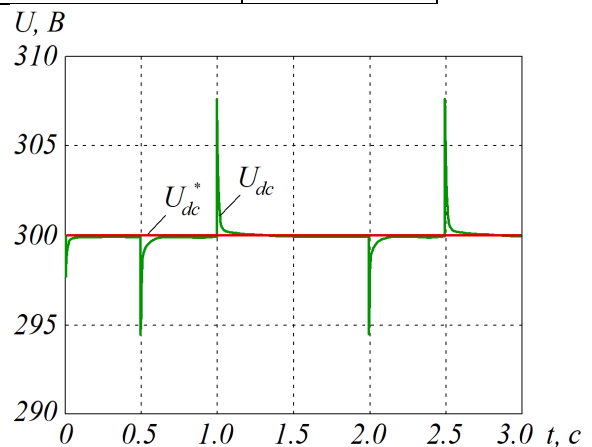


Рис. 6. Відхилення вихідної напруги

За наявності завад напруга в колі постійного струму відповідає заданому еталонному значенню 300 В, що вважається задовільним у моменти зміни навантаження.

На рис. 7 наведено зміну активної та реактивної складових потужності, що споживаються з електричної мережі, при зміні опору навантаження активного випрямляча.



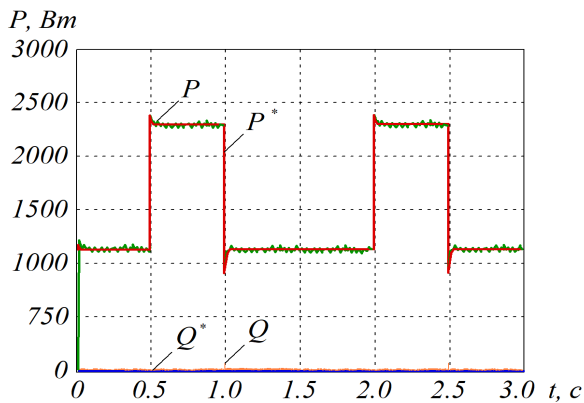


Рис. 7. Відхилення активної та реактивної потужності

З рис. 7 видно, що реактивна потужність має нульове значення, що гарантує коефіцієнт потужності,

близький до одиниці, тому струм і напруга завжди знаходяться у фазі.

Незалежно від робочих умов введення спостерігача напруги в момент часу 1,5 с дає хороші результати, а розрахункова напруга мережі не показує загасання амплітуди або фазової затримки порівняно з фактичним сигналом.

Моделювання також проводилося в розімкненому контурі, щоб продемонструвати переваги спостерігача, пов'язаного з подвійними фільтрами нижчих частот і алгоритмом компенсації. Як видно з рис. 8, 9, похибки в амплітуді та фазі дуже помітні, коли спостерігач використовує один фільтр нижчих частот на інтервалі 0...0,5 с. На інтервалі 0,5...1 с вводиться система з урахуванням подвійних фільтрів нижчих частот і алгоритму компенсації. Можна помітити, що амплітудне загасання та фазова затримка можуть бути скомпенсовані.

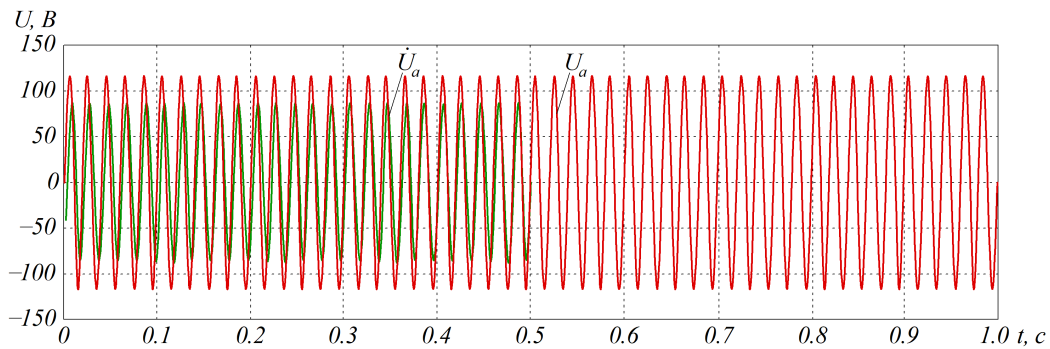


Рис. 8. Робота спостерігача вхідної напруги

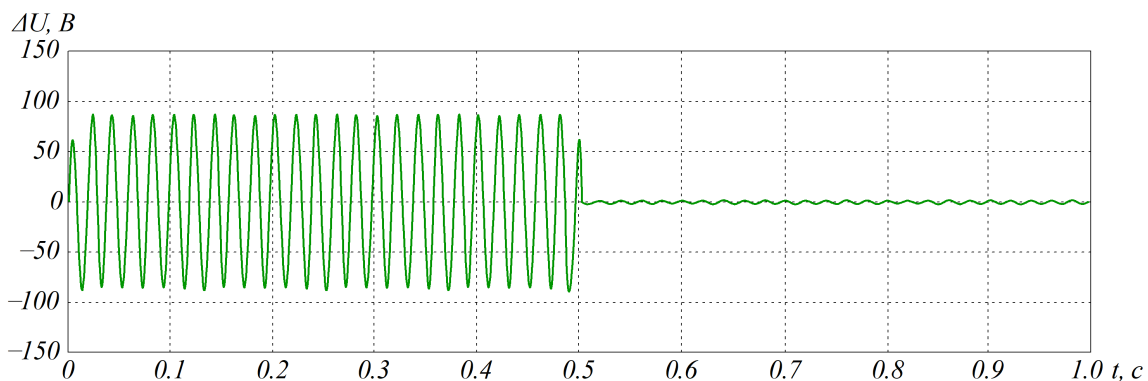


Рис. 9. Похибка спостерігача вхідної напруги

На рис. 10 показано, що спостерігач точно оцінює зміну навантаження. При цьому значення похибки є досить малим, що показано на рис. 11.

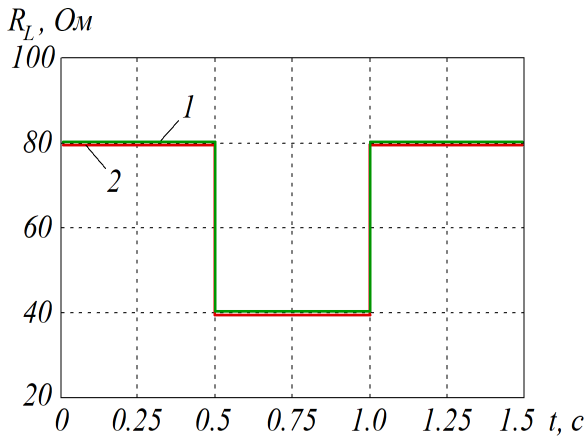


Рис. 10. Спостерігач опору навантаження:

1 – реальне значення; 2 – розраховане значення

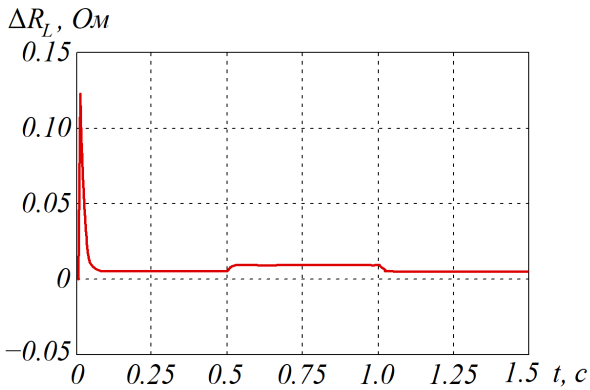


Рис. 11. Значення похибки спостерігача опору навантаження

На рис. 12 наведено осцилограми вихідної напруги, виміряної в колі постійного струму, що точно відповідає еталонному значенню.

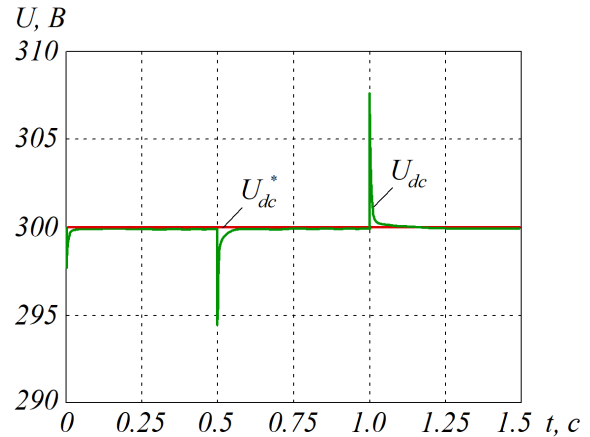


Рис. 12. Осцилограми вихідної напруги при зміні величини опору навантаження

На рис. 13 наведено величини активної та реактивної складових потужності (сигнал задавання та реальне значення) при зміні опору навантаження. При такій швидкій динаміці значення відстежуються без перерегулювання.

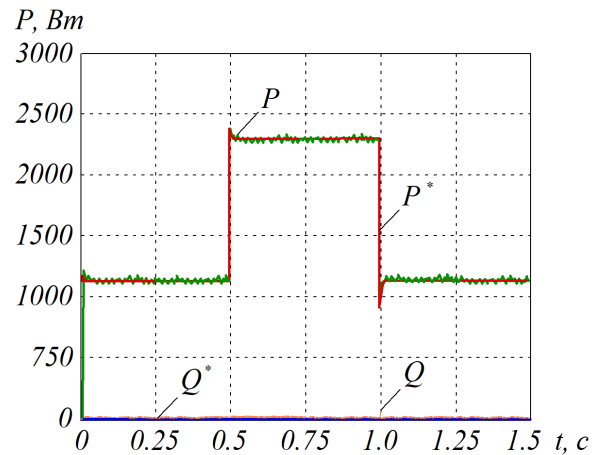


Рис. 13. Зміна миттєвих величин активної та реактивної складових потужності

Висока якість струму мережі підтверджується коефіцієнтом потужності, значення якого близьке до одиниці (рис. 14).

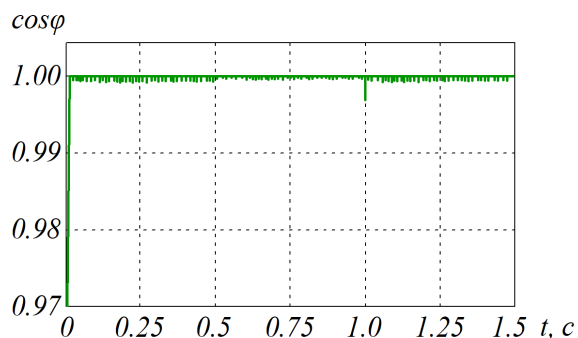


Рис. 14. Значення коефіцієнта потужності

Що стосується якості електроенергії як в умовах роботи спостерігача напруги мережі, так і без нього, то коефіцієнт гармонічних спотворень THD становить 1,13, що менше 5% відповідно до міжнародних стандартів.

#### Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- розглянуто класичну схему активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Відповідно до схеми заміщення наведено систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у вхідній електричній мережі;

- визначено параметри системи прямого керування потужністю активного випрямляча напруги на основі ковзного режиму. Для наведеної структурної схеми трифазного активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги керування потужністю відсутня необхідність у таблиці перемикачів ключами, тим самим зменшується складність такого керування. Ковзний регулятор у розглянутій структурі виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної складових потужності, що споживається з електричної мережі;

- подано роботу системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму при зміні опору навантаження та зі спостерігачем навантаження. Спостерігач напруги мережі з урахуванням ковзного режиму разом з алгоритмом компенсації забезпечує точні результати з мінімальним коливанням, на відміну від одного фільтра нижчих частот. Активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії зі значенням THD менше 5% і коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

#### Список використаних джерел

1. Дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 73–87. DOI: 10.18664/1994-7852.203.2023.277905.
2. Zhu K., Deng F., Chen S., Hou J., Abulanwar S., Ufa R. An AC-side start-up scheme for thyristor-based modular multilevel converters. *2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. 2022. P. 1426–1431. DOI: 10.1109/PEAC56338.2022.9959105.
3. Godoy M. P., Uberti V. A., Abaide A., Guidali G. D., Prade L. R., Keller A. L. Identifying and reducing harmonic distortion in an industrial uninterruptible power supply system. *2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*. 2020. P. 34–39. DOI: 10.1109/EPECS48981.2020.9304969.
4. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
5. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Simulation of surge protection according IEC 61000-4-5. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 6. P. 293–296.
6. Cho N., Lee H., Bhat R., Heo K. Analysis of harmonic hosting capacity of IEEE Std. 519 with IEC 61000-3-6 in distribution systems. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. 2019. P. 730–734. DOI: 10.1109/GTDAAsia.2019.8715918.
7. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and



- pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
8. Chen X., Batarseh I. A fixed switching frequency dual-input LLC converter with PWM controlled semi-active rectifiers for PV applications. *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2021. P. 320–326. DOI: 10.1109/APEC42165.2021.9487039.
9. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Increasing the energy indicators of converters of electric vehicle charging stations. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 204. С. 124–137. DOI: 10.18664/1994-7852.204.2023.284153.
10. Ballo A., Grasso A., Privitera M. Demystifying regulating active rectifiers for energy harvesting systems: a tutorial assisted by Verilog-A models. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 43891–43908. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272504.
11. Purgat P., Bandyopadhyay S., Qin Z., Bauer P. Power flow decoupling controller for triple active bridge based on fourier decomposition of transformer currents. *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2020. P. 1201–1208. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124006.
12. Zhang J., Liu J., Yang J., Zhao N., Wang Y., Zheng T. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019. Vol. 34, No. 3. P. 2119–2133.
13. Rajendran G., Vaithilingam C., Mison N., Naidu K., Ahmed M. Voltage oriented controller based vienna rectifier for electric vehicle charging stations. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 50798–50809. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068653.
14. Soyed A., Kadri A., Hassnaoui O., Bacha F. Voltage oriented control of indirect matrix converter applied to wind energy conversion system using PMSM generator. *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2020. P. 790–795. DOI: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263781.
15. Jamil Asghar M. S. Digital control of thyristor switched reactors using discontinuous phase controlled switching. *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2020. P. 394–398. DOI: 10.1109/GUCON48875.2020.9231064.
16. Jamil Asghar M. S. Discontinuous phase controlled (DPC) convertors for charging of batteries of electrical vehicles. *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2020. P. 665–670. DOI: 10.1109/GUCON48875.2020.9231082.
17. Lamterkati J., Khafallah M., Ouboubker L., Aziz E. Comparison of DPC methods using two-level and three-level rectifiers. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. Vol. 4. P. 2477–2488.
18. Yousefi-Talouki A., Zalzar S., Pouresmaeil E. Direct power control of matrix converter-fed DFIG with fixed switching frequency. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 9. 2604. DOI: 10.3390/su11092604.
19. Haque M. M., Wolfs P., Alahakoon S. Active power flow control of three-port converter for virtual power plant applications. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070350.
20. Abdelateef M. M., El-Hay E. A., Elkholy M. M. Recent trends in wind energy conversion system with grid integration based on soft computing methods: comprehensive review, comparisons and insights. *Arch Computat Methods Eng*. 2023. Vol. 30. P. 1439–1478. DOI: 10.1007/s11831-022-09842-4.
21. Najafzadeh M., Ahmadiyahangar R., Husev O., Roasto I., Jalakas T., Blinov A. Recent contributions, future prospects and limitations of interlinking converter control in hybrid AC/DC microgrids. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 7960–7984. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3049023.
22. Manganaro G. An introduction to high sample rate nyquist analog-to-digital converters. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*. 2022. Vol. 2. P. 82–102. DOI: 10.1109/OJSSCS.2022.3212028.
23. Komurcugil H., Biricik S., Bayhan S., Zhang Z. Sliding mode control: overview of its applications in power converters. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 40–49. DOI: 10.1109/MIE.2020.2986165.



- Vol. 10. P. 73204–73213.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3188665.
24. Fallaha C., Saad M., Ghommam J., Kali Y. Sliding mode control with model-based switching functions applied on a 7-DOF exoskeleton arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2021. Vol. 26, No. 1. P. 539–550. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3040371.
  25. Guo Y., Liu M., Fang X., Li Z., Zhang X. Model predictive control for three-phase PWM rectifier with active power decoupling circuit under unbalanced grid voltages. *2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/PRECEDE.2019.8753277.
  26. 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)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
  27. Hashemzadeh S., Rostami R., Marzang V., Hosseini S. Direct power control of PWM three-phase rectifier using the predictive method: aims to reduce THD. *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEE50131.2020.9261070.
  28. Zhemerov G. G., Krylov D. S. Concept of construction of power circuits of a multilevel modular converter and its transistor modules. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No. 6. P. 26–32. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.6.03.
  29. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Варв'янська В. В. Синтез регулятора вихідної напруги активного чотириквadrантного випрямляча. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 131–144. DOI: 10.18664/1994-7852.198.2021.256643.
  30. Jadli U., Mohd-Yasin F., Moghadam H., Nicholls J., Pande P., Dimitrijević S. The correct equation for the current through voltage-dependent capacitors. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 98038–98043. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997906.
  31. Guo K., Yang M., Li X., Shi P., Wang P. Research on a new adaptive integral sliding mode controller based on a small BLDC. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 73204–73213. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3188665.
  32. Feng S., Lei J., Zhao J., Chen W., Deng F. Improved reference generation of active and reactive power for matrix converter with model predictive control under input disturbances. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 97001–97012. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929792.
  33. Zenteno-Torres J., Cieslak J., Davila J., Henry D. Sliding mode control with application to fault-tolerant control: assessment and open problems. *Automation*. 2021. Vol. 2, No. 1. P. 1–30. DOI: 10.3390/automation2010001.
  34. Jin S., Lv Z., Xiong X., Yu J. A chattering-free sliding mode filter enhanced by first order derivative feedforward. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 41175–41185. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2976737.
- Nerubatskyi V., Hordiienko D. The regulator of the output voltage of the active rectifier based on the sliding mode. Active voltage rectifiers are used in such areas of industry as converters of electric car charging stations, converters of traction substations of railways and subways, frequency converters, power sources for microelectronics, wind energy, telecommunications equipment. The article provides a study of control methods of three-phase rectifiers with pulse-width modulation, which allow improving the quality of electricity. The classical scheme of an active voltage rectifier with a description of electromagnetic processes in the input electrical network is considered. According to the substitution scheme, a system of differential equations describing electromagnetic processes in the input electrical network is given. The parameters of the system of direct power control of the active voltage rectifier based on the sliding mode are determined. For the given block diagram of a three-phase active rectifier with a sliding regulator and an observer of the output voltage value, the power control eliminates the need for a switch table, thereby reducing the complexity of such control. The sliding regulator performs the functions of regulating the output voltage, as well as regulating the amount of active and reactive power consumed from the electrical network. A sliding mode mains voltage monitor along with a compensation algorithm provides accurate results with minimal fluctuation. Simulation of the control system of the active rectifier regulator, based on the implementation of the sliding mode when the load resistance changes and with the load observer using the Matlab / Simulink software, was carried out. According to the obtained characteristics, the active rectifier provides better indicators of the quality of electrical energy with a



small value of the total harmonic distortion and a power factor close to unity.

**Keywords:** active voltage rectifier, sliding mode, voltage monitor, control system, power factor, pulse width modulation.

Надійшла 24.07.2023 р

**Нерубацький Володимир Павлович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [NVP9@i.ua](mailto:NVP9@i.ua).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

**Гордієнко Денис Анатолійович**, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [D.Hordiienko@i.ua](mailto:D.Hordiienko@i.ua).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

**Nerubatskyi Volodymyr**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [NVP9@i.ua](mailto:NVP9@i.ua).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

**Hordiienko Denys**, postgraduate of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [D.Hordiienko@i.ua](mailto:D.Hordiienko@i.ua).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

UDC 656.212

DOI: 10.18664/ikszt.v28i3.290138

HANNA SHELEKHAN, Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor of The Department of Railway Stations and Units

OLENA MKRTYCHYAN, Senior Lecturer of The Department of Marketing, commercial activity and economic theory

ANASTASIIA AFONINA, Master Student

## Research of the state of customs clearance of cargo at the Ukrainian border transfer points

***Abstract.** In international transportation, waiting in line for customs clearance often takes several times longer than the actual customs clearance. This article aims to show the influence of the technological and technical component of the customs process on its effectiveness, as well as the need to improve the methods of customs control during international transportation. The analysis of data on the current state of export transportation in Ukraine allowed us to identify the reasons for delays at border customs posts during international cargo transportation. The existing measures to improve customs procedures with cargo were reviewed. The prospects for carrying out technological operations and developing technical solutions to increase the efficiency of customs services and reduce the time of cargo clearance are outlined.*

***Keywords:** customs clearance, international transportation, customs checkpoints, border transfer points*

---

### Introduction

At the beginning of the war, more than a half of Ukrainian enterprises terminated their activities partially or completely due to the destruction of enterprises and infrastructure, the occupation of regions, a high level of uncertainty and risks, the severance of logistical and production ties, and the forced mass migration of the population. These factors also affected the country's transport sector, whose enterprises make up 11% of the total number in industry [1]. The export and import components of freight transportation have also undergone significant changes. After blocking the sea ports for transportation, the export cargo flow was directed to the western Ukrainian border crossings. But the carrying capacity of the EU infrastructure currently cannot provide the larger volumes of transportation of Ukrainian exports, which there is a need for [2]. The number of railway crossings is insufficient to ensure the transfer of goods on tracks of different widths, their capacities, as well as rolling stock from neighboring countries. In addition, the process of transferring goods by railway is accompanied by lengthy registration by custom service, which causes additional downtime and reduces the attractiveness of the domestic transport service and Ukrainian enterprises.

---

### Literature Review

There are a number of scientific works devoted to the issues of effective customs service at border checkpoints. The circle of scientific interests covers all types of transport used for modern international cargo transportation. Among the domestic authors of theoretical works and practical developments, P. Pashko, L. Prus, O. Hodovanets [3], B. Moroz [4], O. Desiatniuk [5], L. Ivashova [6], H. Nazarova, L. Kononenko [7] should be singled out. Prominent figures of the foreign scientific community on issues of effective customs service are Zheng Chang, Dong Yang [8], Dan Elliott, Carlotta Bonsignori [9] and others.

At the same time most of the available researches are focused not on the technological, but on the legal, economic and financial components of the customs process – an increase in revenues and fees, the introduction of charging in accordance to modern international standards.

© HANNA SHELEKHAN, OLENA MKRTYCHYAN, ANASTASIIA AFONINA 2023

### The purpose and tasks of the study

The purpose of the work is to study the current state of transportation of international cargo through border railway crossing points, which will provide an opportunity to determine the main directions for improving the customs clearance of cargo at Ukrainian customs. To achieve the goal, the following tasks were set:

- analysis of statistical data on the volume and duration of customs clearance of international cargo on Ukrainian railways;
- determination of the reasons for delays at customs checkpoints;
- development of promising directions for improvement of customs clearance of cargo.

#### Presentation of the main research material.

According to the results of 2022, cargo exports from Ukraine decreased by more than 38% [Fig. 1]. At the same time, the reduction occurred in all types of transport, but taking into account the fact that before the war more than 90% of goods were exported through sea ports, export logistics underwent significant changes. In 2022, ports provided 54% of export volumes [10]. The fall in imports was not as significant as that of exports, as the volume of purchases of foreign goods fell by less than a quarter of the pre-war level.

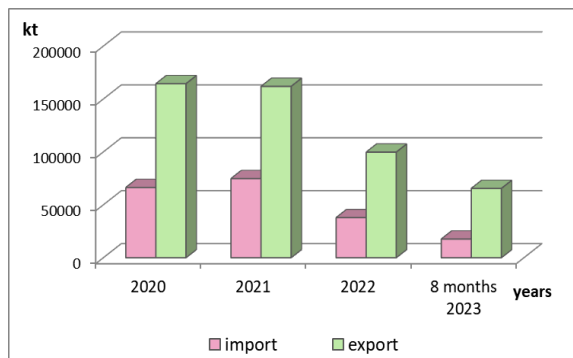


Fig. 1. Dynamics of volumes of international transportation in Ukraine

The analysis of the export of goods by nomenclature in the pre-war state and during it showed that not only the volumes of transportation, but also the share of types of goods in the total volume have changed [11]. Thus, despite the decrease in the volume of exports of such strategically important cargoes as grain and seed crops and vegetable oils in 2022, their percentage share in exports increased. The same trend is observed with products of the chemical and wood industry. At the same time, the share of exports of metals, mineral cargoes, and other categories of cargo decreased due to the damage and shutdown of many industries. This indicates a reduction in the nomenclature of goods exported last year.

Queues at the border remain the main reason for the delay of cargo during customs control during export and import for several years in a row [Fig. 2]. This situation became particularly acute with the beginning of the military invasion of the territory of Ukraine. Forced sharp reorientation of cargo flows from sea transport to rail as a result of the blocking of ports caused the inability of checkpoints to process the entire volume of incoming cargo in a timely manner. In addition, the foreign transport infrastructure was not ready to serve the number of Ukrainian rolling stock, which several times exceeds their carrying capacity [12]. This leads to queues at domestic border railway stations and disrupts the flow of service at them.

After the closure of the sea routes of the grain agreement, part of the grain exports were directed through the Danube river ports in the direction of Romania. The discrepancy between the throughput capacity of the river infrastructure and the significant technical capacities of seaports and ships caused queues at the approaches to shipping channels.



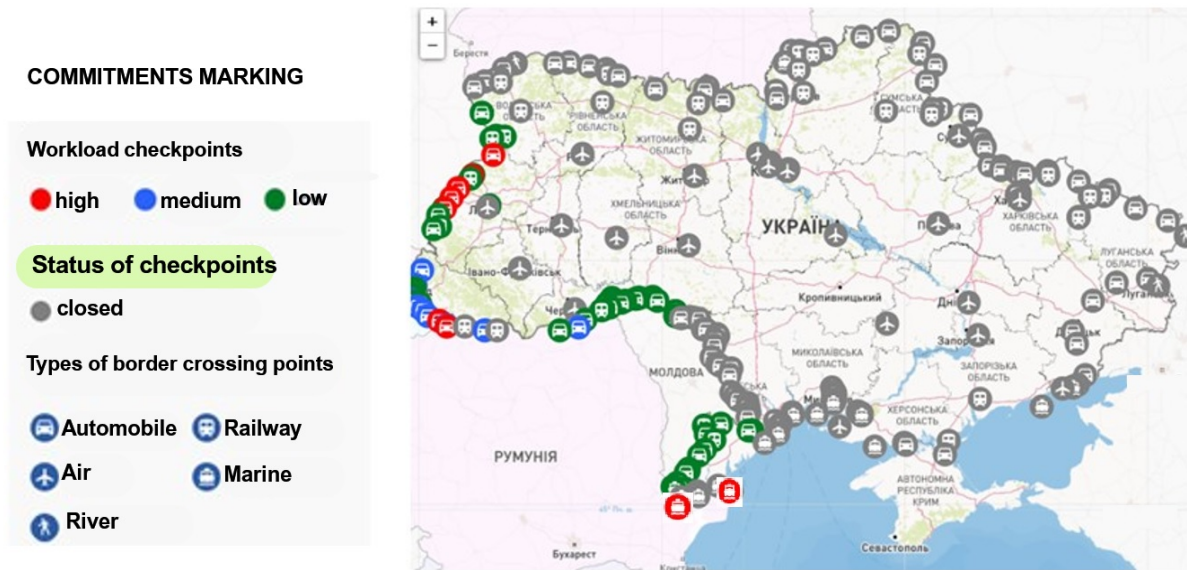


Fig. 2. Ukrainian checkpoints map

Among other reasons for delays in the transportation of international cargo, it should be noted about internal ones, which require effective solutions, in particular, problems in the implementation of customs procedures. The analysis of the causes of the significant

length of procedures during customs control in [13] made it possible to divide them into three groups: technological, technical, and document processing problems (Fig. 3).

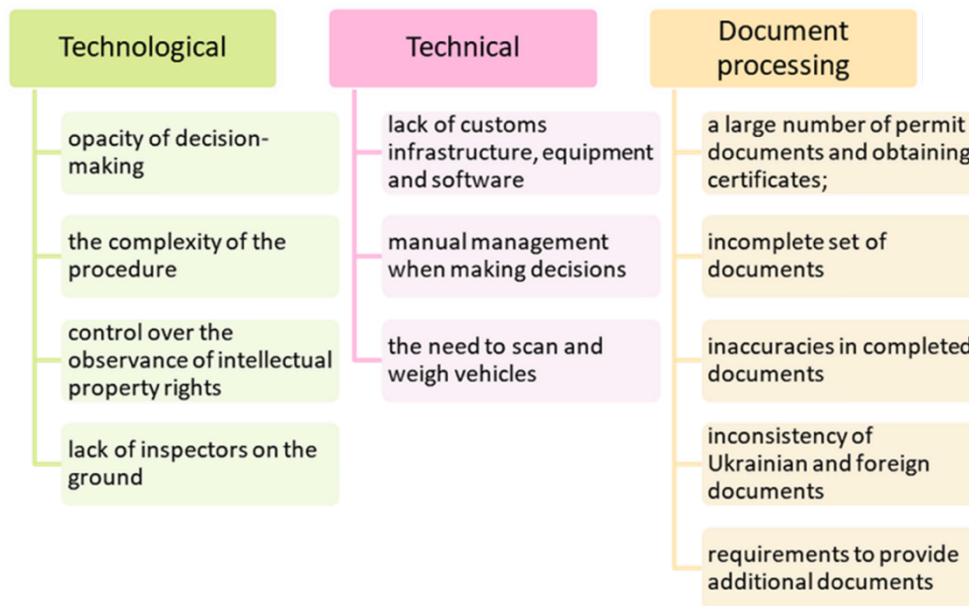


Fig. 3. Causes of the lengthy duration of procedures during customs clearance

At the same time, importers emphasized the lack of transparency in determining the customs value of goods, the complexity of customs and tax legislation. Exporters note the unpredictability of Ukraine's Customs policy and the low quality of transport infrastructure. But common problem in international transportation for both exporters

and importers is the imperfect regulation of customs procedures.

Thus, the assessment of the procedures faced by entrepreneurs when transporting goods will provide an opportunity to develop measures aimed at reducing both the duration of these operations and waiting for their

fulfillment. The elimination of the identified causes of cargo delays during customs control and the assessment of business regarding the procedure for its implementation are aimed at increasing the attractiveness of domestic goods for international partners.

According to The Customs Code of Ukraine, customs clearance of goods and vehicles should take about one day after submission of all necessary documents. With the beginning of the implementation of the Single Window service [14] the number of companies using it has increased in recent years. Due to the simplification of the document submission procedure using an electronic Single Customs Document, this principle of customs clearance is considered one of the most effective solutions in the world. According to this reform, the control bodies must make a decision regarding the release of the goods within 4 hours from the moment of receiving the documents from the enterprise. The companies interviewed as part of the study [13] were divided in their assessment of this service: half noted that the time of passing customs procedures really does not exceed 4 hours, the other half declared that there had been no changes. Such results are related, first of all, to the absence of a legal basis and a developed algorithm of actions of customs officials, which did not allow to establish a clear interaction between Customs and control services.

The Verkhovna Rada of Ukraine adopted a draft law on changes to The Customs Code in accordance with The Customs Code of the EU. But the main difference between the effective work of the European Customs and the Ukrainian one is the ability to carry out most customs operations in self-service mode using automated systems. The level of automation of domestic Customs is one of the main indicators by which the effectiveness of border crossing procedures is evaluated. In 2022, according to the "automation" indicator, Ukraine was assigned an indicator of 0.92. According to this criterion, Ukraine significantly lags behind other countries with income levels below the average (1.12) [15]. The still insufficient level of automation of customs procedures imposes certain limitations. Risk management mechanisms in the process of implementation are not supported by information technology. The electronic payment system is in the process of being integrated with the automated declaration and cargo processing systems. Only some of the duties, taxes and charges can be paid electronically.

As a part of the ongoing implementation of European standards in the national Customs, the reform involves the implementation of several projects. Among them there is the introduction of joint checkpoints and a joint database with EU countries. This should double the speed of registration procedures, reduce transport and time costs for the registration of goods in related services. Further digitization of all processes and introduction of an electronic queue are aimed at ensuring transparency and

availability of services. In addition, the customs service works to ensure a sufficient number of personnel and 24-hour service at checkpoints, and where possible – to move inspection beyond the border.

Optimization of customs operations is an integral condition for compliance of control services with modern challenges of international trade relations. No less important are innovations that would introduce automation of customs procedures and simplification of customs clearance. In particular, these innovations include:

- automatic registration of customs declarations;
- automatic determination of the scope of necessary verification measures;
- introduction of an online customs value calculator;
- operation of the online complaints system, which provides communication in electronic form;
- the unification of the customs tariff, which involves the reduction of dozens of duty rates types to a few;
- integration of the customs system with other systems of state bodies and private structures for automatic exchange of information;
- gradual reduction of documents for customs clearance.

Therefore, fully automatic customs clearance will become potentially available for all enterprises. Automatic customs clearance will allow to simultaneously solve several tasks: reduce the cost of import and export of goods for Ukrainian enterprises; improve general business conditions and realize the country's logistics potential; reduce the role of the "human factor".

### **Conclusion**

Bringing the technology of conducting customs operations with international cargo into compliance with the established norms and reducing queues while waiting for their fulfillment are the primary tasks for the Customs and transport service of Ukraine. This will contribute to the protection of the interests of business and the state in the domestic and foreign markets of the country, the introduction of an effective mechanism for the implementation of domestic and foreign economic policy, and compliance with the contractual obligations of participants in international trade by increasing the capacity of checkpoints and reducing the duration of inspection of customs control facilities. The key answer to the issue of speeding up customs procedures and avoiding delays in the advancement of international cargo lies in the systematic development of technology for performing customs procedures in accordance with international standards and modern technical support of customs with automated decision support systems. The implementation of such measures will primarily affect the activities of representatives of Ukrainian business and the employees

of regional customs. As active participants in the customs process, they are interested in the development and implementation of effective work algorithms during control of the correctness of the determination of the customs value, legality and justification of decisions regarding cargo delays. The gradual implementation of customs reforms and their acceleration based on a clear strategy corresponds to the directions of implementation of European practices and legislation within the framework of the association agreement with the EU, as well as the formation of a positive image of Ukraine in the global business environment and the acceleration of its European integration processes.

### References

1. Діяльність вітчизняних підприємств під час війни в Україні: дослідження реального стану та потреб (липень 2022). Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2022. 23 с.
2. Problems of export transportation by railway transport of Ukraine. National Institute for Strategic Studies. URL : <https://niss.gov.ua/en/node/4508> (accessed: 04.09.2023)
3. Пашко П. В., Прус Л. Р., Молдован Е. С., Слободян В. В. Митний контроль та митне оформлення в морських пунктах пропуску: проблемні аспекти та напрями удосконалення: кол. моногр. / заг. ред. Т. В. Руда, А. В. Артеменко. Хмельницький, 2020. 236 с.
4. Мороз Б. І., Дяченко О. О. Розробка автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті. *Системні технології*, 2014. Вип. 5. С. 55–64.
5. Десятнюк О., Харкавий М. Новітня парадигма реалізації митного контролю в умовах спрощення митних процедур. *Ефективна економіка*. URL : <http://www.m.nayka.com.ua/?op=1&j=efektyvna-ekonomika&s=ua&z=3857> (дата звернення: 05.08.2023).
6. Івашова Л. М., Кийда Л. І. Діджиталізація митних процедур: сучасний стан та перспективи розвитку митної справи. *Публічне управління та митне адміністрування*, 2019. № 3 (22). С. 218-230.
7. Назарова Г.Б., Кононенко Л.В., Васильєв О.В. Митне оформлення у системі митного контролю: сучасний стан та напрями удосконалення. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*, 2023. Вип. 16. С. 249-57.
8. Zheng Chang, Dong Yang, Yulai Wan, Tingting Han. Analysis on the features of Chinese dry ports: Ownership, customs service, rail service and regional competition. *Transport Policy*, 2019. Vol. 82. P. 107-116. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.06.008>.
9. Dan Elliott, Carlotta Bonsignori. The influence of customs capabilities and express delivery on trade flows. *Journal of Air Transport Management*. 2019. Vol. 74. P. 54-71. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.09.007>.
10. Freight transportation by railways of Ukraine for 12 months of 2022. Report of the cargo transportation monitoring department of JSC "Ukrzaliznytsia". Department of commercial work. Kyiv, 2023.
11. Economic statistics / Economic activity /Transport and communications. URL : <https://www.ukrstat.gov.ua> (accessed: 05.09.2023).
12. The "Paths of Solidarity" initiative is a tool for the practical integration of Ukraine into the EU, the results of the discussion. URL : <https://europewb.org.ua/initsiatyva-shlyahy-solidarnosti-ye-instrumentom-praktychnoyi-integratsiyi-ukrayiny-v-yes-rezultaty-dyskusiyi/> (accessed: 06.09.2023).
13. Simplification of trade procedures in Ukraine: evaluations and expectations of business. Kyiv. 2021. 275 p.
14. The Single Window for international trade. URL : [https://mof.gov.ua/uk/the\\_only\\_window\\_for\\_international\\_trade-472](https://mof.gov.ua/uk/the_only_window_for_international_trade-472) (accessed: 28.08.2023).
15. Trade Facilitation. 2023. URL : <https://www.oecd.org/trade/topics/trade-facilitation> (accessed: 28.05.2023).

Г. І. Шелехань, О. М. Мкртчян, А. О. Афоніна. Дослідження стану митного оформлення вантажів у пунктах пропуску на кордоні України

### Анотація

У міжнародних перевезеннях очікування в черзі на митне оформлення часто займає в кілька разів більше часу, ніж саме митне оформлення. Дана стаття має на меті показати вплив технологічної та технічної складової митного процесу на його ефективність, а також необхідність удосконалення способів здійснення митного контролю при міжнародних перевезеннях. Аналіз даних щодо поточного стану експортних перевезень в Україні дозволив виявити причини затримок на прикордонних митних постах під час міжнародних вантажних перевезень. Розглянуті існуючі заходи щодо удосконалення проведення митних процедур з вантажами. Окреслено перспективи проведення технологічних операцій та розробки технічних рішень для підвищення ефективності роботи митних служб та скорочення часу оформлення вантажів.

Збільшення обсягів вантажів, що перевозяться з України до інших європейських країн залізницею в останні місяці, призвело до збільшення часу очікування на митних та прикордонних залізничних станціях. У деяких місцях на перетин кордону в автомобільних пунктах пропуску доводиться чекати до

7 днів, а на залізничних пунктах пропуску – до 25. Це зумовлює тривалий термін доставки, що стає причиною зниження вартості цих вантажів та їх привабливості для іноземних покупців. Існує небагато наукової літератури з питання часу очікування під час митного оформлення. При цьому більшість наявних досліджень зосереджено не на технологічній, а на економічній та фінансовій складових митного процесу – збільшенні доходів і зборів, запровадженні тарифікації відповідно до сучасних міжнародних стандартів.

Тому, по-перше, необхідно розробити технологічні заходи щодо вдосконалення митного обслуговування з метою скорочення часу перебування вантажів під митним контролем. По-друге, впровадження сучасних технічних рішень допоможе пришвидшити митний огляд та уникнути великих черг на кордоні.

**Ключові слова:** митне оформлення, міжнародні перевезення, митні пункти пропуску, прикордонні пункти пропуску

Надійшла 12.09.2023 р

*Шелехань Ганна Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [shelekhana@email.ua](mailto:shelekhana@email.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6640-6084>,*

*Мкртчян Олена Миколаївна, старший викладач кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [elenamkrtychyan11@gmail.com](mailto:elenamkrtychyan11@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2687-174X>,*

*Афоніна Анастасія Олексіївна, студентка 2 курсу магістратури факультету управління процесами перевезень, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [afonina562@ukr.net](mailto:afonina562@ukr.net).*

*Shelekhan Hanna, Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of The Department of Railway Stations and Units, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [shelekhana@email.ua](mailto:shelekhana@email.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6640-6084>,*

*Mkrtychyan Olena, Senior Lecturer of The Department of Marketing, commercial activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [elenamkrtychyan11@gmail.com](mailto:elenamkrtychyan11@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2687-174X>,*

*Afonina Anastasiia, Master Student of The Faculty of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [afonina562@ukr.net](mailto:afonina562@ukr.net).*

ПАНЧЕНКО В. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,  
ХАРІН Р. О., аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції

*У статті розглядаються особливості, пов'язані зі старінням і деградацією сонячних фотоелектричних систем. Розглянуто і проаналізовано багато факторів старіння, включаючи температуру, вологість, пил, тріщини панелей. Проводилися моделювання та знімалися характеристики сонячної електростанції яка встановлена на даху тягової підстанції №18 м. Зміїв. Крім того, досліджено вплив факторів старіння на продуктивність сонячних фотоелектричних модулів, включаючи термін служби, ефективність, деградацію матеріалу, перегрів і невідповідність.*

*Деградація сонячних панелей відбувається постійно, як через неправильний режим експлуатації, так і під час впливу на них зовнішніх факторів. Але швидкість деградації панелі можна значно знизити шляхом вчасного проведення її діагностики та заміни несправних деталей. Деградація фотоелектричного модуля призводить до поступової втрати ефективності. Моделювання деградаційних процесів виконується протягом розрахункового року експлуатації фотоелектричної системи. На практиці деградація означає зменшення продуктивності фотоелектричної панелі.*

**Ключові слова:** деградація, сонячні панелі, пікова потужність, фотоелектрична система.

### Проблема постановки дослідження

Однією з найбільших причин забруднення навколишнього середовища у світі є традиційне виробництво електроенергії на основі викопного палива. Потреба в більш чистих і сталих джерелах енергії для виробництва електроенергії зростає через швидке виснаження запасів викопного палива та його негативний вплив на навколишнє середовище [2].

У цьому дослідженні розглядаються особливості, пов'язані зі старінням і деградацією сонячних фотоелектричних систем (ФЕС). Розглянуто і проаналізовано низку факторів старіння, включаючи температуру, вологість, пил та пошкодження панелей. Було проведено моделювання та знято характеристики сонячної електростанції, встановленої на даху тягової підстанції № 18 м. Зміїв. Крім того, досліджено вплив факторів старіння на продуктивність сонячних фотоелектричних модулів, термін їх служби, ефективність, деградацію матеріалу, перегрів і невідповідність.

### Аналіз останніх публікацій

Аналіз літературних джерел показує різні підходи до вирішення цієї проблеми. У роботі [3] було розглянуто забруднення та процес періодичного очищення сонячних елементів у районі Маан, Йорданія.

Щорічна деградація і продуктивність досліджувались за умов зовнішнього впливу. У статті [5] розглянуто і проаналізовано низку факторів старіння, розглянуто основні недоліки, проблеми та виклики, пов'язані зі старінням сонячних фотоелектричних перетворювачів. У статті [6] подано техніко-економічне обґрунтування та дослідження надійності електростанції на основі ФЕС для довгострокового виробництва електроенергії. У статті [7] подано аналіз нещодавніх досліджень впливу факторів експлуатації та навколишнього середовища на продуктивність сонячних фотоелектричних елементів, розглянуто найсучасніші методи зменшення впливу цих елементів, а також їхні пропорційні переваги і труднощі. У статті також досліджуються параметри, що впливають на виробництво сонячної енергії, та виконаний аналіз їх ефективності. Вивчається ефективність і здатність перетворення енергії напівпровідникових матеріалів для виробництва електроенергії. У роботі [8] було проведено детальне вивчення впливу частинок повітряного пилу на продуктивність фотоелектричної (ФЕ) моделі.



У цьому дослідженні вплив частинок пилу з навколишнього середовища на втрати потужності у фотоелектричному модулі оцінювався шляхом вимірювання електричних показників, таких як напруга, струм і потужність. У роботі [9] досліджуються втрати потужності, розвиток гарячих точок, дефекти на рівні міліметрів і коефіцієнт продуктивності (PR) 28 фотомодулів, що зазнали впливу.

**Мета статті** – проаналізувати фактори, що впливають на деградацію сонячних панелей, і оцінити їхній вплив на ефективність роботи сонячної електростанції.

### Основна частина

Деградація сонячних панелей відбувається постійно як через неправильний режим експлуатації, так і під час впливу на них зовнішніх факторів. Але швидкість деградації панелі можна значно знизити шляхом вчасного проведення її діагностики та заміни несправних деталей. За останніми дослідженнями, основним хімічним елементом, що викликає підвищену деградацію сонячних модулів, є натрій та інші активні метали. Зовнішні фактори підсилюють паразитні точки та часто ведуть до незворотних наслідків. Вчасно виявити деградацію сонячних панелей допомагають регулярні вимірювання напруги холостого ходу кожного модуля.

Деградують усі існуючі конструкції сонячних панелей – полікристалічні, монокристалічні, плівкові. На рис. 1 показаний графік деградації сонячних панелей Jinko Solar впродовж п'яти років експлуатації [1]. Лінійна гарантія продуктивності для монокристалічних модулів подана на рис. 2, а полікристалічних модулів – рис. 3.

Об'єктом дослідження є сонячна електростанція потужністю 12,20 кВт, встановлена на даху тягової підстанції № 18 м. Змів і підключена до живильної мережі [4]. Моделювання роботи і знання характеристик здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PVsyst.

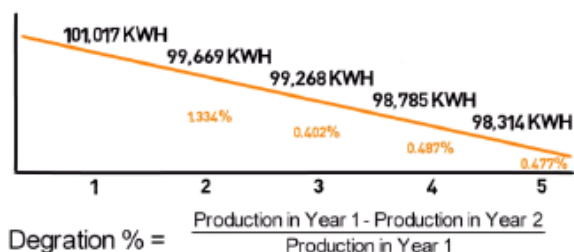


Рис. 1. Графік вимірювання деградації сонячних панелей Jinko Solar

За даними виробника сонячних панелей Jinko, деградація пікової потужності фотомодулів не перевищить такі критерії [9]:

- 1) для монокристалічних модулів:
  - 3 % номінальної потужності протягом одного року періоду, що починається з дати початку гарантії;
  - з другого по п'ятий роки лінійна зміна від 3 до 5 %, середня деградація становить 0,5 % на рік;
  - шостого по дванадцятий роки лінійна зміна від 5 до 10 %, середня деградація становить 0,714 % на рік;
  - 13-го по 25-й рік лінійна зміна від 10 до 20 %, середня деградація становить 0,769 % на рік;

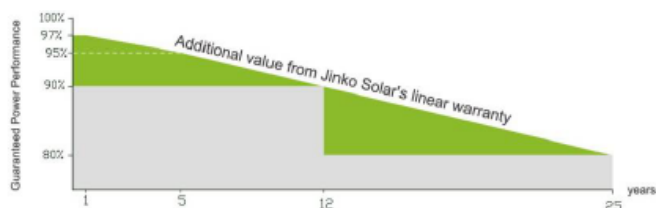


Рис. 2. Лінійна гарантія продуктивності для монокристалічних модулів

- 2) полікристалічних модулів:
  - 2,5 % номінальної потужності протягом одного року періоду, що починається з дати початку гарантії;
  - з другого по п'ятий роки лінійна зміна від 2,5 до 5 %, середня деградація в цей період становить 0,625 % на рік;
  - шостого по дванадцятий рік лінійна зміна від 5 до 10 %, середня деградація під час цього періоду – 0,714 % на рік;
  - 13-го по 25-й рік лінійна зміна від 10 до 20 %, середня деградація протягом цього періоду становить 0,769 % на рік.

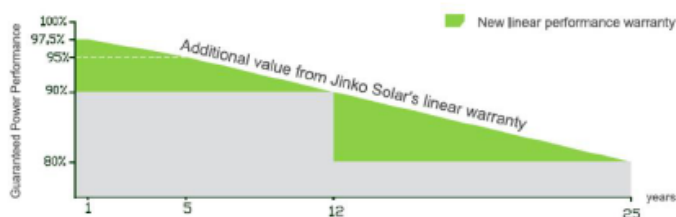


Рис. 3. Лінійна гарантія продуктивності для полікристалічних модулів

Основними функціональними вузлами фотоелектричної системи (ФЕС), що піддаються старінню, є:

- фотоелектричний модуль (тривала деградація, ступінь якої зростає при збільшенні невідповідності

між модулями, що не деградують з однаковою швидкістю);

- батареї в системах з накопичувачем (мають бути замінені, іноді кілька разів протягом життя системи);

- інвертори, що з часом потребують ремонту або заміни;

- елементи електропроводки, грозозахисту та ін.

[2].

Виконаємо дослідження впливу різних факторів на ступінь деградації функціональних вузлів секції ФЕС, побудованої на 10 фотомодулях Jinko Solar.

1. Дослідження падіння напруги через зміну опору провідників. Характеристика неспівпадіння (Mismatched charact.) проходить у середині рис. 4.

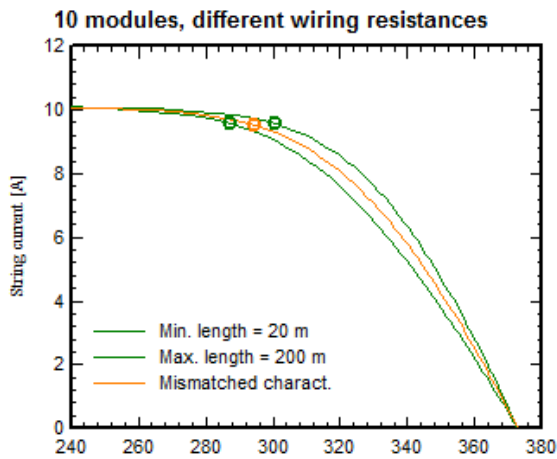


Рис. 4. Характеристики струму ФЕС при зміні опору провідників

Як бачимо, найбільші значення падіння струму спостерігаються після 300 В саме за рахунок зміни довжини провідників між двома секціями ФЕС.

Характеристики системи навколо точки максимальної потужності ( $P_{mpp}$ ) є порівняно еквівалентними одна з одною. Видно, що невідповідність, тобто різниця між значеннями  $P_{mpp}$  двох секцій і середнім значенням  $P_{mpp}$ , є невеликою. Наприклад, для отриманих значень опору провідника довжиною 500 м і перерізом 2,5 мм<sup>2</sup> порівняно з провідником довжиною «нульової» довжини падіння напруги становить 5,2 %, але втрати на невідповідність становлять лише 0,38 %.

На рис. 4 та 5 показано зміни струму та потужності в одній секції залежно від напруги при різних значеннях довжини з'єднувальних провідників.

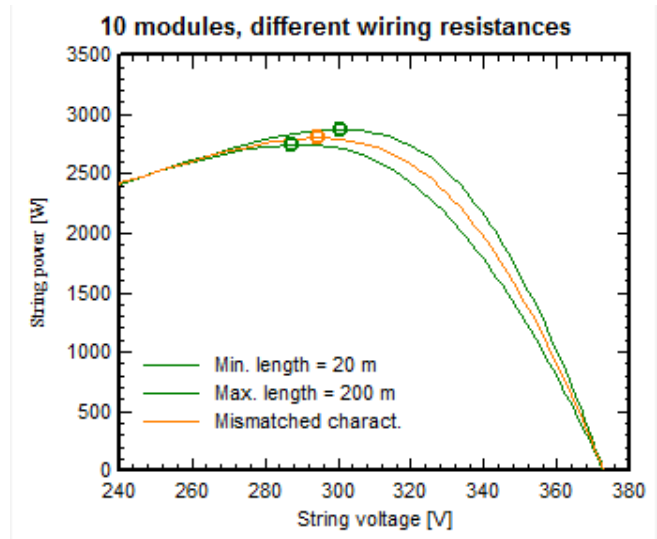


Рис. 5. Залежність напруги та потужності ФЕС

Результати моделювання, показані на рис. 6, доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння. Відтак знижується і ефективність ФЕС.

Отже, у цьому випадку для мінімізації втрат потрібно розташовувати об'єкти ФЕС неподалік один від одного.

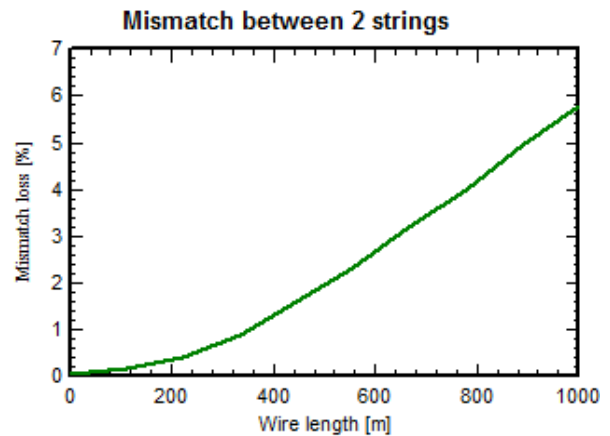


Рис. 6. Зміна втрат між двома секціями ФЕС залежно від довжини провідника

Результати моделювання зміни довжини провідника, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання			
	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Масив 1	300.8	9.55	2873.9
Масив 2	287.6	9.56	2750.1
Невідповідність масивів	294.7	9.51	2803.3
Середня потужність 1 і 2			2812.0
Втрати потужності за рахунок невідповідності			8.7 Вт, 0.31 %

2. Падіння напруги через коливання температури масиву (рис. 7).

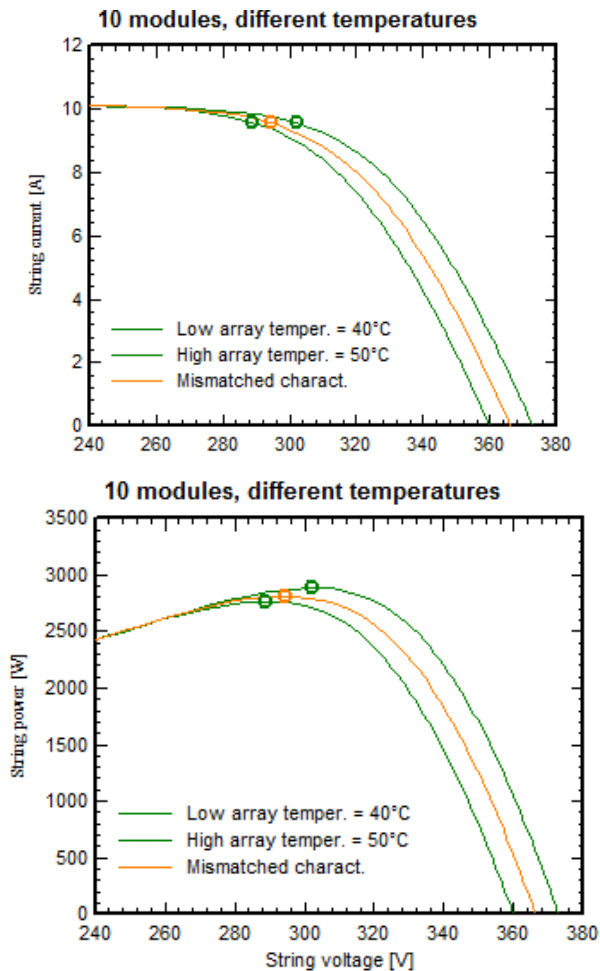


Рис. 7. Характеристики роботи ФЕС при зміні температури фотомодулів

Дослідження проводимо при зміні температури нагріву масиву від 40 до 50 °С. При цьому слід пам'ятати, що в реальних умовах експлуатації всі фотомодулі нагріваються по-різному.

Результати дослідження показують, що при різниці температур 10 °С падіння напруги становить 4,6 %, а втрати на неузгодженість – 0,47 %.

Результати моделювання, показані на рис. 8, доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною температури окремих секцій ФЕС що негативно впливає на ефективність її роботи.

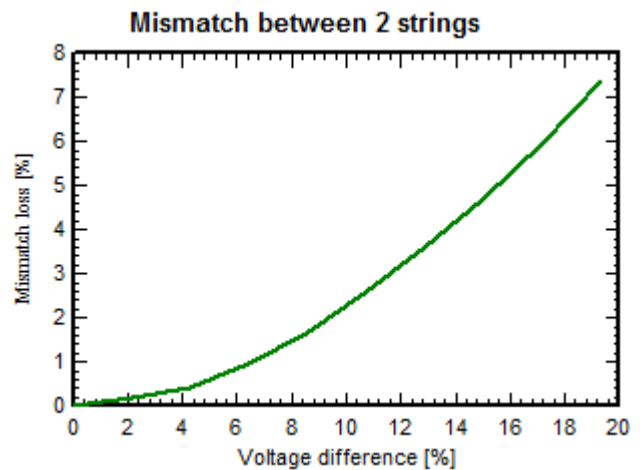


Рис. 8. Зміна втрат між двома секціями ФЕС залежно від різниці напруг

Результати моделювання впливу зміни температури, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 2.

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Масив 1	302.1	9.56	2887.6
Масив 2	289	9.57	2766.1
Невідповідність масивів	294.7	9.55	2814.3
Середня потужність 1 і 2			2826.8
Втрати потужності невідповідності			12.6 Вт, 0.45 %

3. Невідповідність за струмами двох модулів у секції (рис. 9, 10).

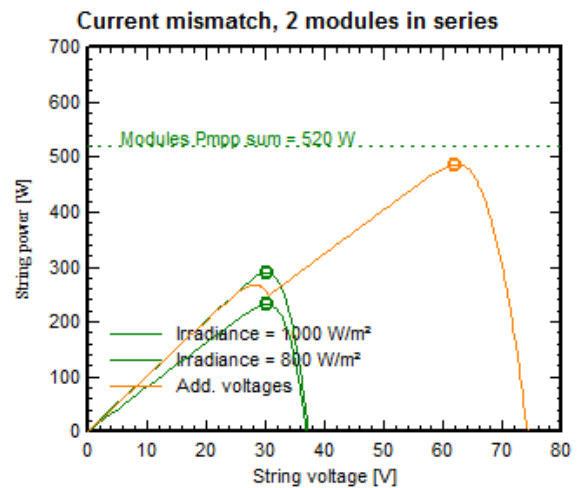
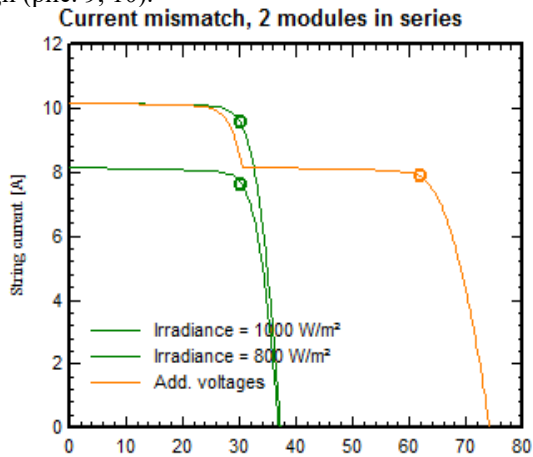


Рис. 9. Характеристики роботи ФЕС при зміні ступеня опромінення фотомодулів

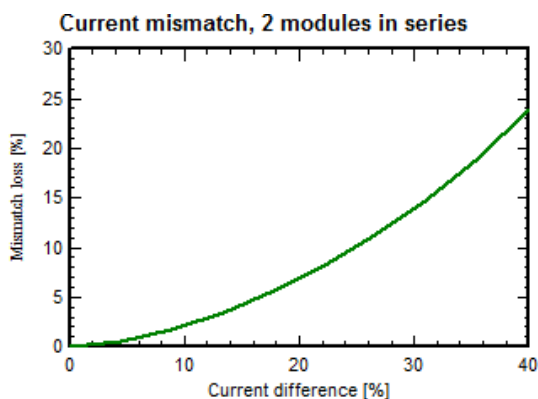


Рис. 10. Зміна втрат між двома модулями в секції ФЕС залежно від різниці струмів між ними

Результати моделювання, наведені на рис. 10, показують, що зі збільшенням різниці струмів між модулями швидко зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною опромінення окремих модулів ФЕС. Це у свою чергу також знижує ефективність роботи станції.

Результати моделювання впливу зміни ступеня опромінення, проведеного у програмному середовищі PVsyst, зведено до табл. 3.

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
PV модуль 1	30.2	9.56	288.8
PV модуль 2	30.3	7.64	231.6
PV модулі в секції	61.9	7.87	486.7
Підсумок потужність PV 1 і PV 2			520.4
Втрати потужності невідповідності			33.6 Вт, 6.91 %

4. Невідповідність за струмами, один модуль у секції.

Моделювання неузгодженості за струмами є більш складним процесом, оскільки одночасно може виникати кілька різних ситуацій.

У цьому випадку за допомогою PVsyst змодельована ситуація, коли секція складається з одного дефектного модуля. Вольт-амперні (ВАХ) і вольт-ватні характеристики (ВВХ) показані на рис. 11.

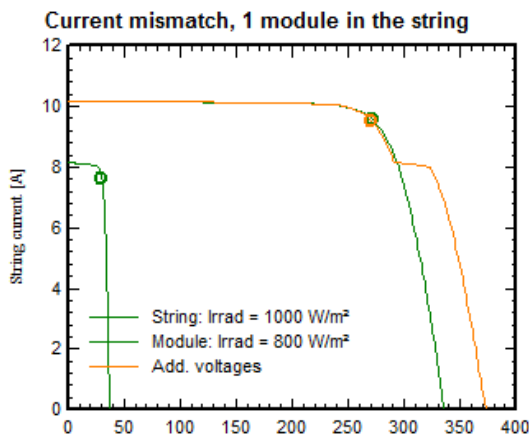


Рис. 11. Характеристики роботи ФЕС при зміні ступеня опромінення фотомодуля та секції

Результати моделювання показують, що коли струм у колі нижчий за  $I_{sc}$  несправного модуля, напруги зазвичай додаються. Коли струм перевищує  $I_{sc}$  несправного модуля, він стає обернено зміщеним, і в роботу вступають зворотні діоди. Дефектний модуль більше не активний, а зворотна напруга на діоді створює додаткові втрати.

Для ситуації одного дефектного модуля ефективні втрати як функція різниці струмів мають вигляд, показаний на рис. 12.

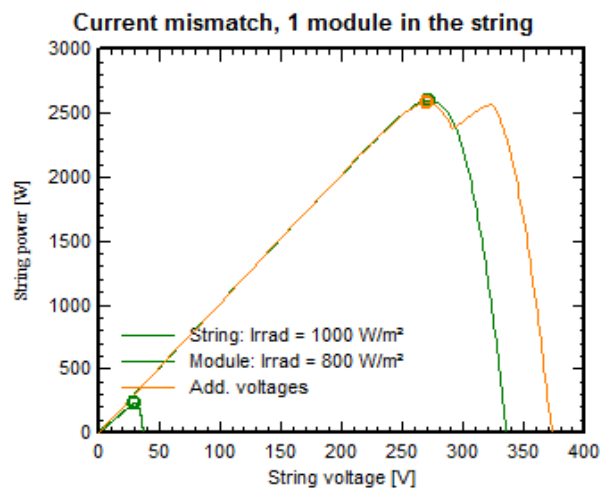
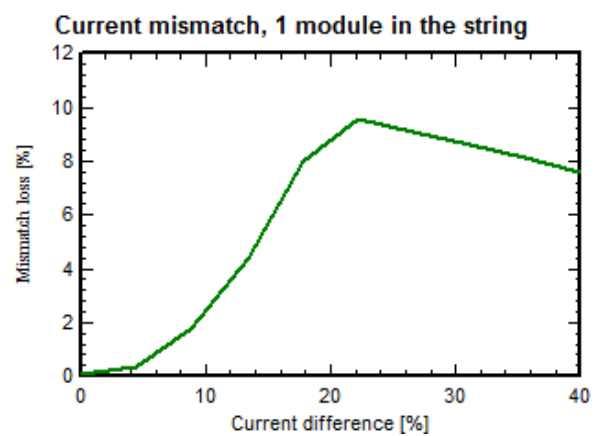


Рис. 12. Зміна втрат у випадку наявності одного дефектного модуля в секції як функція різниці струмів

У цьому випадку приблизно до 18 % отриманої  $P_{mp}$  на помаранчевій кривій є домінуючими. Криві, позначені зеленим на графіку вище відповідають решті модулів. Абсолютна втрата це повний «потенційний» внесок несправного модуля та потужність, втрачена

діодом під час активації (зменшується у відносному значенні). Результати моделювання зведено до табл. 4.

Таблиця 4

Результати моделювання

	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
Інша частина рядка	271.9	9.56	2598.8
Не відповідає PV модуля	30.3	7.64	231.6
PV модуль у серіях	270.1	9.54	2577.1
Повна індивідуальна потужність модуля			2830.5
Втрати потужності невідповідності			253.4 Вт, 9.83 %

Деградація фотоелектричного модуля призводить до поступової втрати його ефективності. Моделювання деградаційних процесів виконується протягом розрахункового року експлуатації фотоелектричної системи. На практиці деградація означає зменшення продуктивності фотоелектричної панелі. В деяких випадках це може мати певний «позитивний» вплив на повну поведінку системи, а саме на втрати потужності, коли інвертор недовантажений.

Отже, щорічна гарантована швидкість зменшення нижньої межі відповідає нахилу цієї

кривої. У нашому випадку для панелей Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 цей показник складає 0,6 % на рік. За допомогою моделі визначимо середню швидкість деградації (для масиву модулів). Це значення втрат може бути набагато нижчим за цей гарантований ліміт часу (рис. 13). Довгострокові вимірювання швидкості деградації є відносно рідкісними. Крім того, усі модулі не будуть руйнуватися з однаковою швидкістю. Це призведе до додаткових збитків через невідповідність, які будуть збільшуватись з часом.

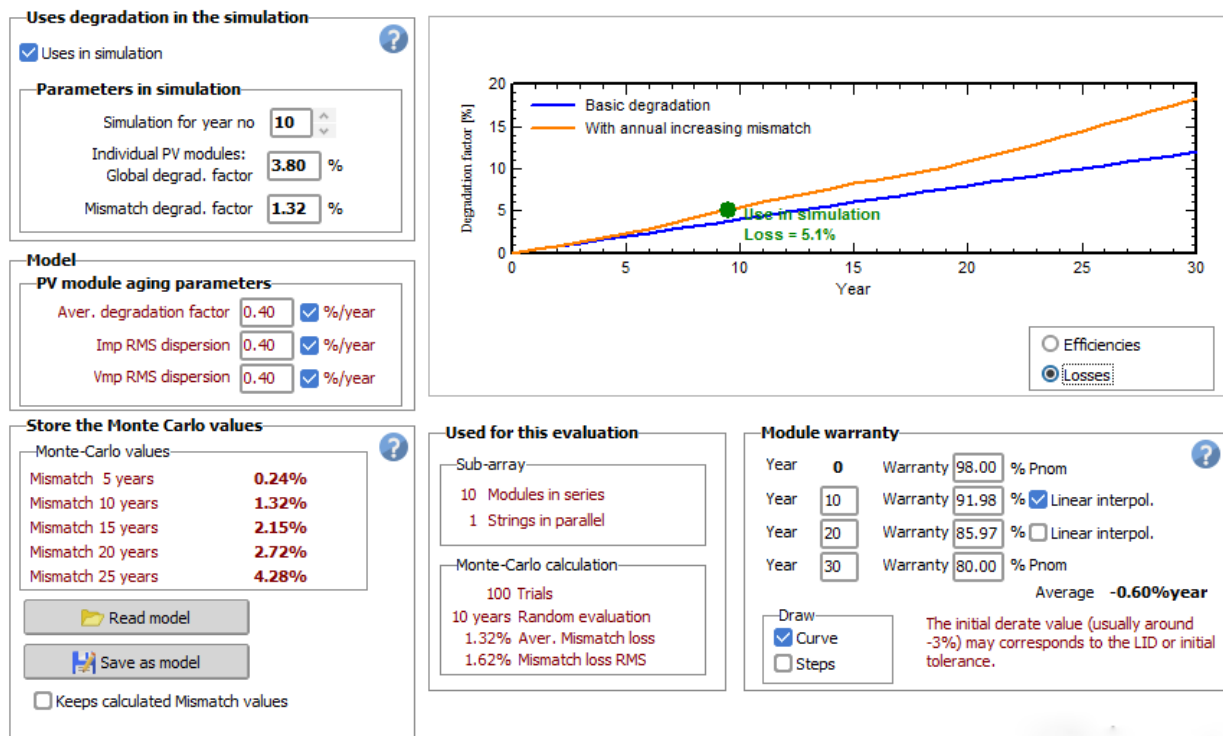


Рис. 13. Втрати за рахунок деградації фотоелектричного модуля

У лабораторних умовах при використанні 10 таких панелей в одній секції втрати в них за рахунок деградації складатимуть за 30 років 17,5 %, приблизно 0,6 % за рік використання. За 10 років використання сонячних панелей фактор деградації складатиме 3,8 %, а результат втрат за рахунок невідповідності панелей за роками становить 1,32 %. Фактор деградації сонячних панелей за 20 років використання становить 7,8 %, а втрати за рахунок невідповідності панелей складають 2,72 %. На 30 рік використання панелей деградація 11,8 % при невідповідності панелей 6,1 %.

За допомогою програмного середовища PVsyst було визначено середньоквадратичну величину цього розподілу та оцінено ступінь невідповідності як функцію віку системи. Розрахунок був виконаний за допомогою методу Монте-Карло з такими припущеннями:

- швидкість деградації кожного модуля є постійною протягом багатьох років;

- вибір розподілу обмежений двома сигмами, оскільки великі розбіжності призводять до дуже великих втрат невідповідності. За допомогою методу Монте-Карло було оцінено невідповідність модулів за кожні 5 років використання: 5 років – 0,24 %; 10 років – 1,32 %; 15 років – 2,15 %; 20 років – 2,72 %; 25 років – 4,28 %.

Заводом-виробником передбачається гарантія на модулі, що враховує нижню межу для окремого фотоелектричного модуля. У кривих, показаних на рис. 14, початкові втрати на рівні 3 % слід розглядати як заводські дефекти або можливий дефіцит початкової потужності (допуск, заводська похибка вимірювання). Заводом-виробником надається гарантія, що за 25 років експлуатації ефективність сонячної панелі буде становити не менше 80 %. З урахуванням деградаційних процесів, що відбуваються в сонячній панелі щорічно, за допомогою моделювання були отримані такі характеристики.

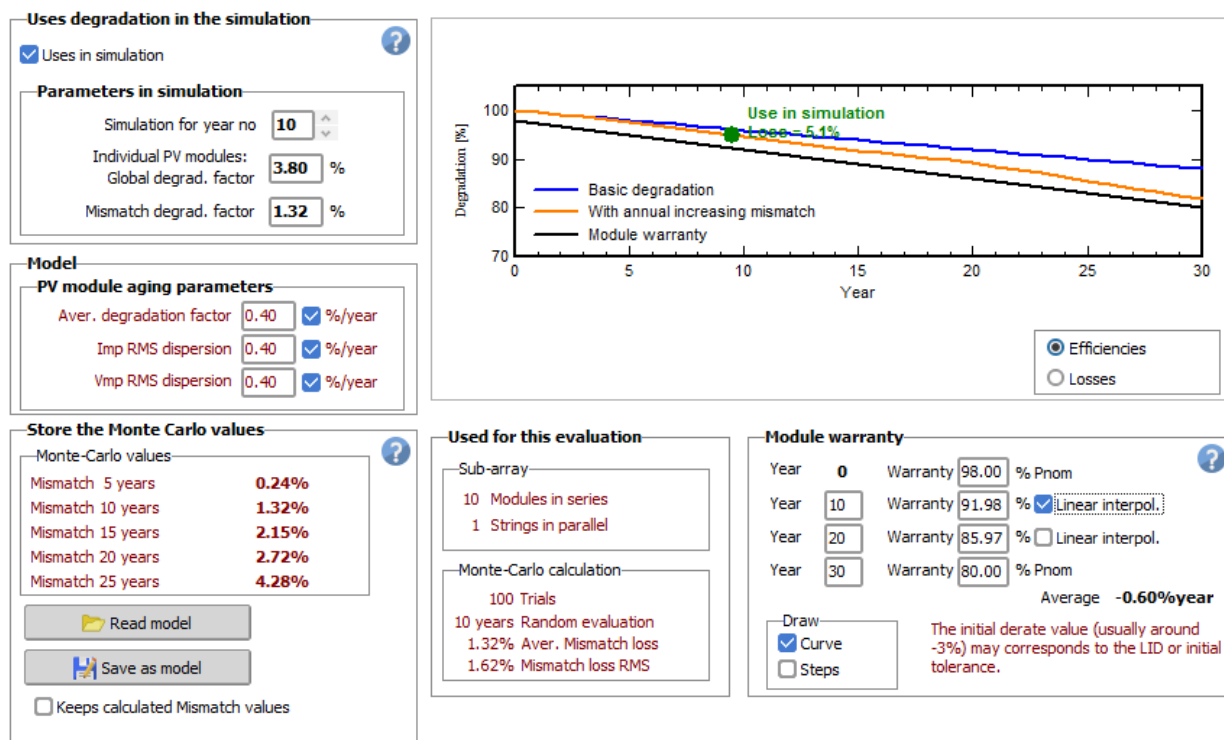


Рис. 14. Ефективність фотоелектричного модуля, передбачена заводом-виробником

Виробник сонячних панелей Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 дає гарантію, що сонячна панель за перші 10 років експлуатації буде виробляти 98 % номінальної потужності, за 10 років – 91,98 %, 20 років – 85,97 %, 30 років – 80 %.

**Висновки**

Для дослідження в роботі використано реальний об'єкт, для якого була розрахована потужність обладнання, необхідна для забезпечення власних потреб тягової підстанції. Було визначено, що станція генерує 14745 кВт·год енергії постійного струму за допомогою фотомодулів. Обсяг річної енергії змінного струму, що вводиться до мережі, становить 13916 кВт·год. З метою підвищення ефективності

експлуатації до цієї станції необхідно приєднати акумуляторні батареї.

Результати моделювання доводять, що зі збільшенням довжини провідника зростають і втрати на неспівпадіння. Відтак знижується і ефективність ФЕС. Отже, у цьому випадку для мінімізації втрат потрібно розташовувати об'єкти ФЕС неподалік один від одного.

Результати дослідження показують, що при різниці температур 10 °С падіння напруги становить 4,6 %, а втрати на неузгодженість – 0,47 %.

Результати моделювання показують, що зі збільшенням різниці струмів між модулями швидко зростають і втрати на неспівпадіння, викликані зміною опромінення окремих модулів ФЕС. Це у свою чергу також знижує ефективність роботи станції.

Фактор деградації сонячних панелей за 20 років використання становить 7,8 %, а втрати за рахунок невідповідності панелей складають 2,72 %. На 30 рік використання панелей деградація 11,8 % при невідповідності панелей 6,1 %.

За допомогою методу Монте-Карло було оцінено невідповідність модулів за кожні п'ять років використання: 5 років – 0,24 %; 10 років – 1,32 %; 15 років – 2,15 %; 20 років – 2,72 %; 25 років – 4,28 %.

Для ефективної роботи сонячної електростанції потрібно дотримуватися таких умов експлуатації:

- електростанція потребує ефективного охолодження (вентиляції);
- для запобігання перегріву панелей їх необхідно розміщувати з технологічними зазорами, панелі та елементи електростанції необхідно розташовувати на відстані один від одного;
- місце встановлення панелей має передбачати наявність технологічних проходів;
- для недопущення взаємного затінення панелей між ними має бути передбачена достатня відстань.

#### Список використаних джерел

1. Деградація сонячних батарей. URL: <https://solarpanel.today/degradaciya-solnechnih-paneley/>.
2. Сталій розвиток: захит навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. *Збірник матеріалів VII Міжнародного молодіжного конгресу* (10-11 лютого 2022, Україна, Львів). Київ, 2022. 271 с.
3. The Effect of Soiling and Periodic Cleaning on the Performance of Solar Power Plants in Ma'an, Jordan, Mohammad Zayed Ahmed, Habes Al-Khawaldeh, Laith Al-Khawaldeh. *Innovative Systems Design and Engineering*, ISSN 2222-1727 (Paper). ISSN 2222-2871 (Online). Vol. 9, No. 1, 2018.
4. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 2. С. 3-13.
5. Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. Tuhibur Rahman, Ahmed Al Mansur, Molla Shahadat Hossain Lipu *Energies* 2023, 16(9), 3706. URL: <https://doi.org/10.3390/en16093706>.
6. Degradation analysis and the impacts on feasibility study of floating solar photovoltaic systems, Anik\_Goswami, Pradip Kumar\_Sadhu, *Sustainable Energy, Grids and Networks*. Vol. 26, June 2021, 100425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100425>.
7. Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study, *Sustainable Energy Research*. Vol. 10, Article number: 6 (2023), [Feroz Shaik](#), [Syam Sundar Lingala](#), [Punnaiah Veeraboina](#).
8. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module, *Renewables: Wind, Water, and Solar*. Vol. 4, Article number: 9 (2017) [Athar Hussain](#), [Ankit Batra](#), [Rupendra Pachauri](#).
9. Jinko Solar URL: <https://www.jinkosolar.com/en/>.
10. Power loss and hotspot analysis for photovoltaic modules affected by potential induced degradation, *npj Materials Degradation*. Vol. 6, Article number: 11 (2022) [Mahmoud Dhimish](#), [Andy M. Tyrrell](#). URL: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00221-9>.

Study of the impact of solar panel degradation on the efficiency of a solar power plant

**Abstract.** The article discusses the consequences and difficulties associated with the aging and degradation of solar photovoltaic systems. Many aging factors are considered and analyzed, including temperature, humidity, dust, and panel cracks. Modeling was carried out and the characteristics of the solar power plant installed on the roof of the traction substation №18 in Zmiyiv were recorded. Zmiyiv. In addition, the influence of aging factors on the performance of solar PV modules, including service life, efficiency, material degradation, overheating, and mismatch, was investigated. The degradation of solar panels occurs constantly, both due to improper operation and when exposed to external factors. However, the rate of panel degradation can be significantly reduced by timely

diagnostics and replacement of faulty parts. The degradation of a photovoltaic module leads to a gradual loss of efficiency. Modeling of degradation processes is performed during the estimated year of operation of the photovoltaic system. In practice, degradation means a decrease in the performance of a photovoltaic panel.

**Keywords:** degradation, solar panels, peak power, photovoltaic system.

*Надійшла 15.09.2023 р*

**Панченко Владислав Вадимович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>. E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua).

**Харін Руслан Олександрович**, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>. E-mail: [kharinruslan07@gmail.com](mailto:kharinruslan07@gmail.com).

**Panchenko Vladyslav**, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>. E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua).

**Kharin Ruslan**, postgraduate student, department of department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>. E-mail: [kharinruslan07@gmail.com](mailto:kharinruslan07@gmail.com).

0.73

## Редакційна колегія

Бабасв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Буцько 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;

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;

Приходько С. І., 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);

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

## © Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti)

*Свідоцтво про державну реєстрацію*

*Серія КВ № 21514-11414 ПП від 18. 08. 2015 р.*

*Засновник - Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050*

*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://jiks.kart.edu.ua>).*

*Затверджений до друку Вченою радою УкрДУЗТ*

*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,  
майд. Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 215.*

*Тел.: (057) 730-10-84, 730-10-82. E-mail: xiittc@ukr.net*

*Відповідальна за випуск Харін Р.О.*

*Редактор Ібрагімова Н. В.*

*Підписано до друку 29.09.2023 р. Формат 60x84 1/8.*

*Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №*

*Наклад 105 прим. Ціна договірна.*

*Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.*

*Видавець та виготовлювач*

*Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.*

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.*