

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки
Заснований у грудні 1996 р.

1/2023

Редакційна колегія:

Al-Azzeh J., д-р філософії, доцент (Йорданія)
Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор
Артемчук В. О., д-р техн. наук, с.н.с.
Базіло К. В., д-р техн. наук, професор
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, професор
Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, професор
Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор
Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор
Вітенько Т. М., д-р техн. наук, професор
Вербицький С. Б., канд. техн. наук
Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент
Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор
Гевод В. С., д-р хім. наук, доцент
Зайчук О. В., д-р техн. наук, професор
Заболотній С. В., д-р техн. наук, професор
Iavich M., д-р філософії, професор (Грузія)
Kažys R. J., д-р техн. наук, професор (Литва)
Коваленко І. Л., д-р техн. наук, професор
Лобода О. А., д-р хім. наук
Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор
Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор
Осипенко В. І., д-р техн. наук, професор
Палагін В. В., д-р техн. наук, професор
Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор
Плахотний О. П., д-р техн. наук, доцент
Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор
Ситник О. О., д-р техн. наук, професор
Скиба М. І., канд. техн. наук, доцент
Смотраєв Р. В., канд. техн. наук, доцент
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор
Сухенко В. Ю., д-р техн. наук, професор
Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор (гол. ред.)
Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор
Фролова Л. А., д-р техн. наук, професор
Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент
Яценко І. В., д-р техн. наук, професор

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002.

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

- АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
- ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
- ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Редакційна рада видання:

Григор О. О., д-р політ. наук, професор,
ректор Черкаського державного
технологічного університету (голова ради);
Гончаров А. В., канд. техн. наук, доцент,
перший проректор ЧДТУ;
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор,
проректор з науково-дослідної роботи
і міжнародних зв'язків ЧДТУ;
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу ЧДТУ

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89

vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Тарасенко Я. В. (відповідальний секретар)
e-mail: vtn@chdtu.edu.ua

1•2023

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

TECHNICAL SCIENCE

1 • 2023

**Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(спеціальності 101, 113, 121, 122, 123, 125,
126, 131, 132, 133, 151, 152, 161, 172)
категорія «Б»
(накази МОНУ від 02.07.2020 №886,
від 24.09.2020 №1188)**

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**
Index Copernicus Journals Master List,
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI),
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,
Open Ukrainian Citation Index

Електронна версія:
vtn.chdtu.edu.ua; visnyk.chdtu.edu.ua

Затверджено вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 8 від 13.02.2023

За повного або часткового
передрукування матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Averin D. V., Borovytskyi V. M.</i> Multi-beam optical sensor for measuring drone coordinates	5
<i>Тичков Д. В., Бондаренко М. О.</i> Математична модель статичних та квазістатичних електричних полів надмалої потужності під поліелектродним циліндричним давачем.....	13
<i>Філімонов С. О., Яценко С. С.</i> Вдосконалена конструкція вібропруга з п'єзокерамічним актуатором	23

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Федоров Є. Є., Нечипоренко О. В.</i> Метод динамічного управління буфером запасів на основі м'яких обчислень.....	32
<i>Sysoienko A. A., Sysoienko S. V.</i> Method for minimization of Boolean functions with a large number of variables based on directed enumeration	42
<i>Міхав В. В., Мелешко Є. В., Дресєв О. М., Лавданський А. О.</i> Модель рекомендаційної системи для комп'ютерних мереж типу P2P	52
<i>Корчинська О-С. І., Микийчук М. М.</i> Джерела метрологічних ризиків як фактори впливу на технологічний процес	61

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

<i>Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Кириченко Є. П., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В.</i> Закономірності впливу різних чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих палив.....	72
<i>Іваненко І. М.</i> Генерування водню шляхом гідролізу борогідридів.....	82

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

Averin D. V., Borovytskyi V. M. Multi-beam optical sensor for measuring drone coordinates ...	5
Tychkov D. V., Bondarenko M. O. Mathematical model of static and quasi-static electric fields of ultra-low power under a polyelectrode cylindrical transducer	13
Filimonov S. O., Yashchenko S. S. Improved design of vibratory plow with piezoceramic actuator	23

INFORMATION TECHNOLOGIES

Fedorov E. E., Netchyporenko O. V. Method of dynamic management of inventory buffer based on soft calculations	32
Sysoienko A. A., Sysoienko S. V. Method for minimization of Boolean functions with a large number of variables based on directed enumeration	42
Mikhav V. V., Meleshko Ye. V., Drieiev O. M., Lavdanskyi A. O. A model of recommender system for P2P computer networks	52
Korchynska O-S. I., Mykyychuk M. M. Sources of metrological risks as factors of influence on the technological process	61

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

Kozyar N. M., Kyrychenko O. V., Kovbasa V. O., Kyrychenko Ye. P., Vaschenko V. A., Kolinko S. O., Tsybulin V. V. Regularities of the influence of different factors on the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures based on oxygen-containing oxidizers and metallic fuels	72
Ivanenko I. M. Hydrogen generation by hydrolysis of borohydrides	82

[0000-0002-4432-3958] **D. V. Averin**, Ph. D. Student,
[0000-0001-6816-0391] **V. M. Borovytskyi**, Dr. Sc., Professor
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

MULTI-BEAM OPTICAL SENSOR FOR MEASURING DRONE COORDINATES

The article presents a multi-beam optical sensor for measuring drone coordinates in three-dimensional space. The first part of this sensor is installed around a landing pad or a goods delivery pad. It forms a set of low-energy optical beams of a certain shape. Each beam transmits a digital code that characterizes its location relatively the pad. The second part of this sensor is a small set of miniature photodetector units that are fixed under the drone. The proposed technique based on the beam code analysis helps to calculate the drone coordinates relatively the pad. This sensor guarantees few centimetres accuracy, which is necessary for accurate drone taking off or landing without usage of an expensive digital camera or a human operator. The paper describes the classification of drone coordinate measurement techniques, sensor design, and experimental tests of the proposed optical sensor. The advantages and possible applications of these sensors are also discussed.

Keywords: optical sensor, coordinate measurement, drone navigation, vision-based positioning, data fusion, multi-beam technique, coded beams.

Introduction. Drones are already an important part of our lives. They are widely used for observation and remote sensing, rescue services, goods delivery, etc. Drone taking off, landing and, especially, goods delivery are carried out many times. In most cases human operators do these operations and, as a result, it increases the price and risk of drone usage. Modern techniques for automatic control of drones require digital cameras on stabilized gimbal, powerful computers and high-speed telecommunication units [1-9]. It also makes drones and drone usage expensive. For widespread implementation of drone goods delivery and other fields, drones must have a reliable and economical system for coordinate measurements during fully automatic taking off, landing and goods delivery. But any coordinate measurements using digital cameras or with the help of a human operator become very expensive and not reliable enough for numerous routine drone flights.

Goal and tasks. The goal of this study is to find and to study the compact and economical drone positioning system (DPS) that can work without usage of digital cameras and control of a human operator. This DPS should cover the gap between several meter accuracy of coordinate measurements in economical global position system (GPS) modules and the required accuracy equal to 0.25-0.5 m for accurate and automatic landing, taking off and goods delivery. To achieve the specified goal, the following tasks

must be solved: study of the known techniques for drone coordinate measurements, identification of the best DPS design, creation of mathematical description of the proposed DPS and performance of experimental research that should confirm the correctness of the proposed solution.

Methods

1. Overview of techniques for drone coordinate measurement. All DPSs can be conventionally divided into two big categories: DPSs that use digital cameras and DPSs that do not use cameras (Figure 1). DPSs with digital cameras can be divided into systems in which the cameras are located on the ground and those in which the camera is located on the drone (Figure 1). The main idea of the first is to recognize the drone, track it and transfer information to the drone for its correction [1, 2]. The second, with the help of a camera, recognize markers on the ground, and based on their size and position, receive information about the location of the drone in space relative to these markers. Markers can be: objects, inscriptions (for example, a QR-code), light, and combinations thereof [3-9].

DPSs that do not use cameras use emitting devices and radiation receivers, which can be located both on the ground and on the drone in various combinations, [10-16] (Figure 1). Emitters can use different wavebands (infra-red (IR), visible, radio waves, etc.), receivers are selected according to the band that has been chosen. Descriptions of these DPSs are made in [17, 18].

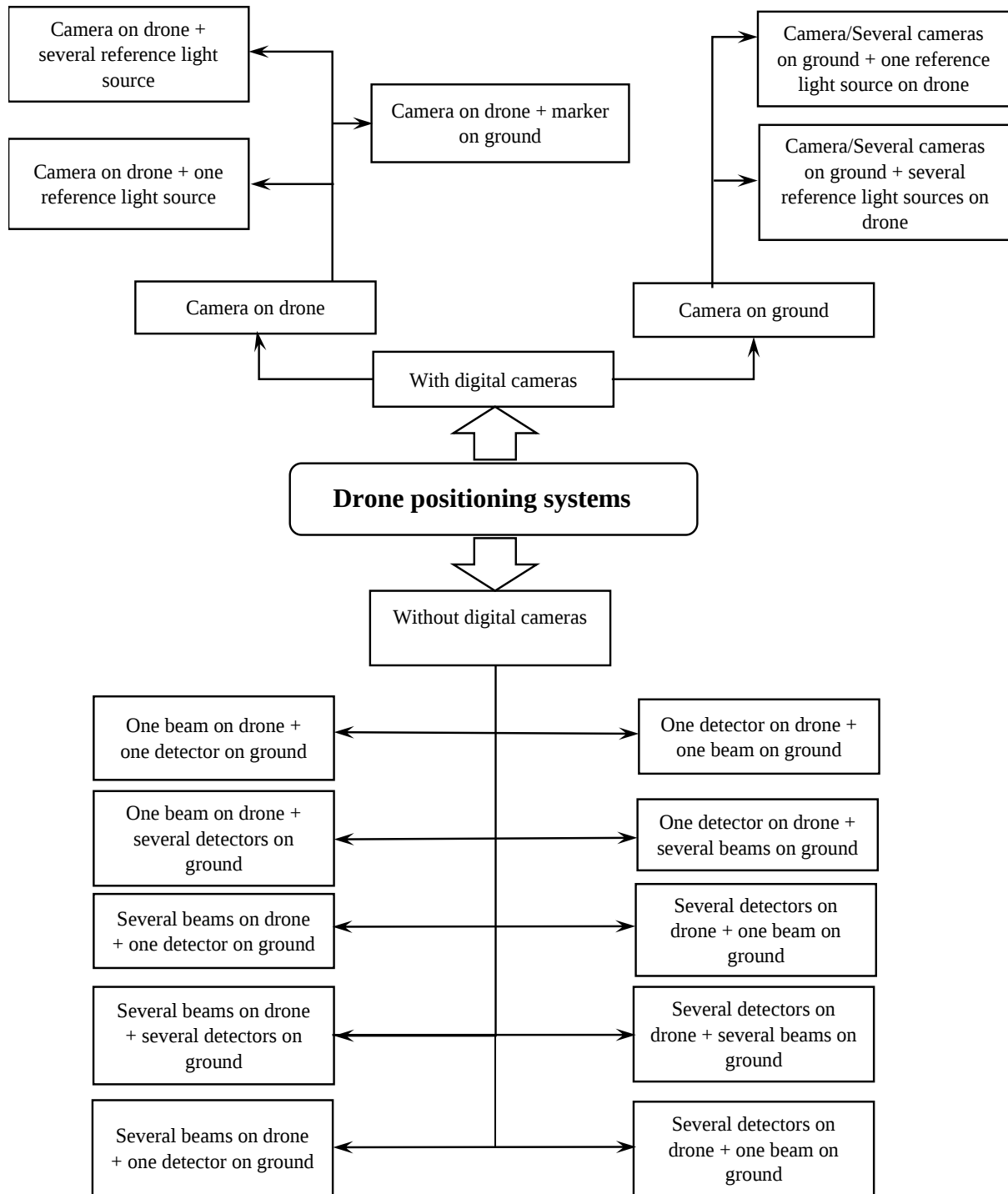


Figure 1. Classification of drone positioning systems

2. Description of the proposed DPS. The proposed DPS refers to systems that do not use cameras. The main idea of the proposed DPS is the application of the spatial structure of IR beams. These beams transmit coded data about the direction to the landing site in three-dimensional (3D) space. A drone is equipped with one or more small photodetector units that

receive coded data from one or more optical beams.

The DPS consists of two parts: the first one is the illumination part installed on the ground around the landing site. The second part is the receiving part. It is fixed on the drone (Figure 2) [19, 20].

The illumination part includes a power source 3, a control unit 2 and two or more beam formation units (BFU) 1, which illuminate low-energy IR beams 7. Each beam transmits digital codes that set the direction to the landing site in 3D space (Figure 2). The receiving part is just a few very small photo detectors 4 mounted on the bottom surface of the drone. They work only during landing, when they capture coded optical signals and send them to the flight controller (or

drone computer) 6. The control unit 2 generates codes for each beam, and these codes are separated in time. Therefore, the photodetector units can record and analyze the codes of various beams. Analyzing the received codes – data about the direction to the landing site – this computer calculates the drone's path to it. Battery 5 supplies light-sensitive units 4, drone computer 6 and other drone units with electricity (Figure 2).

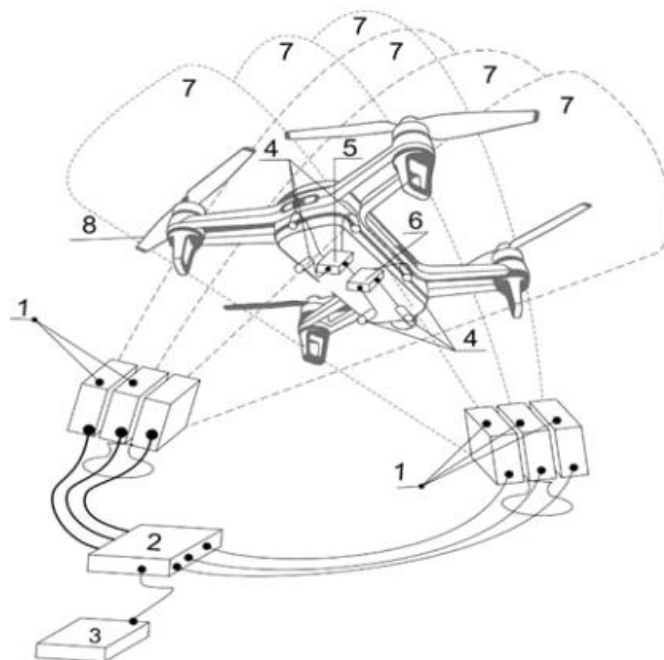


Figure 2. Proposed design of the multi-beam drone positioning system

3. Mathematical model of multi-beam DPS. The requirements for the proposed multi-beam DPS are as follows:

1. The DPS should be economical. This means that the number of illumination units and IR beams should be kept to a minimum.

2. The beams must cover a sufficient 3D volume around the landing pad without unlit areas, considering that all beams are the same.

3. The positioning system should be compact with the possibility of installation on any small plane.

4. The dimensions of the working area of the positioning system should be large enough for drones of different types and sizes.

5. The number of beams in the horizontal direction must not be even.

To meet the requirements, a beam geometry is chosen with only one illumination unit in vertical direction and two illumination units in horizontal direction.

To understand how much is needed by the radiation source on each block to ensure the required accuracy, it is necessary to carry out calculations using Figure 3 and Figure 4.

First, let's calculate horizontal beams (Figure 3). For this, it is necessary to set the positioning accuracy, which is equal to: R_p ; the radius of the landing zone R_w , as well as the distance from the center of the landing zone to the radiation source L_B .

At the same time, it is necessary to fulfill the following requirement:

$$L_B > R_w > R_p.$$

The first step is to calculate the angular size of the landing pad $\Delta\alpha$. For this, using Figure 3 and the given parameters, we will get:

$$\Delta\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{R_p}{L_B}\right),$$

where R_p is landing pad radius; L_B is the distance between the center of the landing pad and the BFU; $\arctan()$ is inverse tangent function.

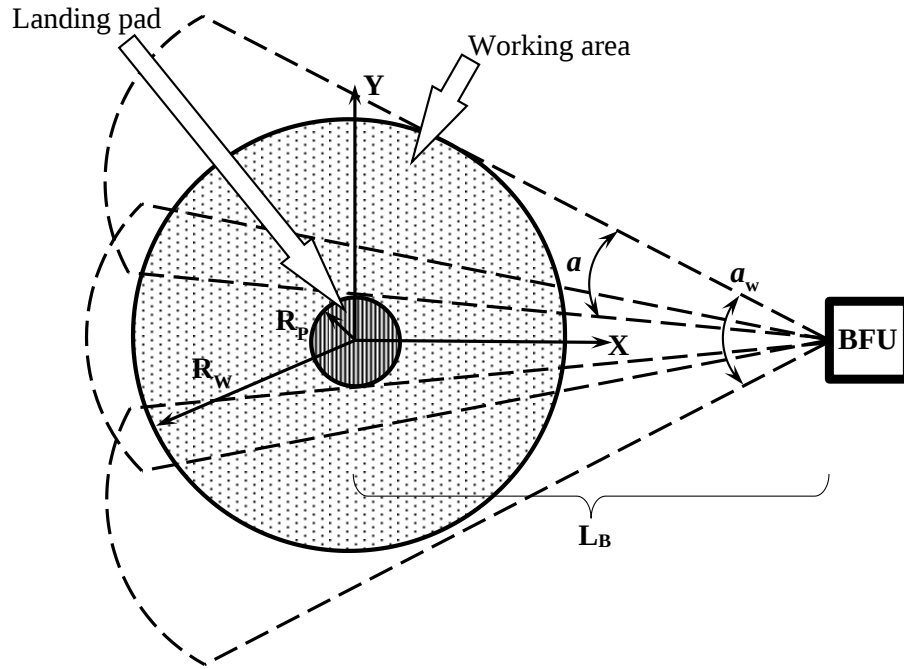


Figure 3. Horizontal beams in the multi-beam drone positioning system

In the next step, using Figure 3 and the initial parameters, we will calculate the radiation angle of the BFU block α_w :

$$\alpha_w = 2 \cdot \arctan\left(\frac{R_w}{L_B}\right),$$

where R_w is the radius of the working area; L_B is the distance between the center of the landing pad and the BFU: $L_B > R_w$.

Having found the angles $\Delta\alpha$ and α_w , you can calculate the number of beams of the same thickness that fill the space given by the angle α_w , using the following formula:

$$N_d = \frac{\alpha_w}{\Delta\alpha}.$$

Since N_d can only be an integer, it is necessary to round up to a larger number of beams.

Knowing that the beams overlap each other with a ratio of 1/3 to form the equal angular zones, as well as the number of identical N_d beams, you can calculate the number of radiation sources in one BFU:

$$N_s = \frac{N_d}{2} + 1.$$

N_d , N_s must be an integer. Therefore, it is necessary to round the obtained result to a larger value in order to cover all the working area of the system with beams.

Similarly, let's calculate vertical beams (Figure 4).

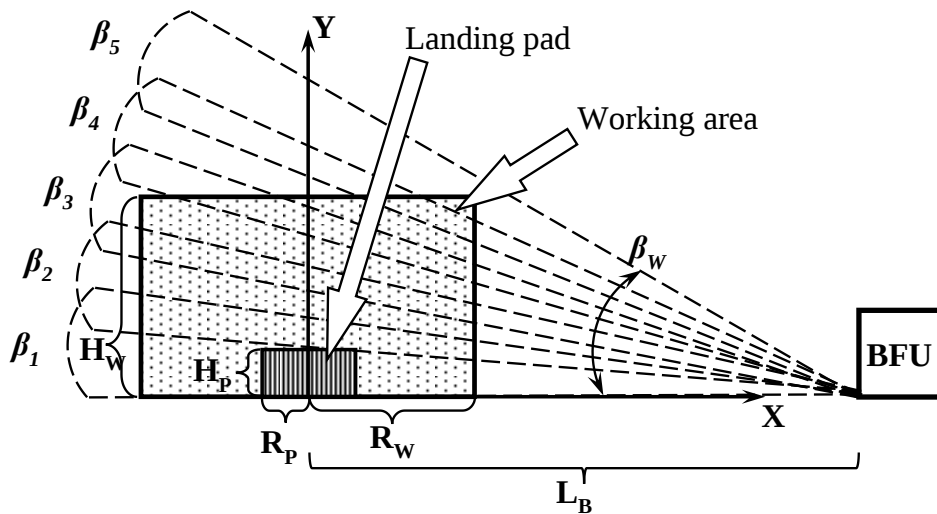


Figure 4. Vertical beams in the multi-beam drone positioning system

All beams are similar and have an overlapping area equal to 1/3 of the full size of the angle. This guarantees the absence of unlit areas between two beams (Figure 4).

As in the case of horizontal beams, to begin with, we will calculate the angular size of the precise positioning zone $\Delta\beta$:

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{H_P}{L_B}\right),$$

where H_P is the height of landing pad; L_B is the distance between the center of the landing pad and the radiation block.

The next step is to calculate the angular size of the landing zone β_W :

$$\beta_W = \arctan\left(\frac{H_W}{L_B}\right),$$

where L_B is the distance between the center of the landing pad and the BFU; H_W is the height of the positioning working area.

Having found the angles $\Delta\beta$ and β_W , you can calculate the number of beams of the same thickness that fill the space given by the angle β_W , using the following formula:

$$N_k = \frac{\beta_W}{\Delta\beta}.$$

Since N_k can only be an integer, it is necessary to round up to a larger number of beams to accurately cover the working landing area.

Let's calculate the number of radiation sources in one BFU:

$$N_h = \frac{N_k}{2} + 1.$$

N_h , like N_k , cannot be a fraction, so it is necessary to round up to a larger value.

The total number of radiation sources on the three blocks will be equal to

$$N = 2 \cdot N_S + N_h.$$

For experiments, it is necessary to calculate the specific number of radiation sources in horizontal and vertical blocks of the BFU, which will be able to satisfy the given positioning accuracy. The results of calculations are presented in Table 1.

4. Experimental studies of multi-beam DPS prototype. To confirm the functionality of the proposed DPS, a working prototype of such a system was designed and assembled, and a set of experiments were conducted with it. To achieve the required forms of the indicatrix, various combinations of diaphragms were used on the illumination part, as well as the receiving part to reduce the influence of external interference.

The DPS prototype contains the illumination part, which is placed on the ground, and a receiving part, which is placed on the drone. The illumination part has a control unit in which there are an Atmega8 microcontroller [21], a power supply and three BFUs. Five radiation sources – IR light emitted diodes TSAL6100 [22] – are installed in each BFU.

Table 1. Angular size and angular coordinates of the beams

Parameters	Horizontal direction	Vertical direction
The size of the working area, m	$R_W = 0.5$	$H_W = 0.35$
Landing area size, m	$R_P = 0.1$	$H_P = 0.1$
The distance between the center of the landing site and the source of radiation, m	$L_B = 1.0$	
Corner overlap, corner degrees	$\Delta\alpha = 7$	$\Delta\beta = 4$
Angular size of the working area, angle degrees	$\alpha_W = 77$	$\beta_W = 59$
The number of identical beams	$N_S = 5$	$N_h = 5$
Total number of beams	$N = 15$	

The receiving part is located on the drone. It has a signal processing unit, a power source (a drone power source can be used) and photodetector units TSOP32156 with a frequency of 56kHz [23]. For visualization of drone coordinate this unit has an indicator – a set of light emitted diodes.

Results. The experimental research was carried out in various times and weather conditions, including summer, winter, sunny days,

cloudy days, nights, etc. Figure 5 shows the experiment with one illumination unit and a drone with the indicator of the coded beams.

The experimental results showed that the proposed DPS works correctly. The receiving part gradually turned off the indicators as it deviated from the center of the receiving part. Table 2 shows the measured positioning deviations for different combinations of diaphragms used.

Discussion. The Table 2 shows that the best result was obtained with a combination of diaphragms on the emitting unit and a cone on the photodetector unit. The deviation at 1 m distance with such a combination is 180 mm. It means that accuracy of coordinate measurements can be evaluated as 1/3 of beam width – 60 mm

when the distance is 1 m. It means that the accuracy 180-240 mm could be reached when distance is in the range 3-4 m. In this case DPS should have only two BFUs and minimum 5 emitters in each BFU. These experimental studies have confirmed the correctness of the proposed mathematical apparatus.



Figure 5. Drone on the landing platform during experiments with the proposed multi-beam drone positioning system

Conclusions. The scientific novelty is the new approach for measurements of drone coordinates during taking off, landing and goods delivery. This approach is application of multiple IR beams with definite angular orientations and angular dimensions that cover 3D space above a

landing pad. Each beam transmits a digital code, and a drone can calculate its coordinates using received beam codes. As a result, this DPS can guarantee the coordinate measurement accuracy less than 180-240 mm in a zone with radius up to 1-2 m.

Table 2. Experimental measured beam width

The distance from the centre of the landing pad to the BFU	Emitter without diaphragms + photodetector unit with a cylinder diaphragm		Emitter without diaphragms + photodetector unit with a cone diaphragm		Emitter with diaphragms + photodetector unit with a cylinder diaphragm		Emitter with diaphragms + photodetector unit with a cone diaphragm	
	Central beam (mm)	Edge beam (mm)	Central beam (mm)	Edge beam (mm)	Central beam (mm)	Edge beam (mm)	Central beam (mm)	Edge beam (mm)
200 mm.	150	190	150	220	80	150	70	130
500 mm.	290	340	220	300	190	260	100	165
1000 mm.	460	540	300	365	400	490	180	300

The proposed DPS closes the gap between the accuracy of economical GPS modules and the accuracy necessary for accurate taking off, landing and goods delivery. It makes possible accurate and fully automatic drone taking off, landing and goods delivery.

The practical value is possibility to manufacture the commercial multi-beam DPSs using the solutions from experimentally tested DSP prototype. These solutions include the BFU design, hardware and software for signal generations for coded beams, the design of the indicator for measurements of beam orientations and beam

geometry, etc. It should be noted, that the proposed DPS can be used in technical education for illustrations and practical works in disciplines such as photonics, microcontrollers and geometry.

The future activity should be concentrated on implementation of the proposed DPS in routine goods delivery operations made by drones, including the development of the software for reliable drone control in 3D space covered by multiple coded beams, registration and analysis of factors that decrease accuracy of coordinate measurements, and evaluation of economical profit from implementation of the proposed DPS.

References

- [1] T. Yang et al., "A ground-based near infrared camera arbeam system for UAV auto-landing in GPS-denied environment", *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1393, 2016.
- [2] T. Ren, "The UAV take-off and landing system used for small areas of mobile vehicles", *Proc. SPIE*, vol. 10710, 2018.
- [3] Foxtech, "High-precision landing system for drones. Product description", 2020. [Online]. Available: <https://www.foxtechfpv.com/high-precision-landing-system-for-drones.html>.
- [4] Flytbase, "Precision landing system with widest compatibility. Product description", 2020. [Online]. Available: <https://flytbase.com/precision-landing/>.
- [5] IRLock, "MarkOne precision landing tutorial", 2020. [Online]. Available: <https://irlock.com/collections/ir-markers/products/ir-lock-sensor-precision-landing-kit>.
- [6] R. Paulson, "Infrared landing system for a mini remotely-piloted vehicle", *Proc. SPIE*, vol. 0124, 1977.
- [7] M. Skoczylas, "Autonomic drone landing system based on LEDs pattern and visual markers recognition", *Proc. SPIE*, vol. 10808, 2018.
- [8] Y. Xu, "Deep learning for UAV autonomous landing based on self-built image dataset", *Proc. SPIE*, vol. 11041, p. 20119.
- [9] B. Miller, A. Miller and S. K. Popov, "UAV landing based on the optical flow video navigation", *Sensors*, vol. 19, no. 6, p. 1351, 2019.
- [10] D. Starodubov, "Ship-relative instant multi-spectral position system", *Proc. SPIE*, vol. 10633, 2018.
- [11] V. Farr, "Optical guidance system and apparatus", *USA Patent US4856896A*, 1989.
- [12] D. M. Bertin, and L. D. Maria, "Optical device for indicating the glide angle for aircraft", *USA Patent US7535380B2*, 2009.
- [13] K. Fujiwara, "Control apparatus for running moving object", *USA Patent US4554498A*, 1982.
- [14] G. K. Netzler, and P. R. Lofgren, "Apparatus and method for optical guidance system for automatic guided vehicle", *USA Patent US4626995A*, 1986.
- [15] M. S. Feldmann, "System and methods of detecting an intruding object in a relative navigation system", *USA Patent US9435635B1*, 2015.
- [16] D. N. Fisk, "Fresnel lens optical alignment system", *USA Patent US2015/0153486 A1*, 2015.
- [17] D. Averin, V. Borovytsky, and V. Mykytenko, "Drone positioning systems that uses digital cameras", *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, July 2022.
- [18] D. Averin, V. Borovytsky, and S. Tuzhanskyi, "Local positioning system for drones without usage of digital cameras", *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 42, no. 2, pp. 5-11, Oct. 2022.
- [19] V. Borovytsky, and D. Averin, "Optical sensor for drone coordinate measurements", *Proc. SPIE*, vol. 11352, 2020.
- [20] V. Borovytsky, and D. Averin, "Optical-electronic positioning system", *Ukr. Patent 141943*, 2020.
- [21] Microchip Technology, "8-bit Atmel with 8KBytes in-system programmable flash ATmega8 ATmega8L", 2013. [Online]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_summary.pdf.
- [22] Vishay Semiconductors, "TSAL6100 high power infrared emitting diode, 940 nm", 2019. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf>.
- [23] Vishay Semiconductors, "TSOP32156 IR receiver modules for remote control systems", 2019. [Online]. Available: <http://www.vishay.com/docs/82490/tsop321.pdf>.

Д. В. Аверін, аспірант,
В. М. Боровицький, д-р техн. наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

БАГАТОПРОМЕНЕВА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ДРОНА

В статті представлено багатопроменеву оптико-електронну систему для вимірювання координат дрона в тривимірному просторі. Всі існуючі системи умовно можна поділити на два класи: системи, які використовують камери, і системи, які не використовують камери. В нашій роботі показано новий метод системи, яка не використовує камеру. Одна частина цієї системи встановлюється навколо посадкової площадки або площадки, над якою необхідно здійснити позиціонування. Він утворює набір низькоенергетичних оптичних променів певної форми. Кожний промінь передає цифровий код, який характеризує його розташування відносно площадки. Друга частина цієї системи – це невеликий набір мініатюрних фотодетекторів, які закріплюються під дроном. Запропонована методика на основі порівняння коду променя дозволяє розрахувати координати дрона відносно площадки. Ця система гарантує точність у кілька десятків сантиметрів, що необхідно для точного зльоту чи посадки дрона без використання дорогої цифрової камери чи людини-оператора. В статті запропоновано розрахунок кількості однакових променів випромінювальної частини, які необхідні для досягнення встановленої точності. Розрахунок проводився в двох напрямках: горизонтальному та вертикальному. Це дає змогу корегувати положення дрона у тривимірному просторі як для зльоту/посадки, так і для підтримки одного положення на висоті. Представлений працюючий прототип системи, яка складається з випромінювального блока на землі та приймального блока на дроні. Випромінювальний блок формує у просторі кодовані промені, які надходять до приймального блока. Приймальний блок оброблює отриману інформацію і надсилає сигнали до блока управління дроном для корегування його положення відносно посадкової зони. Показано результати досліджень при застосуванні різних діафрагм для світлодіодів та фотоприймальних пристроїв. Вибрано найкращий варіант конструкції блоків та отримано оцінку похибок вимірювання координат дронів.

Ключові слова: оптичний датчик, вимірювання координат, навігація безпілотної, позиціонування на основі бачення, злиття даних, багатопроменева техніка, кодовані промені.

УДК 519.876.5

[0000-0003-1741-9329] Д. В. Тичков,

e-mail: dmytro.tychkov@gmail.com

[0000-0002-5927-0326]

М. О. Бондаренко, д-р техн. наук, професор
Черкаський державний технологічний університет МОН України
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАТИЧНИХ ТА КВАЗИСТАТИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НАДМАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ПІД ПОЛІЕЛЕКТРОДНИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ ДАВАЧЕМ

У статті наводяться результати математичного моделювання статичних та квазі-статичних електричних полів надмалої потужності, яке проводиться шляхом розв'язання системи аналітичних рівнянь, що базуються на диференціальних рівняннях Лапласа. Особливістю цієї моделі є те, що в ній враховується динаміка зміни електричного поля та його розмірів у процесі сканування останнього поліелектродним циліндричним давачем, а також вплив зовнішніх кліматичних факторів (температури, відносної вологості) та електромеханічний вплив з боку досліджуваної поверхні. На основі проведеного аналітичного моделювання складено комп'ютерну модель, в основу якої покладено метод скінченних елементів, а програмне забезпечення моделі створено на об'єктно-орієнтованій мові програмування Python 3.10. Розроблена модель дозволяє з високою точністю (розбіжність між даними математичної та аналітичної моделей не більша 2,15 %, а з експериментально отриманими даними – не перевищує 7,15 %), а також у режимі реального часу будувати графіки розподілу напруженості електричного поля та електричного заряду, а також визначати діапазони параметрів цих полів, дотримання яких не призводить до електричного пробою.

Ключові слова: математична модель, аналітичне рівняння, поліелектродний циліндричний давач, електричне поле, напруженість, електричний заряд.

Вступ. Перспективи застосування мікроелектронних технологій, що набули значного розвитку останнім часом, пов'язані з перевагами сучасних схемотехнічних рішень, які реалізуються з використанням таких технологій: високі технологічність, продуктивність, екологічність та економічність, а також можливість інтегрування з іншими спорідненими технологіями точного приладобудування та мікросхемотехніки [1]. Проте, незважаючи на усі переваги вищезазначених технологій, а також виробів, що виготовляються за їх допомогою, основною перешкодою до подальшого удосконалення таких виробів є зменшення їх масово-габаритних характеристик.

Наслідками такого зменшення габаритів електронних схем та пристроїв на їх основі разом із застосуванням специфічних матеріалів (сегнето-, п'єзоелектриків, електретів, метаматеріалів тощо) і під впливом зовнішніх кліматичних (температура, вологість) та електромеханічних чинників є виникнення та накопичення в матеріалах цих пристроїв електричних зарядів і полів, створених ними [2]. Ці електричні поля, з одного боку, є необхідним

фізичним явищем, що має місце для будь-яких електричних пристроїв, і полягають у забезпеченні основних їх функцій (електричної ємності, елементів оперативної пам'яті тощо), проте, з другого боку, можуть мати негативні впливи як на елементи таких пристроїв, так і на елементи, які взаємодіють з такими електронними пристроями ззовні, наприклад, електростатичне притягання мікрочастинок атмосферної вологості та пилу, в результаті чого зменшуються якість та швидкість передавання електричного сигналу (особливо високочастотного), охолоджувальна та електропровідна здатність компонентів схем, а також виникає можливість електростатичного пробою, що спричиняє електромеханічне руйнування електронних мікроелементів і введення їх, як наслідок, з ладу [3].

При цьому залучення існуючих методів та засобів вимірювання електричних полів надмалої потужності, які мають місце на поверхнях пристроїв мікроелектроніки, обмежене відсутністю належного математичного апарату, що дозволило б з достатньою точністю, швидкістю та надійністю визначати ос-

новні силові й енергетичні характеристики досліджуваних електричних полів.

Тому питання аналітичного та комп'ютерного моделювання статичних і квазістатичних електричних полів надмалої потужності на поверхнях матеріалів різної провідності пристроїв мікроелектроніки під поліелектродним циліндричним давачем з високою точністю та швидкодією, а також можливістю інтегрування такого математично-програмного забезпечення в апаратну базу інформаційно-вимірювального устаткування є актуальним.

Аналіз наявних досліджень. Дослідженнями електричних полів для визначення їх характеристик в електронних пристроях займається ряд провідних вітчизняних та закордонних вчених, як-то: С. В. Бірюков, В. В. Довгуша, Є. П. Д'яков, О. В. Маслєєва, Н. А. Шавріна, Дж. П. Бут, Л. Ценгель, Ф. Олендорф, Т. Він та інші [4-7]. Проте, незважаючи на наукові здобутки цих вчених, невирішеним досі залишається важливе питання моделювання електричних полів надмалої потужності, що виникають на поверхнях мікроелектронних пристроїв з метою встановлення граничних значень цих характеристик, перевищення яких призводить до виникнення електричного пробою.

Ще одна причина необхідності моделювання електричних полів надмалої потужності на поверхнях пристроїв мікроелектроніки під давачами електричного поля полягає у можливості застосування останніх не лише за нормальних умов, але й в екстремальних кліматичних умовах, природа впливу яких на електричні поля досі не вивчена.

У той же час з низки наукових праць відомо [8-10], що одним із найбільш ефективних типів давачів є поліелектродні давачі циліндричної форми, що дозволяють визначати як стаціонарні, так і квазістаціонарні електричні поля та проводити їх математичне моделювання в полярній системі координат.

Проте, за даними аналізу наукової літератури та Інтернет-джерел, авторами зроблено висновок про відсутність моделей, що дозволяють досліджувати електричні поля надмалої потужності, сформовані на поверхнях фрагментів пристроїв мікроелектроніки під поліелектродним циліндричним давачем.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є проведення аналітичного та комп'ютерного моделювання статичних і ква-

зістатичних електричних полів надмалої потужності на поверхнях матеріалів різної провідності під поліелектродним циліндричним давачем.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішувалися такі завдання:

- встановлення основних параметрів і факторів при дослідженні електричних полів надмалої потужності;

- постановка і аналітичний розв'язок задачі на визначення розподілу електричної напруженості та електричних зарядів у просторі та на поверхні матеріалів;

- дослідження результатів моделювання електричних полів надмалої потужності на поверхнях матеріалів різної провідності під поліелектродним циліндричним давачем.

Виклад основного матеріалу

Аналітичне моделювання розподілу електричних полів у просторі та на діелектричних поверхнях

При розрахунку розподілу електричного поля по досліджуваній пласкій поверхні остання розглядається як напівобмежене середовище (висота формування електричного поля над поверхнею набагато менша за товщину та розміри поверхні зразка) при тому, що зразки можуть мати довільну форму. При цьому вважаємо, що сканування простору або заданої ділянки поверхні відбувається з використанням давача, запропонованого автором конструкції.

Схематична конструкція такого давача, що являє собою поліелектродний циліндричний давач з радіально розташованими електродами, кількість яких варіюється від 6 до 12, наведена на рисунку 1.

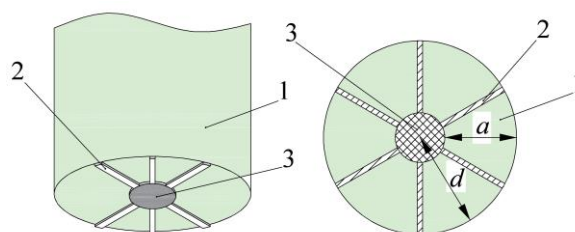


Рисунок 1. Схематичне зображення поліелектродного циліндричного давача з радіально розташованими електродами:

- 1 – діелектрична циліндрична основа;
- 2 – металеві електроди (Au999);
- 3 – осереддя-ізолятор давача;
- a – довжина електрода,
- d – діаметр перетину торця давача

Особливість розробленої математичної моделі електричних полів полягає в урахуванні цієї моделлю впливу зовнішніх факторів на формування та зміну розподілу електричних потенціалів цих полів. Як такі зовнішні фактори обрано температуру (T) і відносну вологу (φ) навколишнього середовища, а також коефіцієнт електромеханічного впливу (K_{em}), притаманний значній номенклатурі діелектричних матеріалів (сегнето-, п'єзоелектрики), що використовуються в елементній базі мікроелектроніки.

Ці фактори є незалежними один від одного, проте вплив, який вони справляють на електропровідність середовища, може бути описаний таким рівнянням [11]: $\sigma = enu_n + epu_p$, де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний заряд; n, p – відповідно, концентрації носіїв заряду (n – електронів, p – дірок (для напівпровідникових матеріалів)); u_n та u_p – відповідно, рухливість носіїв заряду (електронів: $u_n \approx T^{-3/2}$ та дірок: $u_p \approx T^{3/2}$).

Тому електропровідність досліджуваного середовища залежно від:

- температури навколишнього середовища (T):

$$\sigma_T = \frac{e(n+p)}{\sqrt{T^3}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{W_0}{kT}\right),$$

де σ_0 – базова електропровідність середовища за нормальних умов ($T = 273$ К); W_0 – робота виходу заряджених частинок з поверхонь матеріалів (для випадку напівпровідника – ширина забороненої зони); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;

- відносної вологості навколишнього середовища (φ):

$$\sigma_\varphi = \sigma_0 \exp\left(-\frac{1}{1-\varphi}\right);$$

- електромеханічного впливу (K_{em}):

$$\sigma_K = K_{em} \sqrt{\frac{4,9 \cdot C_{11}}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}} = \sigma_0 \cdot K_{es} \cdot K_{em},$$

де K_{em} – коефіцієнт електромеханічного впливу; K_{es} – коефіцієнт пружної жорсткості: $K_{es} = \sqrt{4,9 \cdot C_{11}}$, C_{11} – пружна жорсткість матеріалу при постійному електричному полі; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Н·м² – діелектрична стала; ε_r – діелектрична проникність механічно вільного зразка.

Узагальнений коефіцієнт електропровідності середовища від впливу зовнішніх факторів, описаних вище, може бути представлений таким чином:

$$\sigma' = 3\sigma_0 \left[e^{-\frac{kT(\varphi-1)}{kT-W_0(\varphi-1)}} + K_{es} \cdot K_{em} \right].$$

Розглянемо тривимірний випадок у циліндричній системі координат. При цьому циліндричні координати r, α та z пов'язані з декартовими співвідношеннями $x = r \cos \alpha$, $y = r \sin \alpha$, $z = z$.

Функція $u(x, y, z)$ перетворюється на функцію $u(r \cos \alpha, r \sin \alpha, z)$. Тут третя змінна z залишається незмінною, а у вираз з визначення двовимірного оператора Лапласа в полярних координатах додається лише друга похідна по z [12]:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Ця функція задовольняє рівнянню Лапласа, тому вона є гармонійною. У кожній задачі, пов'язаній з рівнянням Лапласа, шуканий розв'язок виділяється з багатьох гармонійних функцій певною додатковою умовою, яка найчастіше є крайовою.

Отже, рівняння Лапласа має вигляд [13]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} = 0, \quad (1')$$

де враховано, що $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$, через циліндричну симетрію поля.

Вирішимо рівняння Лапласа методом Фур'є (поділу змінних), який полягає в тому, що спочатку знаходиться розв'язок рівняння (1') у вигляді [14]

$$u(r, \alpha) = R(r) \Phi(\alpha), \quad (2)$$

де невідомі функції $R(r)$ і $\Phi(\alpha)$ залежать кожна лише від однієї змінної (r або α).

Підставляючи рівняння (2) в рівняння Лапласа (1'), знаходимо

$$\frac{\Phi}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) + \frac{R}{r^2} \frac{d^2 \Phi}{d\alpha^2} = 0. \quad (3)$$

Множенням обох частин цього рівняння на $r^2/R\Phi$ отримуємо

$$\frac{r}{R} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) = -\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\alpha^2}. \quad (4)$$

Ліва та права частини рівняння (4) залежать від різних незалежних змінних. Отже, рівність може бути дотримана лише в тому випадку, коли її ліва та права частини дорівнюють окремо тій самій сталій величині.

Тому вважаємо, що:

$$\frac{r}{R} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) = n^2, \quad \frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\alpha^2} = -n^2, \quad (5)$$

де n^2 – деяка стала величина.

Розв'язок рівняння для Φ є очевидним:

$$\Phi = \begin{cases} B_1 \alpha + B_2 & \text{при } n = 0 \\ A_1 \sin n\alpha + A_2 \cos n\alpha & \text{при } n \neq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Розв'язок рівняння для R шукаємо у вигляді $R = Ar^\beta$ ($\beta \neq 0$). Підставляючи цей вираз у перше з рівнянь (5), отримуємо рівність

$$\beta^2 = n^2, \quad (7)$$

з якої випливає, що $\beta = \pm n$. При $n = 0$ перше з рівнянь (5) спрощується до вигляду:

$r \frac{dR}{dr} = \text{const}$, розв'язок якого може бути представлений функцією $R = D_1 \ln r + D_2$.

Отже, остаточний розв'язок рівняння (5) може бути представлено у вигляді системи

$$R = \begin{cases} D_1 \ln r + D_2 & \text{при } n = 0 \\ C_1 r^n + C_2 r^{-n} & \text{при } n \neq 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Знаходимо розв'язок задачі (2) за умови, що u не залежить від r , тобто при $n = 0$, підставивши в систему (8), отримаємо: $D_1 = 0$. Тоді з системи (6) отримаємо $u(\alpha) = B_1 \alpha + B_2$. Граничні умови для u мають вигляд: $u(0) = 0$, $u(\alpha_0) = U_0$, тобто $0 = B_2$, $U_0 = B_1 \alpha_0$. Отже, $u(\alpha) = U_0 \alpha / \alpha_0$.

Остаточно напруженість статичного електричного поля дорівнює

$$E_\alpha = -\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \alpha} = -\frac{U_0}{r \alpha_0}. \quad (9)$$

В той же час у випадку квазістатичних електричних полів (врахувавши, що швидкість зміни потенціалу такого поля $v \neq 0$), видозмінивши рівняння (1) та (1') таким чином:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \alpha}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2}, \quad (10')$$

де v – швидкість зміни електричного поля, $v = \Delta u / \Delta t$; і розв'язуючи це рівняння у послідовності аналогічно як для стаціонарних полів (див. рівняння (2)-(8)) та врахувавши узагальнений коефіцієнт електропровідності середовища від впливу зовнішніх факторів σ' , отримаємо рівняння для напруженості квазістаціонарного електричного поля:

$$E_\alpha = -\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{u^2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{k}{\varepsilon} \sigma' = \frac{U_0}{r \alpha_0} (v-1) + \frac{k}{\varepsilon} \sigma', \quad (11)$$

де $k = 9 \cdot 10^9$ м/Ф – електростатична стала; ε – діелектрична проникність середовища.

Далі розглядатимемо розрахунки основних силових та енергетичних характеристик електричних полів, виходячи з того, що маємо справу саме з квазістаціонарними електричними полями (для випадку стаціонарних полів будемо враховувати в цих рівняннях, що $v = 0$).

Поверхнева густина зарядів на пластинах:

$$\sigma = \pm \varepsilon_0 E_\alpha (1 \pm v) + \sigma' = \mp \frac{\varepsilon_0 U_0}{r \alpha_0} (1 \mp v) + \sigma'. \quad (12)$$

Заряд на кожному з електродів (за модулем), розподіленому по довжині L , виражається формулою

$$Q = L \left(\int_a^b \sigma (1+v) dr + \sigma' \right) = \frac{L \cdot \varepsilon_0 \cdot U_0}{\alpha_0} \cdot (1+v) \cdot \ln \frac{b}{a} + L \cdot \sigma'. \quad (13)$$

Розроблення комп'ютерної моделі визначення електричних полів надмалої потужності під впливом зовнішніх факторів

Для розв'язку поставленої математичної задачі (визначення розрахункових значень силових та енергетичних характеристик електричних полів) було написано спеціалізований програмний продукт на інтерпретованій об'єктно-орієнтованій мові програмування Python 3.10, який може бути легко інтегрований в апаратні засоби інформаційно-вимірювальної системи. Бібліотеки цієї мови містять спеціалізовані інструменти для математичних розрахунків, за допомогою яких можна ефективно та з високою точністю проводити моделювання різноманітних процесів та явищ, зокрема в електростатиці та електродинаміці [15].

За допомогою цієї програми було проведено моделювання відповідно до складеної вище математичної моделі для розрахунку параметрів статичних і квазістатичних електричних полів (рисунк 2).

```

1 #py-script
2 import math
3 import numpy as np
4 from math import *
5 from fractions import Fraction
6 from decimal import Decimal
7 import matplotlib.pyplot as plt
8 import csv
9 import numpy
10 from numpy import array
11
12 #py-script
13 #
14 e0 = 8.85*(10**-12) #Діелектрична проникність зразка
15 e = 7 #Діелектрична проникність зразка
16 eair = 1.00005 #Діелектрична проникність середовища
17 C11 = 8*(10**10) #Пружна жорсткість матеріалу
18 Kes = sqrt(4.9 * C11) # Kes
19 Kem = 0.095 #Коефіцієнт електромеханічного впливу
20 T = 293 #Температура оточуючого середовища
21 fi = 0.6 #Вологість оточуючого середовища
22 k = 1.38*(10**-23) #Стала Больцмана
23 u0 = 1.12*(1.6*(10**-19)) #Робота виходу заряджених частинок з поверхонь матеріалів:
24 d0=10**-20 #Базова електропровідність середовища за нормальних умов:
25
26 #Електростатична стала
27 kes=9*(10**9)
28
29 #Електростатична стала
30 #
31
32 ##Sigma1 o1 Узагальнений коефіцієнт електропровідності середовища від впливу зовнішніх
33 math1 = (k*T*(fi-1))
34 math2 = (k*T*-u0*(fi-1))
35 e = exp(math1/math2)
36 d1 = 3*d0*(e+Kes*Kem)
37 ##Sigma1 o1
38
39 print("d1",d1)

```

Рисунок 2. Фрагмент лістингу та результатів розрахунку математичної задачі на об'єктно-орієнтованій мові програмування Python 3.10

Алгоритм розрахунку математичної моделі в Python 3.10 зображено на рисунку 3, послідовність якого полягає в наступному.

1) Обираються вихідні параметри вимірювальної системи (кількість електродів, габарити давача, початкові енергетичні параметри системи – залишковий поверхневий потенціал, швидкість зміни електричного поля в просторі та часі) та встановлюються сталі величини (діелектричні сталі, електричні та механічні характеристики матеріалів і середовищ досліджуваних поверхонь).

2) Проводиться розрахунок розподілу напруженості однорідного електричного поля під давачем та між його електродами.

3) Проводиться розрахунок заряду (за модулем) під давачем між кожним з його електродів по довжині.

4) Проводиться корекція розподілу заряду під давачем (шляхом перерахунку розподілу цих зарядів із циліндричних в декартові координати).

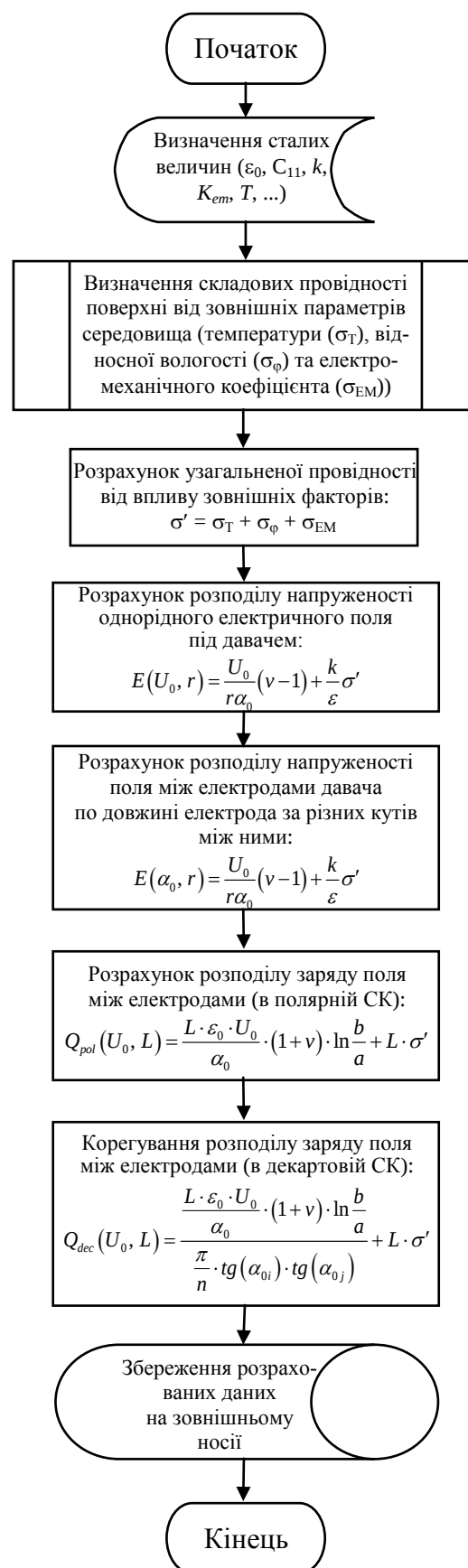


Рисунок 3. Алгоритм розрахунку математичної моделі динамічних та квазістатичних електричних полів надмалої потужності

5) Здійснюється розрахунок поверхневої електричної ємності під давачем.

6) Встановлюється градувальна характеристика поліелектродного циліндричного давача з радіальними електродами.

7) Створюється геометрична модель поверхні досліджуваного зразка з відповідними розмірами поверхневих елементів і структур, а також давача.

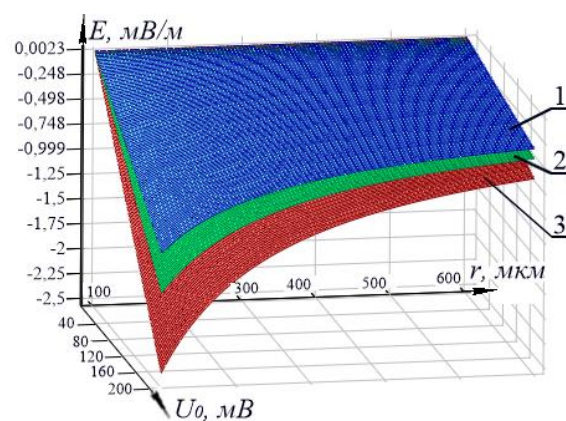
8) Проводиться розбиття об'єкта на кінцеві елементи, враховуючи необхідну точність розрахунку.

9) Наводяться результати розв'язання математичної задачі. Перед початком розрахунку необхідно врахувати час проведення одного циклу вимірювання (залежно від висоти простору над досліджуваним зразком). Час обирається в діапазоні від 0 до 1 с, з інтервалом 40 мс. Також необхідно вказати відносну точність визначення параметрів електричного поля, яка становить 2,5 %.

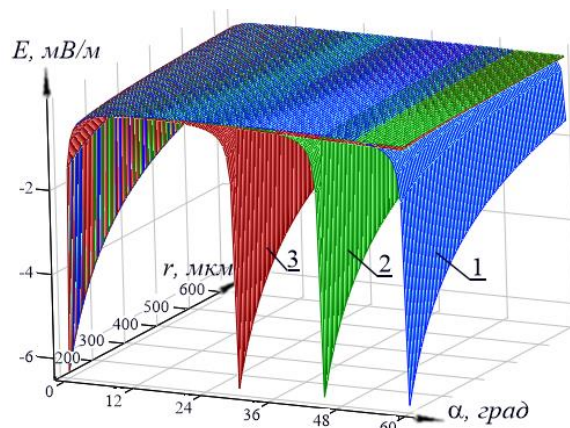
Результати досліджень. За результатами роботи розробленої програми було проаналізовано розподіл електричних полів на поверхнях різноманітних виробів мікроелектроніки, отриманий аналітично та в результаті комп'ютерного моделювання.

Результати аналізу зображені у вигляді графіків залежностей напруженості електричного поля (рисунок 4) та електричного заряду (рисунок 5) по висоті від досліджуваної поверхні, побудованих за аналітичними формулами (11), (13) та за допомогою розробленої програми.

Обговорення результатів. Як можна побачити з графіка залежності напруженості електричного поля E від поверхневого потенціалу U_0 за різних кутів α між електродами давача, що проводить вимірювання на кремнієвій пластині з рівномірно розподіленим по її поверхні електричним зарядом (рисунок 4, а), збільшення поверхневого потенціалу з одночасним зменшенням відстані від місця визначення напруженості до центра вимірювального давача (вздовж вимірювального електроду) веде до гіперболічного збільшення напруженості електричного поля (при цьому знак вектора напруженості вказує на те, що поверхневий заряд досліджуваної поверхні є меншим за значенням, аніж заряд на електродах самого давача).



а)



б)

Рисунок 4. Графіки залежності напруженості поля від поверхневого потенціалу по довжині електроду за різних кутів між електродами (а) та між електродами давача по довжині електроду за різних кутів між ними (б), отримані моделюванням у розробленому програмному продукті та аналітично (●); виріб – фрагмент кремнієвої пластини з рівномірно розподіленим по її поверхні електричним зарядом, 1 – $\alpha = 60$ град ($n = 6$), 2 – $\alpha = 45$ град ($n = 8$), 3 – $\alpha = 30$ град ($n = 12$)

Таке різке зростання (за модулем) напруженості електричного поля пов'язане, на думку автора, з радіальним розташуванням електродів давача, коли відстань між ними зменшується у міру наближення до центру давача. В той же час, розглянувши графік залежності напруженості поля E від поверхневого потенціалу U_0 , яка виникає між окремими електродами давача (рисунок 4, б), можна спостерігати рівномірний розподіл напруженості (що відповідає рівномірно розподіленому по поверхні заряду).

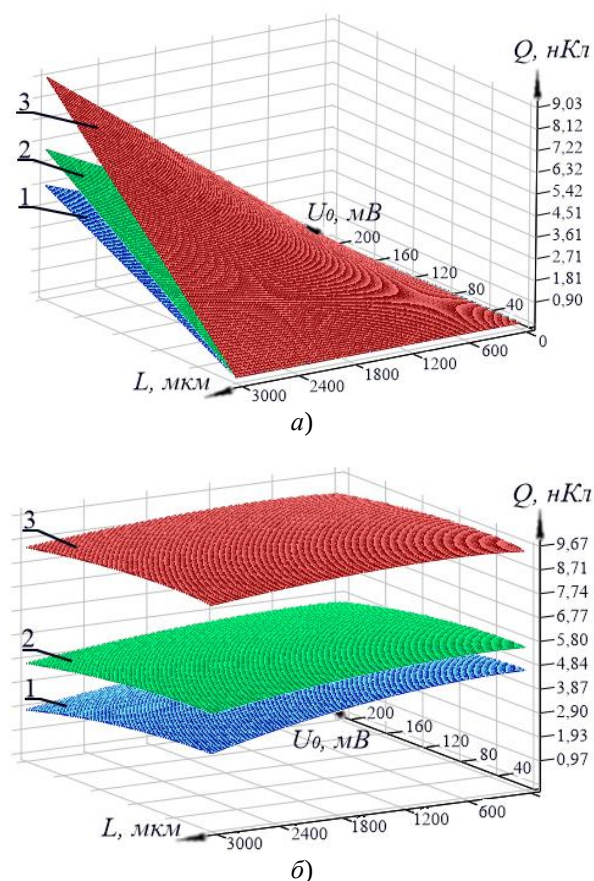


Рисунок 5. Отримані математичним моделюванням (а) та скореговані (б) залежності розподілу заряду поля від поверхневого потенціалу по висоті електрода за різних кутів між електродами: отримані моделюванням у розробленому програмному продукті та аналітично (•); виріб – фрагмент кремнієвої пластини з рівномірно розподіленим по її поверхні електричним зарядом, 1 – $\alpha = 60$ град ($n = 6$), 2 – $\alpha = 45$ град ($n = 8$), 3 – $\alpha = 30$ град ($n = 12$)

Як можна побачити з графіка залежності розподілу заряду поля від поверхневого потенціалу по висоті електрода за різних кутів α між електродами давача, що проводить вимірювання на кремнієвій пластині з рівномірно розподіленим по її поверхні електричним зарядом (рисунок 5, а), збільшення поверхневого потенціалу з одночасним збільшенням відстані від досліджуваної поверхні до робочої поверхні вимірювального давача веде до майже лінійного збільшення електричного заряду. Таке зростання пов'язане з формою розподілу вектора електричної напруженості (див. рисунок 4): при збільшенні чисельного значення цього вектора (за модулем) залежно від відстані до досліджуваної поверхні збільшується і заряд, який визначається в цій точці поля. В той же час, розглянувши графік залеж-

ності розподілу заряду поля від поверхневого потенціалу по висоті електрода в декартовій системі координат (рисунок 5, б), можна спостерігати більш рівномірний розподіл заряду поля від поверхневого потенціалу по висоті електродів за різних кутів між ними.

Таким чином, із залученням мови програмування Python 3.10 розроблено динамічну комп'ютерну програму визначення електричних полів надмалої потужності під впливом зовнішніх факторів, яка дозволяє з високою точністю (розбіжність між результатами математичного моделювання й експериментально отриманими даними становить 2,2-7,15 %) та в режимі реального часу візуалізувати розподіл електричного поля, а також визначати діапазони силових та енергетичних параметрів такого поля, дотримання яких не призводить до електричного пробоя.

Висновки. Проведене аналітичне моделювання статичних та квазістатичних електричних полів надмалої потужності ґрунтується на розв'язанні системи аналітичних рівнянь, в основі яких лежать диференціальні рівняння Лапласа, що враховують динаміку зміни електричного поля та їх розмірів під поліелектродним циліндричним давачем, а також вплив зовнішніх факторів (температури, відносної вологості, електромеханічного впливу на та з боку поверхні).

Із залученням спеціально розробленого програмного забезпечення на об'єктно-орієнтованій мові програмування Python 3.10 розроблено динамічну комп'ютерну модель визначення електричних полів надмалої потужності під впливом зовнішніх факторів в просторі та з часом. Така модель дозволяє з високою точністю (розбіжність між даними, отриманими в результаті математичного моделювання, та експериментально отриманими даними не перевищує 7,15 %) та в режимі реального часу візуалізувати розподіл електричного поля, а також визначати діапазони силових (напруженості електричного поля) та енергетичних (розподілу поверхневого заряду) параметрів такого поля, дотримання яких не призводить до електричного пробоя.

Наукова новизна: в результаті проведеного моделювання вперше отримані математичні закономірності впливу змін параметрів статичних та квазістатичних електричних полів (швидкості зміни форми та положення таких полів у часі та просторі) та змін зовнішніх факторів (температури, відносної вологості,

електромеханічного впливу) на силові й енергетичні характеристики електричних полів мікроелектронних пристроїв, що дозволяє з високою точністю та адекватністю визначати критичні значення цих параметрів, перевищення яких призводить до електричного пробою та руйнування компонентів таких мікроелектронних пристроїв.

Практична значущість можливостей розробленої моделі, а також програмного засобу для її реалізації полягає в експериментально підтверджених результатах розрахунку основних силових і енергетичних параметрів електричного поля, що підтверджують високу точність та оперативність такого моделювання, а використання сучасної мови програмування Python 3.10 дозволяє гнучко інтегрувати таке програмне забезпечення в апаратну частину інформаційно-вимірювальної системи.

У подальших дослідженнях планується змоделювати та дослідити процес виникнення та просторово-часових змін динамічних електричних полів над поверхнями різної електропровідності під поліелектродним циліндричним давачем.

Список використаних джерел

- [1] A. Keshari, J. Rao, and A. Sree Rama Murthy, "Design and development of instrumentation for the measurement of sensor array responses", *Review of Scientific Instruments*, no. 91, p. 024101, 2020. doi: 10.1063/1.5128967.
- [2] D. Galler, and G. Slenski, "Causes of aircraft electrical failures", *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 3, p. 8, 1991. doi: 10.1109/62.90949.
- [3] Douglas C. Smith, "Destroying electronic components from across the room with ESD", *In Compliance*, 2022. [Online]. Available: <https://incompliancemag.com/article/destroying-electronic-components-from-across-the-room-with-esd/>
- [4] X. H. Francis, and R. J. Palisano, *The Application of Electric Fields in Biology and Medicine, Electric Field*. Mohsen Sheikholeslami Kandelousi, IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.71683.
- [5] P. E. Secker, and J. N. Chubb, "Instrumentation for electrostatic measurements", *J. Electrostatics*, vol. 16, pp. 1-19, 1984. doi: 10.1016/0304-3886(84)90015-9.
- [6] W. Liqiu, D. Yongjie, and Yu. Daren, *Application of an Electric Field to Low-Frequency Oscillation Control in Hall Thrusters, Electric Field*. Mohsen Sheikholeslami Kandelousi, IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.71009.
- [7] Z. Yan, J. X. Li, Z. Y. Dong, and Y. Zhu, "Prediction and improvement of the electric field distribution in high voltage AC substations", *Electric Power Systems Research*, vol. 11, iss. 2, pp. 153-159, 1986.
- [8] В. М. Шарапов, І. Г. Мінаєв, К. В. Базіло та ін., *Ємнісні датчики*. Черкаси, Україна: Брама-Україна, 2010.
- [9] O. Larsson, *Polyelectrolyte-Based Capacitors and Transistors*. Norrköping, Sweden, 2011.
- [10] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*. London, UK: Wiley-IEEE Press, 1996.
- [11] В. М. Кириленко, К. В. Кириленко, та В. М. Головка, *Електротехнічні матеріали. Частина 1. Діелектричні матеріали*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2021.
- [12] J. J. Eun, P. Sucheol, and S. Ch. Won, "Electrostatics with reflection symmetry and exact solution of the Dunkl-Laplace equation in cylindrical coordinates", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 68, iss. 3, pp. 379-382, 2016. doi: 10.3938/jkps.68.379.
- [13] A. L. Pérez-Martínez, M. d. P. Aguilar-Del-Valle, and A. Rodríguez-Gomez, "Do it by yourself: An instructional derivation of the Laplacian operator in spherical polar coordinates", *Mathematics*, no. 9, pp. 2943-2975, 2021. doi: 10.3390/math9222943.
- [14] D. S. Shamshirgar, R. Yokota, A.-K. Tornberg, and B. Hess, "Regularizing the fast multipole method for use in molecular simulation", *The Journal of Chemical Physics*, vol. 151 (23), p. 234113, 2019. doi: 10.1063/1.5122859.
- [15] R. Harrison, R. Mohan, R. Gorham, C. Kieslich, and D. Morikis, "AESOP: A Python library for investigating electrostatics in protein interactions", *Biophysical Journal*, vol. 112, iss. 9, pp. 1761-1766, 2017.

References

- [1] A. Keshari, J. Rao, and A. Sree Rama Murthy, "Design and development of instrumentation for the measurement of sensor array responses", *Review of Scientific Instruments*, no. 91, p. 024101, 2020. doi: 10.1063/1.5128967.
- [2] D. Galler, and G. Slenski, "Causes of aircraft electrical failures", *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 3, p. 8, 1991. doi: 10.1109/62.90949.
- [3] Douglas C. Smith, "Destroying electronic components from across the room with ESD", *In Compliance*, 2022. [Online]. Available: <https://incompliancemag.com/article/destroying-electronic-components-from-across-the-room-with-esd/>
- [4] X. H. Francis, and R. J. Palisano, *The Application of Electric Fields in Biology and Medicine, Electric Field*. Mohsen Sheikholeslami Kandelousi, IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.71683.
- [5] P. E. Secker, and J. N. Chubb, "Instrumentation for electrostatic measurements", *J. Electrostatics*, vol. 16, pp. 1-19, 1984. doi: 10.1016/0304-3886(84)90015-9.
- [6] W. Liqiu, D. Yongjie, and Yu. Daren, *Application of an Electric Field to Low-Frequency Oscillation Control in Hall Thrusters, Electric Field*. Mohsen Sheikholeslami Kandelousi, IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.71009.
- [7] Z. Yan, J. X. Li, Z. Y. Dong, and Y. Zhu, "Prediction and improvement of the electric field distribution in high voltage AC substations", *Electric Power Systems Research*, vol. 11, iss. 2, pp. 153-159, 1986.
- [8] V. M. Sharapov, I. H. Minaiev, K. V. Bazilo et al., *Capacitive sensors*. Cherkasy, Ukraine: Brama-Ukraina, 2010 [in Ukrainian].
- [9] O. Larsson, *Polyelectrolyte-Based Capacitors and Transistors*. Norrköping, Sweden, 2011.
- [10] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*. London, UK: Wiley-IEEE Press, 1996.
- [11] V. M. Kyrylenko, K. V. Kyrylenko, and V. M. Holovko, *Electrical materials. Part 1. Dielectric materials*. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI im. Ihoria Sikorskoho", 2021 [in Ukrainian].
- [12] J. J. Eun, P. Sucheol, and S. Ch. Won, "Electrostatics with reflection symmetry and exact solution of the Dunkl-Laplace equation in cylindrical coordinates", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 68, iss. 3, pp. 379-382, 2016. doi: 10.3938/jkps.68.379.
- [13] A. L. Pérez-Martínez, M. d. P. Aguilar-Del-Valle, and A. Rodríguez-Gomez, "Do it by yourself: An instructional derivation of the Laplacian operator in spherical polar coordinates", *Mathematics*, no. 9, pp. 2943-2975, 2021. doi: 10.3390/math9222943.
- [14] D. S. Shamshirgar, R. Yokota, A.-K. Tornberg, and B. Hess, "Regularizing the fast multipole method for use in molecular simulation", *The Journal of Chemical Physics*, vol. 151 (23), p. 234113, 2019. doi: 10.1063/1.5122859.
- [15] R. Harrison, R. Mohan, R. Gorham, C. Kieslich, and D. Morikis, "AESOP: A Python library for investigating electrostatics in protein interactions", *Biophysical Journal*, vol. 112, iss. 9, pp. 1761-1766, 2017.

D. V. Tychkov,

e-mail: dmytro.tychkov@gmail.com

M. O. Bondarenko, Dr. Sc., Professor

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF STATIC AND QUASI-STATIC ELECTRIC FIELDS OF ULTRA-LOW POWER UNDER A POLYELECTRODE CYLINDRICAL TRANSDUCER

The article has established that the simulation of static and quasi-static electric fields of ultra-low power on the surfaces of materials of different conductivity of microelectronic devices with the possibility of integration into the hardware base of the information and measurement equipment cre-

ated on the basis of such mathematical software modeling is an actual issue. Therefore, the main goal of this article is to carry out analytical and computer modeling of static and quasi-static electric fields of ultra-low power on the surfaces of materials of different conductivity under a polyelectrode cylindrical transducer. The results of mathematical modeling of static and quasi-static electric fields of ultra-low power, which is carried out by solving a system of analytical equations based on Laplace's differential equations, are presented. The peculiarity of this model is that it takes into account the dynamics of changes in the electric field and its dimensions in the process of scanning the latter by a polyelectrode cylindrical transducer, as well as the influence of external climatic (temperature, relative humidity) factors and electromechanical influence on the part of the investigated surface. On the basis of the performed analytical modeling, a computer model has been created based on the finite element method, and the model software has been created using the Python 3.10 object-oriented programming language. The developed model allows with high accuracy (the difference between the data of mathematical and analytical models does not exceed 2.15%, and with the experimentally obtained data - does not exceed 7.15%), as well as in real time, to build the distribution graphs of the intensity of electric field and electric charge, as well as to determine the parameter ranges of these fields, compliance with which does not lead to an electric breakdown. The scientific novelty of the article is that, for the first time, as a result of mathematical modeling, mathematical regularities of the influence of changes in the parameters of static and quasi-static electric fields of microelectronic devices (speed of changes in the shape and position of such fields in time and space), as well as changes in external factors on the power and energy characteristics of these fields are obtained. This makes it possible to determine with high accuracy and adequacy the critical values of such parameters, the excess of which leads to electrical breakdown and destruction of components of micro-electronic devices. The practical significance of the capabilities of the developed model, as well as the software tool for its implementation, lies in the experimentally confirmed results of calculating the main force and energy parameters of the electric field. In further research, it is planned to simulate and investigate the process of emergence and spatio-temporal changes of dynamic electric fields over surfaces of different electrical conductivity under a polyelectrode cylindrical transducer.

Keywords: mathematical model, analytical equation, polyelectrode cylindrical transducer, electric field, electric tension, electric charge.

УДК 62-868.8

[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

[0000-0001-7573-9289] **С. С. Яценко**, аспірантЧеркаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ВДОСКОНАЛЕНА КОНСТРУКЦІЯ ВІБРОПЛУГА З П'ЄЗОКЕРАМІЧНИМ АКТУАТОРОМ

Сфера сільського господарства є однією з найголовніших сфер життєдіяльності людини, оскільки завдання сільського господарства – забезпечувати населення продовольством, необхідним для його існування. На сьогоднішній час розвиток сільського господарства є одним із найефективніших способів подолання голоду в усьому світі. Однією з головних проблем сільського господарства є складність та ефективність обробки землі. Головним органом обробки ґрунту в сільському господарстві є плуг.

В роботі представлено і розглянуто основні проблеми та відмінності звичайних плугів від вібраційних. Одним із найбільш ефективних методів обробки ґрунту є використання вдосконаленого плуга з віброуючою частиною (віброплуга), використання якого дозволить зменшити силу тертя плужного відвалу з ґрунтом, що дасть можливість зменшити витрати палива та збільшити термін експлуатації сільгосптехніки.

Робота полягає в удосконаленні конструкції віброплуга на основі п'єзокерамічного актуатора, а також його комп'ютерної моделі, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, що дасть змогу збільшити частоту віброколивань та зменшити тертя з ґрунтом.

Запропонована вдосконалена комп'ютерна модель віброплуга на основі п'єзокерамічного актуатора, яка створена за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, дає змогу визначати та прогнозувати його основні механічні характеристики. В результаті проведених комп'ютерних моделювань визначено резонансну частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань віброплуга. Окрім цього, представлено експериментальні результати, в яких ультразвуковий випромінювач використовувався в режимі датчика.

Ключові слова: п'єзоелемент, автоматизація, зменшення тертя, віброплуг, моделювання, відвал, датчик.

Вступ. Сільське господарство є однією з найважливіших галузей, що забезпечує населення продовольчими товарами і сировиною для великої кількості галузей промисловості. Сільськогосподарські культури потрібні людині для харчування, годування тварин і одержання волокна (бавовни і сизалю). Тварин вирощують заради вовни, молока, м'яса чи органічних відходів (як палива). Однією з головних проблем сільського господарства є складність та ефективність обробки землі. Поява ресурсозберігаючих технологій змінила ставлення аграріїв до обробки полів: багато хто з них відмовляється від застосування плуга, не бажаючи порушувати природну структуру ґрунту, який утворюється роками. Проте значна частина сільгоспвиробників упевнена, що повністю уникати використання плуга

в жодному разі неможливо, оскільки він розпушує землю, допомагає боротися з бур'янами і покращує якість ґрунту в цілому [1, 2].

Основним знаряддям культивування ґрунту у сільському господарстві є плуг. Плуг має дві основні складові – це леміш та відвал.

Плужний відвал – одна з робочих частин плуга. Основним його завданням є зріз від стінки пласта ґрунту, кришення її і перевертання. Тобто багато в чому від якості відвалу залежить те, наскільки добре буде підготовлений ґрунт.

Леміш – це частина плуга, що підрізає шар землі, і саме по ньому зрізаний шар ґрунту піднімається і потрапляє на відвал.

Основними перевагами плуга є його простота у виготовленні та відносно невисока ціна.

Основним недоліком такого плуга є високий спротив (тертя), що виникає при оранці ґрунту, при цьому значно підвищуються енерговитрати.

На сьогоднішній день звичайним плугам існують такі альтернативи, як віброплуг. В роботі [3] експериментально встановлено, що при використанні вібрацій у плузі значно зменшується тертя ковзання з ґрунтом, що є основою складовою в загальній величині тягового опору. Зменшується також і залипання робочих органів. Ретельно представлено й експериментально доведено в роботі [4], що зменшується тертя між двома поверхнями тіл при впливі на них ультразвукових коливань.

У зв'язку з цим останнім часом з'явилося багато конструкцій плугів з вібруючими робочими органами.

На рисунку 1 зображено функціональну схему віброплуга.

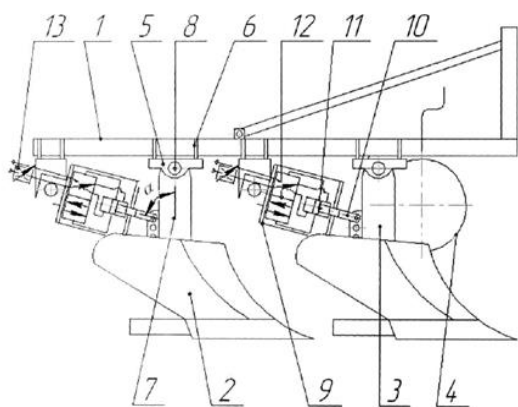


Рисунок 1. Функціональна схема вібропуга [5]

Вібропług складається з рами 1, корпусу 2, стійки корпусу 3, опорного колеса 4. Стійка кожного корпусу розрізана на дві частини, які шарнірно з'єднані між собою. Верхня частина стійки 5 приєднана хомутом 6 до рами плуга 1, нижня 7 з'єднана з нею шарніром 8. На рамі плуга 1 під змінним кутом закріплений вібратор 9, який штоком 10 з'єднаний з нижньою частиною стійки корпусу 7. Зміна амплітуди вібрації досягається зміною кута, який регулюється отворами в нижній частині стійки. Вібратор 9 складається з поршня 11, що виготовлений разом зі штоком 10, і золотника 12. Порожнина вібратора 9 під'єднана до гідросистеми трактора. Дроселем 13 забезпечується регулювання частоти коливань вібратора 9 [5].

Віброплуг працює наступним чином. Перед початком роботи дроселем 13 встановлюється частота коливань вібратора 9. Перестановкою штока вібратора 10 в змінні отвори нижньої частини стійки корпусу 7 встановлюються кут та амплітуда вібрації залежно від типу та стану ґрунту [5].

При оранці олива від гідросистеми трактора під тиском подається у нижню порожнину корпусу вібратора 9. В цей час верхня порожнина корпусу вібратора 9 сполучена зі зливом. Поршень 11 разом із золотником 12 переміститься вгору. Олива під тиском подається під золотник 12. Золотник 12 переміщується вгору відносно поршня 11, сполучає верхню порожнину корпусу вібратора 9 з напірною лінією, а нижню порожнину корпусу вібратора 9 зі зливом. Поршень 11 переміщується вниз. Верхня порожнина корпусу вібратора 9 сполучається зі зливом. Золотник 12 переміщується вниз і процес зворотно-поступального руху поршня 11 повторюється [5].

Вимушені коливання передаються нижній частині стійки 7 корпусу плуга 2 штоком 10, виготовленим разом із поршнем вібратора 11, відповідно до фаз деформації і руйнування ґрунту. Нижня частина стійки 7 повертається навколо шарніра 8, таким чином верхня частина стійки 5, а отже, і рама плуга 1 ізольовані від коливань [5].

Віброплуг дозволяє використати періодичні зміни сили опору ґрунту, що збільшує інтенсивність кришення ґрунту, а отже, поліпшується якість обробітку, і зменшується тяговий опір плуга – знижується енергомісткість процесу оранки ґрунту [5].

Ці вдосконалення також мають низку недоліків: збільшення ваги робочого органу, зменшення часу експлуатації вібраційного вузла, підвищення складності обслуговування та виготовлення виробу тощо.

В роботі [6] представлено розроблений вібропругу з застосуванням п'єзокерамічного актуатора (ПА). На відміну від інших вібропругів, його різновид з ПА має набагато менші розміри та вагу, високий коефіцієнт корисної дії, характеризується широким діапазоном керуючих частот збудження та створенням значних зусиль при вібраціях. Також у роботі [7] наводяться результати досліджень, які обґрунтовують наближене до оптимального розташування ПА на штатному плужному відвалі знаряддя ку-

льтивації на основі мультифізичного моделювання.

Модель віброплуга з використанням п'єзокерамічного актуатора наведено також в роботі [8]. Структурну схему віброплуга з п'єзокерамічним актуатором зображено на рисунку 2.

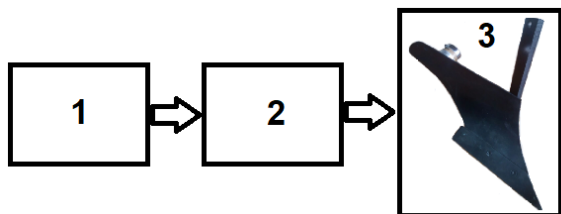


Рисунок 2. Структурна схема віброплуга з п'єзокерамічним актуатором:

- 1 – генератор змінної напруги;
- 2 – високовольний підсилювач;
- 3 – плуг з п'єзокерамічним актуатором

Недоліком цього віброплуга є низька частота коливань, а також при використанні ультразвукової системи на низьких частотах потрібно суттєво збільшувати габаритні розміри п'єзокерамічного актуатора.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення віброплуга за рахунок

використання ультразвукового п'єзокерамічного актуатора.

Моделювання плужного відвалу з ультразвуковим випромінювачем, а також перевірка теоретичних задач виконувались за допомогою програми COMSOL Multiphysics.

Для вдосконалення віброплуга з п'єзокерамічним актуатором необхідно виконати такі задачі: застосувати ультразвуковий п'єзокерамічний актуатор; створити віртуальну фізичну модель за допомогою програми COMSOL Multiphysics; визначити резонансні частоти ультразвукової системи; визначити максимальні коливання віброплуга на отриманих резонансних частотах.

Для отримання максимальних вібрацій на різних типах ґрунту запропоновано використовувати віброплуг у режимі віброколивань та у режимі датчика. Для цього необхідно виконати перевірку віброплуга в режимі датчика за рахунок використання прямого п'єзоефекту.

Виклад основного матеріалу. На рисунку 3 зображено досліджувану модель відвалу з ультразвуковим випромінювачем.

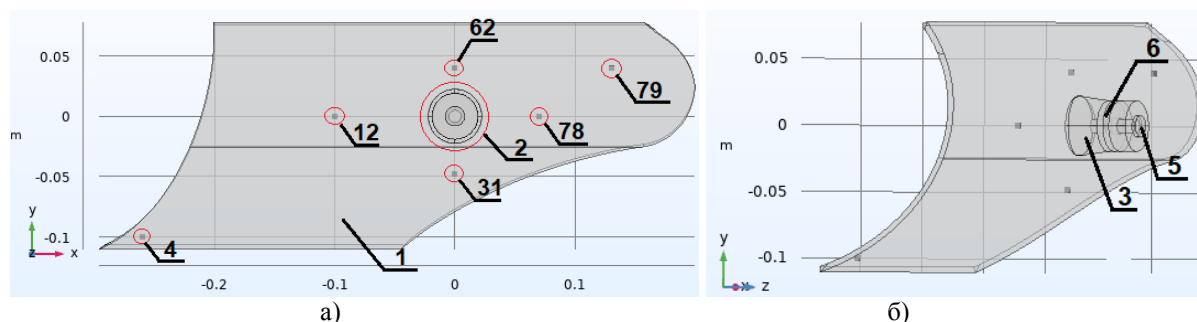


Рисунок 3. Модель віброплуга з ультразвуковим випромінювачем в COMSOL Multiphysics:

- а) вигляд збоку: 1 – плужний відвал; 2 – ультразвуковий випромінювач; 4, 12, 31, 62, 78, 79 – контрольні вимірювальні точки (нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics);
- б) загальний вигляд: 3 – випромінююча частина актуатора; 5 – стягуючий болт; 6 – п'єзокерамічні диски

Враховуючи технічні особливості п'єзоелектричних ультразвукових випромінювальних систем і всі складнощі, що виникають при їх виготовленні, оптимальним рішенням є використання чисельних методів розрахунку, що реалізуються спеціальними САПР [9]. Ультразвукова випромінювальна система (актуатор) за рахунок використання п'єзокераміки має змогу працювати в двох режимах, а саме: віброколивань та датчика [10, 11].

Для дослідження взаємодії випромінювача з плужним відвалом і впливу ультразвукових частот на відвал плуга було проведено чисельне моделювання процесу роботи з використанням пакета програм COMSOL Multiphysics. Інтерфейс програми COMSOL об'єднує функції моделювання модулів механіки твердого тіла COMSOL's Solid Mechanics і електростатики Electrostatics в один обчислювальний інструмент для моделювання п'єзоелектричних матеріалів.

Моделювання п'єзоелектричних пристроїв у COMSOL Multiphysics здійснюється за допомогою модуля Piezoelectric Effects. Оскільки функціонування п'єзокерамічного актуатора базується на зворотному п'єзоєфекті, в модулі Piezoelectric Effects вибирався режим Stress Charge Form [12, 13]. Для п'єзоелектричного елемента характерним є зв'язок між механічними деформаціями і електричним полем, який визначається матеріальними та конститутивними співвідношеннями [14-15]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho, \\ \nabla \cdot T &= 0, \\ T &= c_E S - e^T E, \\ D &= e S - \varepsilon_S E, \\ c_E &= S_E^{-1}, \\ e &= d S_E^{-1}, \\ \varepsilon_S &= \varepsilon_T - d S_E^{-1} d^T, \end{aligned} \quad (1)$$

де T – механічне напруження; S – деформація; E – напруженість електричного поля; D – зміщення електричного поля; c_E – матриця пружності (тензор 4-го рангу c_{ijkl}); e – матриця зв'язку (тензор 3-го рангу e_{ijk}); d – матриця п'єзomodулів (тензор 3-го рангу d_{imn}); ε_S – матриця діелектричних проникностей (тензор 2-го рангу ε_{ij}); ρ – густина вільного заряду; ε_T – діелектрична проникність п'єзоелектричного матеріалу.

Розміри ультразвукового п'єзоелектричного випромінювача: діаметр хвилеводу – максимум 55 мм, діаметр хвилеводу – мінімум 45 мм, довжина хвилеводу – 24 мм, товщина відбивача – 12 мм, діаметр п'єзоелементів – 45 мм, загальна довжина – 46 мм, резонансна частота – близько 40 кГц.

При моделюванні ультразвукової системи відвал-п'єзоактуатор електричний потенціал (Electric potential) 300 В прикладений до зовнішніх сторін п'єзоелементів, а загальний «мінус» (Ground) – до сторін п'єзоелементів, які з'єднані між собою. Поляризація п'єзоелектричних елементів є зустрічною.

Моделювання п'єзокерамічної пластини виконувалося за умови її виготовлення з матеріалу марки PZT-4. Для металевої частини досліджуваної системи, тобто плугового відвалу, для аналогічних цілей використовувався матеріал Structural Steel. Габаритні розміри та геометрія цього органу культивациі проілюстровано на рисунку 3.

Структурну схему роботи віброплуга в режимі вимірювальної системи зображено на рисунку 4.

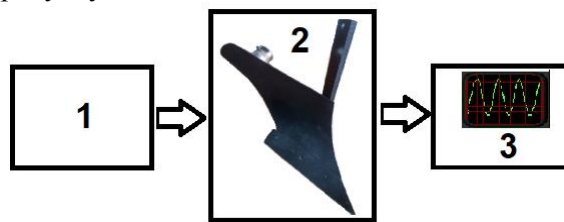


Рисунок 4. Структурна схема роботи віброплуга в режимі датчика:

1 – прикладна зовнішня сила;
2 – ультразвукова система в режимі датчика;
3 – цифровий осцилограф

Результати досліджень. Для мультифізичного кінцево-елементного математичного моделювання процесів, як і в [13], застосовувалися Лагранжові кінцеві елементи з елементарними базисними функціями другого порядку – Lagrange-Quadratic. Розрахункова сітка кінцевих елементів у пункті «Mesh» вибиралася ортогоналізованою з нормальним розміром елементів Finer.

Досліджувана тривимірна модель системи плужний відвал-п'єзоактуатор представлена сукупністю кінцевих елементів, отриманих в результаті побудови сітки з тетрагональним розбиттям. Відповідну CAD-модель системи проілюстровано на рисунку 5.

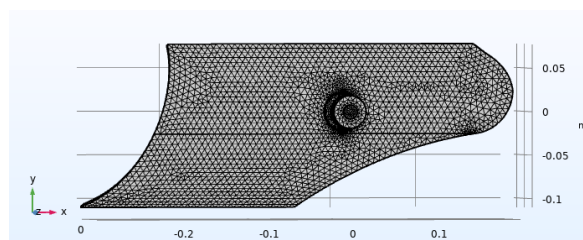


Рисунок 5. Відрізок Mesh сітки моделі відвалу з п'єзоактуатором для точності моделювання процесу

На рисунку 6 зображено амплітудно-частотну характеристику системи плужний відвал-п'єзоактуатор.

З рисунка 6 видно, що максимальні амплітуди коливань відвалу плуга відповідають частотам 38.6 кГц, 38.9 кГц та 39.5 кГц, 40 кГц, 41.3 кГц, 41.7 кГц. Слід зауважити, що значення амплітуди коливань мають як додатні, так і від'ємні значення, що відповідають коливанням плужного відвалу відносно нульової лінії, яка розташована по відвалу.

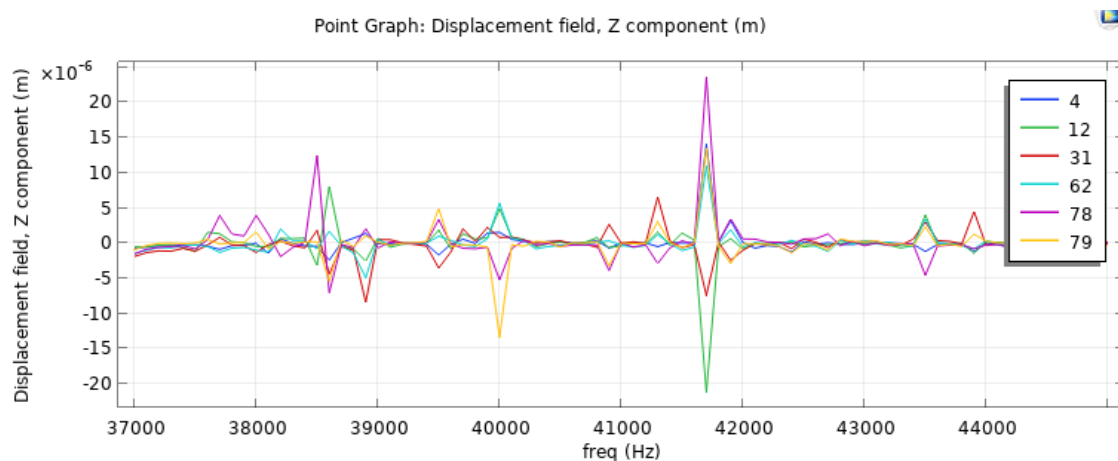


Рисунок 6. Амплітудно-частотна характеристика системи плужний відвал-п'єзоактуатор: 4, 12, 31, 62, 78, 79 – контрольні вимірювальні точки (нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics рисунка 3)

На рисунку 7 на основі отриманого результату амплітудно-частотної характеристики (рисунок 6) зображено наочну деформацію ультразвукової системи плужний відвал-

п'єзоактуатор на частотах, які відповідають максимальним амплітудам коливань плужного відвалу у площині Z.

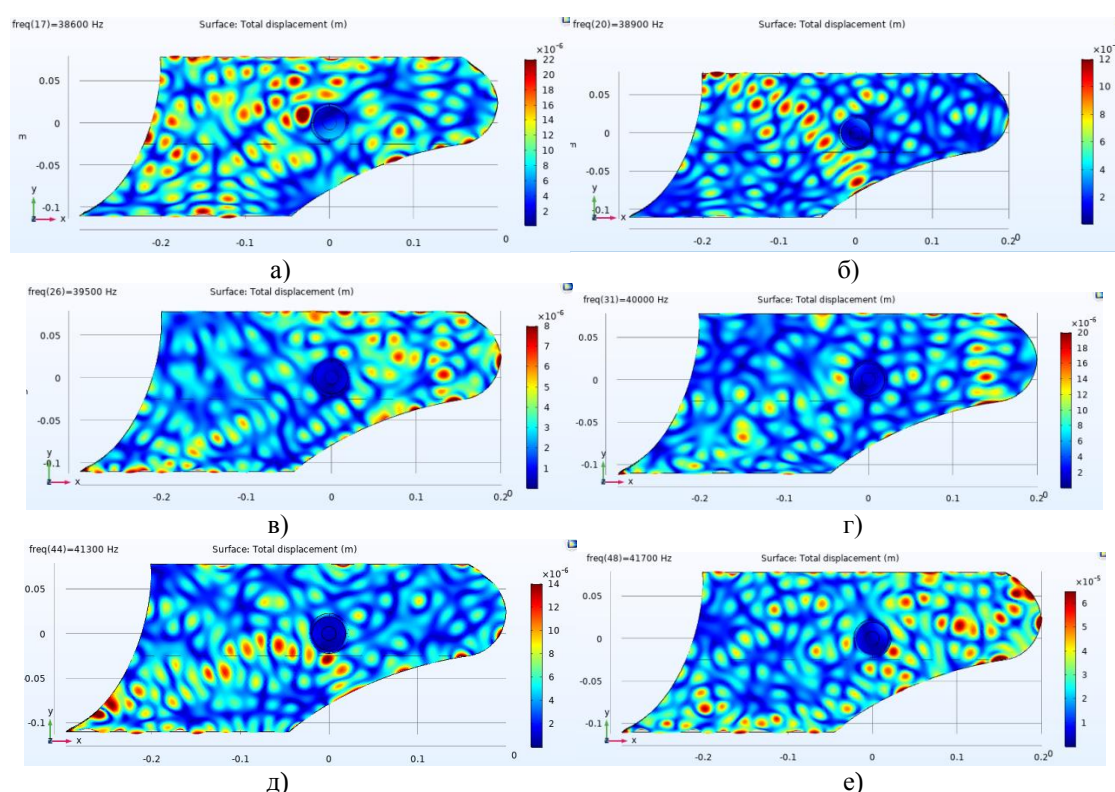


Рисунок 7. Результати чисельного моделювання для визначення максимальної амплітуди коливань системи плужний відвал-п'єзоактуатор на частотах: а) 38.6 кГц; б) 38.9 кГц; в) 39.5 кГц; г) 40 кГц; д) 41.3 кГц; е) 41.7 кГц

З отриманих результатів видно, що найбільша амплітуда коливань системи плужний відвал-п'єзоактуатор відповідає частоті 41,7 кГц і становить 60 мкм.

Вібропруг на основі п'єзоелектричного актуатора розширює діапазон можливостей використання вібропруга, а саме: отримувати дані при обробці ґрунту і визначати за-

лежності амплітуди коливань відвалу віброплуга від сили тертя F , яка утворюється ґрунтом.

Перевірку використання віброплуга на основі ПА в режимі датчика за рахунок використання прямого п'єзоефекту представлено



а)

на рисунку 8. Прикладена сила до системи плужний відвал-п'єзоактуатор становить близько 1 Н.

З рисунка 8 видно, що при прикладеній силі близько 1 Н вихідна напруга становить 0,5 В.



б)

Рисунок 8. Перевірка використання віброплуга в режимі датчика:

- а) віброплуг з ультразвуковою системою на відвалі як датчик, F – сила, прикладена до віброплуга;
б) осцилограма електричного сигналу з віброплуга

Обговорення результатів. Перевагою п'єзоелектричних ультразвукових випромінювальних систем є можливість використовувати прямий п'єзоефект, завдяки якому п'єзоелектрична ультразвукова випромінювальна система плужний відвал-п'єзоактуатор може використовуватися в режимі датчика. Представлена осцилограма (рисунок 8, б) чітко вказує, що система плужний відвал-п'єзоактуатор (віброплуг) в режимі датчика забезпечує потрібний рівень вихідного сигналу для його обробки контролером. Це дозволить розширити діапазон використання віброплуга, а саме, можливості отримувати певні дані (інтенсивність коливань, характеристики ґрунту) при обробці ґрунту.

За рахунок збільшення частоти актуатора стає можливим зменшити його розміри.

Створена 3D-вимірною комп'ютерна модель віброплуга на основі ультразвукового п'єзоелектричного актуатора дозволяє створювати та прогнозувати характеристики майбутнього зразка.

Висновки. Розглянуто конструкції віброплугів, які використовуються у сільському господарстві. Використання віброплуга дозволить зменшити силу тертя плужного відвалу з ґрунтом, що дає можливість зменшити витрати палива та збільшити термін експлуатації сільгосптехніки.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні конструкції віброплуга на основі

п'єзокерамічного актуатора, а також його комп'ютерної моделі, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, що дає змогу збільшити частоту віброколивань та зменшити тертя з ґрунтом.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- визначено частоту (41,7 кГц), при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань (60 мкм) відвалу віброплуга на основі п'єзокерамічного актуатора;

- експериментально доведено доцільність використання ультразвукового п'єзоелектричного актуатора віброплуга в режимі датчика;

- розширено можливості використання віброплуга, а саме, отримувати певні характеристики при обробці ґрунту за допомогою використання ультразвукового п'єзоелектричного актуатора у режимі датчика;

- отримані дані можна використовувати при проектуванні віброплуга, в якому вібрація створюється за рахунок п'єзокерамічного актуатора.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схеми керування актуатором, визначення коефіцієнта корисної дії віброплуга з ПА та отримання залежностей впливу ґрунту на п'єзокерамічний актуатор у режимі датчика.

Список використаних джерел

- [1] S. Kalogiannidis, D. Kalfas, F. Chatzitheodoridis, and O. Papaevangelou, "Role of crop-protection technologies in sustainable agricultural productivity and management", *Land*, vol. 11 (10), 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/land11101680>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [2] M. Rosegrant et al., *Food Security in a World of Growing Natural Resource Scarcity: The Role of Agricultural Technologies*. Washington, D.C., USA: International Food Policy Research Institute, 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.2499/9780896298477>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [3] V. M. Bulgakov, M. O. Sviren, I. P. Palamarchuk, V. V. Dryga, O. M. Chernysh, and V. V. Yaremenko, *Vibration Machines for Agricultural Production*. Kirovohrad, Ukraine, 2012.
- [4] S. Dong, M. Dapino, and J. Vis, "Experiments on ultrasonic lubrication using a piezoelectrically-assisted tribometer and optical profilometer", *J. Vis. Exp.*, vol. 103, p. 52931, 2015.
- [5] В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, та Л. А. Дяченко, "Вібраційний плуг", Національний університет біоресурсів і природокористування України, МПК 2009.01 A01B 63/111.
- [6] S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "The use of smart piezoceramics for tillage in agriculture", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, 2019.
- [7] V. Ya. Halchenko, S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Mathematical modeling of features of electrophysical processes in a vibration plow with piezoelectric actuator", *Agricultural machinery*, Bulgaria, pp. 36-39, 2022.
- [8] S. A. Filimonov, C. V. Bazilo, S. S. Yashchenko, and N. V. Filimonova, "Method of reducing friction in the plow moldboard with soil during cultivation due to the implementation of ultrasonic vibrations", *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 281-289, 2022. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [9] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019.
- [10] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. New York, USA: Springer Verlag, 2011. Available: https://www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [11] G Akhras, "Smart materials and smart systems for the future", *Canadian Military Journal*, no. 3, pp. 25-32, 2000.
- [12] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018.
- [13] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
- [14] L. Spicci, and M. Cati, "Ultrasound piezo-disk transducer model for material parameter optimization", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010, pp. 1-7.
- [15] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2011.

References

- [1] S. Kalogiannidis, D. Kalfas, F. Chatzitheodoridis, and O. Papaevangelou, "Role of crop-protection technologies in sustainable agricultural productivity and management", *Land*, vol. 11 (10), 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/land11101680>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [2] M. Rosegrant et al., *Food Security in a World of Growing Natural Resource Scarcity: The Role of Agricultural Technologies*. Washington, D.C., USA: International Food Policy Research Institute, 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.2499/9780896298477>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [3] V. M. Bulgakov, M. O. Sviren, I. P. Palamarchuk, V. V. Dryga, O. M. Chernysh, and V. V. Yaremenko, *Vibration Machines*

- for *Agricultural Production*. Kirovohrad, Ukraine, 2012.
- [4] S. Dong, M. Dapino, and J. Vis, "Experiments on ultrasonic lubrication using a piezoelectrically-assisted tribometer and optical profilometer", *J. Vis. Exp.*, vol. 103, p. 52931, 2015.
- [5] V. S. Loveykin, Y. V. Chovnyuk, and L. A. Dyachenko, "Vibrating plow", National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, IPC 2009.01 A01B 63/111 [in Ukrainian].
- [6] S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "The use of smart piezoceramics for tillage in agriculture", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, 2019.
- [7] V. Ya. Halchenko, S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Mathematical modeling of features of electrophysical processes in a vibration plow with piezoelectric actuator", *Agricultural machinery*, Bulgaria, pp. 36-39, 2022.
- [8] S. A. Filimonov, C. V. Bazilo, S. S. Yashchenko, and N. V. Filimonova, "Method of reducing friction in the plow moldboard with soil during cultivation due to the implementation of ultrasonic vibrations", *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 281-289, 2022. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [9] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019.
- [10] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. New York, USA: Springer Verlag, 2011. Available: https://www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [11] G Akhras, "Smart materials and smart systems for the future", *Canadian Military Journal*, no. 3, pp. 25-32, 2000.
- [12] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018.
- [13] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
- [14] L. Spicci, and M. Cati, "Ultrasound piezo-disk transducer model for material parameter optimization", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010, pp. 1-7.
- [15] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2011.

S. O. Filimonov, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

S. S. Yashchenko, Postgraduate
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

IMPROVED DESIGN OF VIBRATORY PLOW WITH PIEZOCERAMIC ACTUATOR

The sphere of agriculture is one of the most important spheres of human activity, since the task of agriculture is to provide the population with food necessary for its existence. Today, rural development is one of the most effective ways to overcome the hunger around the world. One of the main problems of agriculture consists in the complexity and efficiency of land cultivation. The main body of soil cultivation in agriculture is the plow.

One of the most effective methods of soil cultivation is the use of an improved plow with a vibrating part, the use of which will reduce the force of friction between the plow mouldboard and the soil, which will make it possible to reduce fuel consumption and increase the service life of agricultural machinery.

The work consists in improving the design of a vibrating plow based on a piezoceramic actuator, as well as its computer model, taking into account a full set of geometric, physical-mechanical and electrical parameters, which will make it possible to increase the frequency of vibration and reduce friction with the soil.

The advantage of piezoelectric ultrasonic radiating systems is the ability to use a direct piezo effect, thanks to which the piezoelectric ultrasonic radiating system – plow mouldboard-piezoactuator – can be used in sensor mode. This will make it possible to expand the range of possibilities of using the vibroplow, namely the possibility of recording data (intensity of oscillations, soil characteristics) during soil cultivation.

By increasing the frequency of the piezoelectric actuator, it becomes possible to reduce its size.

The paper presents and discusses the main problems and differences between conventional plows and vibrating plows. Improved design of the vibrating plow based on a piezoceramic actuator, as well as its computer model using the COMSOL Multiphysics program package, taking into account a full set of geometric, physical-mechanical and electrical parameters, allows to increase the frequency of vibration and reduce friction with the soil. As a result, the resonant frequency, at which the maximum amplitudes of vibrations of the vibrating plow are ensured, is determined. Experimental results in which the ultrasonic emitter is used in sensor mode are also presented.

Keywords: piezoelement, automation, friction reduction, vibrating plow, modeling, mouldboard, sensor.

[0000-0003-3841-7373] **Є. Є. Федоров**, *д-р техн. наук, професор*,
e-mail: fedorovee75@ukr.net

[0000-0002-3954-3796] **О. В. Нечипоренко**, *канд. техн. наук, доцент*,
e-mail: o.nechyporenko@chdtu.edu.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД ДИНАМІЧНОГО УПРАВЛІННЯ БУФЕРОМ ЗАПАСІВ НА ОСНОВІ М'ЯКИХ ОБЧИСЛЕНЬ

У роботі пропонується метод динамічного управління буфером запасів на основі м'яких обчислень. Новизна дослідження полягає в тому, що для динамічного управління буфером запасів було створено метод на основі нечіткої логіки та штучної нейронної мережі, дві моделі штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів, вибрано три критерії оцінки ефективності запропонованих моделей, ідентифіковано параметри запропонованих моделей на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі, орієнтовані на технологію паралельної обробки інформації. Запропоновані моделі та процедури їх параметричної ідентифікації дозволяють підвищити швидкодію, точність і надійність прийняття рішення. Запропонований метод динамічного управління буфером запасів на основі м'яких обчислень може використовуватись у різних інтелектуальних системах.

Ключові слова: теорія обмежень, штучна нейронна мережа, системи нечіткого виведення, технологія CUDA.

Вступ. Нині все більше компаній прагнуть удосконалювати й оптимізувати свої бізнес-процеси на основі впровадження технології теорії обмежень (ТОС) [1-5], яка забезпечує динамічне управління буфером запасів та використовується для управління ланцюгами постачання. В результаті суттєво зростає актуальність розробки методів інтелектуалізації технології теорії обмежень. На сьогоднішній день відсутні комп'ютерні системи динамічного керування буфером запасів, які ґрунтуються на м'яких обчисленнях.

Нині для управління динамічними об'єктами використовуються методи штучного інтелекту, при цьому найпопулярнішими є штучні нейронні мережі [6-8].

Перевагами нейронних мереж є [9-11]:

- можливість їх навчання та адаптації;
- можливість виявлення закономірностей у даних, їх узагальнення, тобто отримання знань з даних, тому не потрібні знання про об'єкт (наприклад, його математична модель);
- паралельна обробка інформації, що підвищує обчислювальну потужність.

Недоліками нейронних мереж є [12-14]:

- труднощі визначення структури мережі, оскільки відсутні методи розрахунку кількості шарів та нейронів у кожному шарі для конкретних додатків;

– складність формування представницької вибірки;

– висока ймовірність попадання методу навчання та адаптації до локального екстремуму;

– недоступність для розуміння людиною накопичених мережею знань (неможливо у вигляді правил уявити залежність між входом і виходом), оскільки вони розподілені між усіма елементами нейронної мережі та представлені у вигляді її вагових коефіцієнтів.

Останнім часом нейронні мережі комбінуються із системами нечіткого виведення.

Перевагами систем нечіткого виведення є [15, 16]:

– подання знань як правил, легко доступних для розуміння людиною;

– не потрібна точна оцінка змінних об'єктів (неповнота та неточність даних).

Недоліками систем нечіткого виведення є [17-18]:

– неможливість їх навчання та адаптації (параметри функцій належності не можна автоматично налаштувати);

– неможливість паралельної обробки інформації, що підвищує обчислювальну потужність.

У зв'язку з цим є актуальним створення методу динамічного управління буфером

запасів, який дозволить усунути зазначені недоліки.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності динамічного управління буфером запасів за рахунок штучної нейро-нечіткої мережі, яка навчається на основі методу зворотного поширення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Створення системи нечіткого динамічного управління буфером запасів.

2. Створення математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів.

3. Вибір критеріїв оцінки ефективності математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів.

4. Ідентифікація параметрів математичної моделі штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі.

1. Створення системи нечіткого динамічного управління буфером запасів. Для динамічного управління буфером запасів у роботі набула подальшого вдосконалення система нечіткого логічного виведення, яка забезпечує подання знань про управління буфером запасів у вигляді нечітких правил, легко доступних для розуміння людиною, та передбачає виконання таких етапів:

- формування лінгвістичних змінних;
- формування бази нечітких правил;
- фазифікація;
- агрегування підумов;
- активізація висновків;
- агрегування висновків;
- дефазифікація.

1.1. Формування лінгвістичних змінних. Як чіткі вхідні змінні були обрані:

- поточний розмір запасу x_1 у штуках;
- час перебування у червоній зоні буфера запасів x_2 у днях;
- час перебування у зеленій зоні буфера запасів x_3 у днях.

Як лінгвістичні вхідні змінні були обрані:

- глибина знаходження в червоній зоні буфера запасів $\tilde{x}_1$, яка залежить від поточного розміру запасу, зі своїми значеннями $\tilde{\alpha}_{11} = \text{велика}, \tilde{\alpha}_{12} = \text{мала}$, в яких областями значень є нечіткі множини

$$\tilde{A}_{11} = \{x_1 \mid \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\}, \tilde{A}_{12} = \{x_1 \mid 1 - \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\};$$

– тривалість знаходження в червоній зоні буфера запасів $\tilde{x}_2$ зі своїми значеннями $\tilde{\alpha}_{21} = \text{довго}, \tilde{\alpha}_{22} = \text{недовго}$, в яких областями значень є нечіткі множини

$$\tilde{A}_{21} = \{x_2 \mid \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\}, \tilde{A}_{22} = \{x_2 \mid 1 - \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\};$$

– тривалість знаходження в зеленій зоні буфера запасів $\tilde{x}_3$ зі своїми значеннями $\tilde{\alpha}_{31} = \text{довго}, \tilde{\alpha}_{32} = \text{недовго}$, в яких областями значень є нечіткі множини

$$\tilde{A}_{31} = \{x_3 \mid \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3)\}, \tilde{A}_{32} = \{x_3 \mid 1 - \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3)\}.$$

Як чітку вихідну змінну було обрано номер виду дії, що змінює розмір буфера запасів у.

Як лінгвістична вихідна змінна була обрана дія $\tilde{y}$, що змінює розмір буфера запасів, зі своїми значеннями $\tilde{\beta}_1 = \text{збільшити приблизно на третину}, \tilde{\beta}_2 = \text{зменшити приблизно на третину}, \tilde{\beta}_3 = \text{не змінювати}, \tilde{\beta}_4 = \text{аномалія}$, в яких областями значень є нечіткі множини:

$$\tilde{B}_1 = \{y \mid \mu_{\tilde{B}_1}(y)\}, \tilde{B}_2 = \{y \mid \mu_{\tilde{B}_2}(y)\},$$

$$\tilde{B}_3 = \{y \mid \mu_{\tilde{B}_3}(y)\}, \tilde{B}_4 = \{y \mid \mu_{\tilde{B}_4}(y)\}.$$

1.2. Формування бази нечітких правил. Запропоновані нечіткі правила враховують усі можливі стани буфера запасів (усі можливі комбінації значень вхідних лінгвістичних змінних) та відповідні їм дії:

$$R^1 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{11} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{21} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{31} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_4 (F^1),$$

$$R^2 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{11} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{21} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{32} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_1 (F^2),$$

$$R^3 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{11} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{22} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{31} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_4 (F^3),$$

$$R^4 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{11} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{22} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{32} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_1 (F^4),$$

$$R^5 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{12} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{21} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{31} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_4 (F^5),$$

$$R^6 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{12} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{21} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{32} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_1 (F^6),$$

$$R^7 : \text{ЯКЩО } \tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{12} \text{ I } \tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{22} \text{ I } \tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{31} \text{ ТО } \tilde{y} \in \tilde{\beta}_2 (F^7),$$

R^8 : ЯКЩО $\tilde{x}_1 \in \tilde{\alpha}_{12}$ І $\tilde{x}_2 \in \tilde{\alpha}_{22}$ І $\tilde{x}_3 \in \tilde{\alpha}_{32}$ ТО
 $\tilde{y} \in \tilde{\beta}_3 (F^8)$,

де F^r – коефіцієнти нечітких правил R^r .

Наприклад, нечітке правило R^2 відповідає наступному знанню: якщо глибина знаходження в червоній зоні буфера запасів велика і перебування в червоній зоні буфера запасів довге, і перебування в зеленій зоні буфера запасів недовге, то збільшити розмір буфера запасів.

1.3. Фазифікація. Визначимо ступінь істинності кожної підумови кожного правила за допомогою функції належності $\mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i)$.

Як функції належності підумов була обрана логістична функція (відповідає логістичному розподілу) та її заперечення, тобто

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1) &= \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_1 - m_{11}}{\sigma_{11}}\right)\right]\right)^{-1}, \\ \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) &= \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_2 - m_{21}}{\sigma_{21}}\right)\right]\right)^{-1}, \\ \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) &= \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_3 - m_{31}}{\sigma_{31}}\right)\right]\right)^{-1}, \\ \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) &= 1 - \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) = \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_3 - m_{11}}{-\sigma_{11}}\right)\right]\right)^{-1}, \\ \mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2) &= 1 - \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) = \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_2 - m_{21}}{-\sigma_{21}}\right)\right]\right)^{-1}, \\ \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) &= 1 - \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) = \left(1 + \exp\left[-\left(\frac{x_3 - m_{31}}{-\sigma_{31}}\right)\right]\right)^{-1}\end{aligned}$$

де m_{ij} – параметр локації,

σ_{ij} – параметр масштабу.

1.4. Агрегування підумов. Функції приналежності умов враховують усі можливі стани буфера запасів (усі можливі комбінації значень лінгвістичних змінних) та визначаються у вигляді

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{A}^1}(\bar{x}) &= \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3), \\ \mu_{\tilde{A}^2}(\bar{x}) &= \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3), \\ \mu_{\tilde{A}^3}(\bar{x}) &= \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3), \\ \mu_{\tilde{A}^4}(\bar{x}) &= \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3), \\ \mu_{\tilde{A}^5}(\bar{x}) &= \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3),\end{aligned}$$

$$\mu_{\tilde{A}^6}(\bar{x}) = \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3),$$

$$\mu_{\tilde{A}^7}(\bar{x}) = \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3),$$

$$\mu_{\tilde{A}^8}(\bar{x}) = \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1)\mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2)\mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3)$$

або у вигляді

$$\mu_{\tilde{A}^1}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^2}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^3}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^4}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{11}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^5}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^6}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{21}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^7}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{31}}(x_3) - 2\}$$

$$\mu_{\tilde{A}^8}(\bar{x}) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}_{12}}(x_1) + \mu_{\tilde{A}_{22}}(x_2) + \mu_{\tilde{A}_{32}}(x_3) - 2\}$$

1.5. Активізація висновків. Функції належності висновків пов'язують з усіма можливими станами буфера запасів (усі можливі комбінації значень лінгвістичних змінних) відповідні їм дії та визначаються у вигляді

$$\mu_{\tilde{C}^1}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^1}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_4}(z)F^1,$$

$$\mu_{\tilde{C}^2}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^2}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_1}(z)F^2,$$

$$\mu_{\tilde{C}^3}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^3}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_4}(z)F^3,$$

$$\mu_{\tilde{C}^4}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^4}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_1}(z)F^4,$$

$$\mu_{\tilde{C}^5}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^5}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_4}(z)F^5,$$

$$\mu_{\tilde{C}^6}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^6}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_1}(z)F^6,$$

$$\mu_{\tilde{C}^7}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^7}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_2}(z)F^7,$$

$$\mu_{\tilde{C}^8}(\bar{x}, z) = \mu_{\tilde{A}^8}(\bar{x})\mu_{\tilde{B}_3}(z)F^8$$

або у вигляді

$$\mu_{\tilde{C}^1}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^1}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_4}(z) - 1\}F^1,$$

$$\mu_{\tilde{C}^2}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^2}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_1}(z) - 1\}F^2,$$

$$\mu_{\tilde{C}^3}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^3}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_4}(z) - 1\}F^3,$$

$$\mu_{\tilde{C}^4}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^4}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_1}(z) - 1\}F^4,$$

$$\mu_{\tilde{C}^5}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^5}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_4}(z) - 1\}F^5,$$

$$\mu_{\tilde{C}^6}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^6}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_1}(z) - 1\}F^6,$$

$$\mu_{\tilde{C}^7}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^7}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_2}(z) - 1\}F^7,$$

$$\mu_{\tilde{C}^8}(\bar{x}, z) = \max\{0, \mu_{\tilde{A}^8}(\bar{x}) + \mu_{\tilde{B}_3}(z) - 1\}F^8.$$

У цій роботі функції належності $\mu_{B_k}(z)$ визначені як

$$\mu_{B_1}(z) = [z = 1] = \begin{cases} 1, & z = 1 \\ 0, & z \neq 1 \end{cases},$$

$$\mu_{B_2}(z) = [z = 2] = \begin{cases} 1, & z = 2 \\ 0, & z \neq 2 \end{cases},$$

$$\mu_{B_3}(z) = [z = 3] = \begin{cases} 1, & z = 3 \\ 0, & z \neq 3 \end{cases},$$

$$\mu_{B_4}(z) = [z = 4] = \begin{cases} 1, & z = 4 \\ 0, & z \neq 4 \end{cases}.$$

1.6. Агрегування висновків. Функція належності підсумкового висновку визначається як

$$\mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z) = \max\{\mu_{\tilde{C}_1}(\bar{x}, z), \dots, \mu_{\tilde{C}_8}(\bar{x}, z)\}.$$

1.7. Дефазифікація. Для отримання номера виду дії, що змінює розмір буфера запасів, використовується метод максимуму функції належності

$$z^* = \arg \max_z \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z).$$

2. Створення математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів. Для динамічного управління буфером запасів у роботі набули подальшого вдосконалення математичні моделі штучної нейронної мережі за рахунок використання пі-сигма та сигма-сигма нейронів, що дозволяє моделювати етапи нечіткого логічного висновку, який визначає структуру моделей. Враховуючи, що в цій роботі функції належності $\mu_{B_k}(z) = [z = k] = \begin{cases} 1, & z = k \\ 0, & z \neq k \end{cases}$, то $\mu_{B_k}(z)$ замінюється на 1 і етап активізації поєднується з етапом агрегування висновків, що спрощує моделювання нечіткого логічного висновку.

Структура моделі штучної нейро-нечіткої мережі як графа представлена на рисунку 1.

Вхідний (нульовий) шар містить три нейрони (відповідає кількості вхідних змінних). Перший прихований шар реалізує фазифікацію та містить шість нейронів (відповідає сумі значень лінгвістичних вхідних змінних). Другий прихований шар реалізує агрегування умов і містить вісім нейронів (відповідає кількості нечітких правил). Вихідний (третій) шар реалізує активізацію та агрегування висновків і містить чотири нейрони (відповідає кількості значень лінгвістичних вихідних змінних).

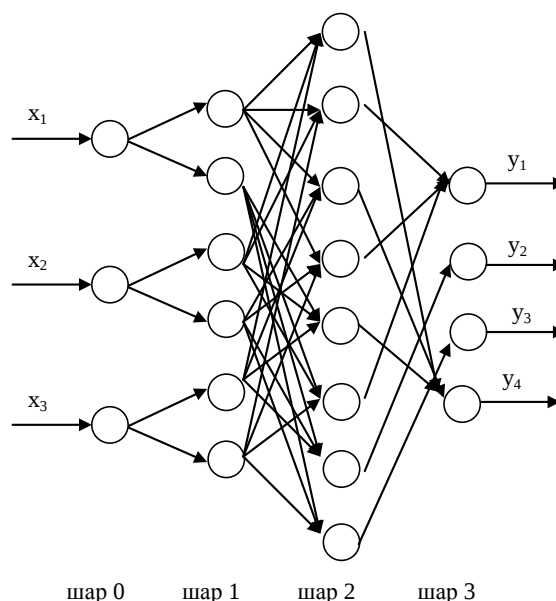


Рисунок 1. Структура моделі штучної нейро-нечіткої мережі як графа

Функціонування штучної нейро-нечіткої мережі представлено в такий спосіб.

У першому шарі обчислюються функції належності підумов

$$\mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_i) = \left(1 + \exp \left[- \left(\frac{x_i - m_{i1}}{\sigma_{i1}} \right) \right] \right)^{-1}, \quad i \in \overline{1, I},$$

$$\mu_{\tilde{A}_{i2}}(x_i) = 1 - \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_i) = \left(1 + \exp \left[- \left(\frac{x_i - m_{i1}}{-\sigma_{i1}} \right) \right] \right)^{-1}, \quad i \in \overline{1, I}.$$

У другому шарі обчислюються функції належності умов на основі:

– лінійної функції активації та пі-сигма нейрона

$$\mu_{\tilde{A}^r}(\bar{x}) = \text{Id}(s_r^{(2)}) = s_r^{(2)}, \quad s_r^{(2)} = \prod_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i), \quad r \in \overline{1, K};$$

– ReLU функції активації та сигма-сигма нейрона

$$\mu_{\tilde{A}^r}(\bar{x}) = \text{ReLU}(s_r^{(2)}) = \max\{0, s_r^{(2)}\},$$

$$s_r^{(2)} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i) - (I - 1), \quad r \in \overline{1, K},$$

$$w_{11}^1 = 1, \quad w_{12}^1 = 0, \quad w_{21}^1 = 1, \quad w_{22}^1 = 0,$$

$$w_{31}^1 = 1, \quad w_{32}^1 = 0,$$

$$w_{11}^2 = 1, \quad w_{12}^2 = 0, \quad w_{21}^2 = 1, \quad w_{22}^2 = 0,$$

$$w_{31}^2 = 0, \quad w_{32}^2 = 1,$$

$$\begin{aligned}
w_{11}^3 &= 1, w_{12}^3 = 0, w_{21}^3 = 0, w_{22}^3 = 1, \\
w_{31}^3 &= 1, w_{32}^3 = 0, \\
w_{11}^4 &= 1, w_{12}^4 = 0, w_{21}^4 = 0, w_{22}^4 = 1, \\
w_{31}^4 &= 0, w_{32}^4 = 1, \\
w_{11}^5 &= 0, w_{12}^5 = 1, w_{21}^5 = 1, w_{22}^5 = 0, \\
w_{31}^5 &= 1, w_{32}^5 = 0, \\
w_{11}^6 &= 0, w_{12}^6 = 1, w_{21}^6 = 1, w_{22}^6 = 0, \\
w_{31}^6 &= 0, w_{32}^6 = 1, \\
w_{11}^7 &= 0, w_{12}^7 = 1, w_{21}^7 = 0, w_{22}^7 = 1, \\
w_{31}^7 &= 1, w_{32}^7 = 0, \\
w_{11}^8 &= 0, w_{12}^8 = 1, w_{21}^8 = 0, w_{22}^8 = 1, \\
w_{31}^8 &= 0, w_{32}^8 = 1.
\end{aligned}$$

У третьому шарі обчислюються функції належності підсумкового висновку на основі тахout функції активації

$$y_z = \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z) = \max_r \{s_{zr}^{(3)}\},$$

$$s_{zr}^{(3)} = w_r^z \mu_{\tilde{A}_r}(\bar{x}), z \in \overline{1, Z}, r \in \overline{1, K},$$

$$w_1^1 = 0, w_2^1 = F^2, w_3^1 = 0, w_4^1 = F^4,$$

$$w_5^1 = 0, w_6^1 = F^6, w_7^1 = 0, w_8^1 = 0,$$

$$w_1^2 = 0, w_2^2 = 0, w_3^2 = 0, w_4^2 = 0,$$

$$w_5^2 = 0, w_6^2 = 0, w_7^2 = F^7, w_8^2 = 0,$$

$$w_1^3 = 0, w_2^3 = 0, w_3^3 = 0, w_4^3 = 0,$$

$$w_5^3 = 0, w_6^3 = 0, w_7^3 = 0, w_8^3 = F^8,$$

$$w_1^4 = F^1, w_2^4 = 0, w_3^4 = F^3, w_4^4 = 0,$$

$$w_5^4 = F^5, w_6^4 = 0, w_7^4 = 0, w_8^4 = 0.$$

Таким чином, математична модель штучної нейро-нечіткої мережі на основі тахout та лінійної функції активації, пі, пі-сигма та інвертованих пі нейронів представлена у вигляді

$$\begin{aligned}
y_z = \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z) &= \max_r \left\{ w_r^z \left(\prod_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i) \right) \right\}, \\
z &\in \overline{1, Z}, r \in \overline{1, K}.
\end{aligned} \quad (1)$$

Таким чином, математична модель штучної нейро-нечіткої мережі на основі тахout і ReLU функції активації, сигма-сигма та сигма нейронів представлена у вигляді

$$\begin{aligned}
y_z &= \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z) = \\
&= \max_r \left\{ w_r^z \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i) - (I-1) \right\} \right\}, \\
z &\in \overline{1, Z}, r \in \overline{1, K}.
\end{aligned} \quad (2)$$

Для прийняття рішення щодо вибору дії для моделей (1), (2) використовується метод максимуму функції належності

$$z^* = \arg \max_z y_z = \arg \max_z \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}, z), z \in \overline{1, Z}.$$

3. Вибір критеріїв оцінки ефективності математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів. У роботі для оцінки параметричної ідентифікації математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі (1), (2) вибрано:

– критерій точності, який означає вибір таких значень параметрів $\theta = (F^1, \dots, F^K, m_{11}, \dots, m_{II}, \sigma_{11}, \dots, \sigma_{II})$, які доставляють мінімум середньоквадратичної помилки (різниця виходу за моделлю та бажаного виходу)

$$F = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (y_{pz} - d_{pz})^2 \rightarrow \min_{\theta}, \quad (3)$$

де d_{pz} – відгук, отриманий з об'єкта управління, $d_{pz} \in \{0,1\}$,

y_{pz} – відгук, отриманий за моделлю,

P – кількість тестових реалізацій;

– критерій надійності, який означає вибір таких значень параметрів $\theta = (F^1, \dots, F^K, m_{11}, \dots, m_{II}, \sigma_{11}, \dots, \sigma_{II})$, які доставляють мінімум ймовірності прийняття неправильного рішення (різниця виходу за моделлю та бажаного виходу)

$$F = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left[\arg \max_{z \in \overline{1, Z}} y_{pz} \neq \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} d_{pz} \right] \rightarrow \min_{\theta}, \quad (4)$$

$$\left[\arg \max_{z \in \overline{1, Z}} y_{pz} \neq \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} d_{pz} \right] =$$

$$= \begin{cases} 1, & \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} y_{pz} \neq \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} d_{pz}; \\ 0, & \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} y_{pz} = \arg \max_{z \in \overline{1, Z}} d_{pz}; \end{cases}$$

– критерій швидкодії, що означає вибір таких значень параметрів $\theta = (F^1, \dots, F^K, m_{11}, \dots, m_{II}, \sigma_{11}, \dots, \sigma_{II})$, які доставляють мінімум обчислювальної складності

$$F = T \rightarrow \min_{\theta}. \quad (5)$$

4. Ідентифікація параметрів математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі. Для ідентифікації пара-

метрів математичних моделей штучної нейронної мережі динамічного управління буфером запасів (1), (2) у роботі набула подальшого удосконалення процедура визначення цих параметрів на основі градієнтного спуску за рахунок обчислення лише вектора параметрів $\theta = (F^1, \dots, F^K, m_{11}, \dots, m_{I1}, \sigma_{11}, \dots, \sigma_{I1})$ і пакетного режиму навчання для прискорення навчання, яка передбачає виконання таких етапів:

1. Ініціалізація за допомогою рівномірного розподілу на інтервалі (0,1) локацій m_{ij} , масштабів σ_{ij} , ваги F^r , $i \in \overline{1, I}$, $j \in \overline{1, J_i}$, $r \in \overline{1, K}$.

2. Задання навчальної множини $\{(\bar{x}_p, \bar{d}_p) | \bar{x}_p \in R^I, \bar{d}_p \in \{0,1\}^I\}$, $p \in \overline{1, P}$, де $\bar{x}_p$ – p -й нормований навчальний вхідний вектор, $\bar{d}_p$ – p -й навчальний вихідний вектор, I – кількість вхідних змінних, P – потужність навчальної множини. Номер ітерації $n=1$.

3. Обчислення вихідного сигналу (прямий хід):
за моделлю (1)

$$y_{pz} = \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}_p, z) = \max_r \left\{ w_r^z \left(\prod_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_{pi}) \right) \right\},$$

$$p \in \overline{1, P}, z \in \overline{1, Z}, r \in \overline{1, K}$$

або за моделлю (2)

$$y_{pz} = \mu_{\tilde{C}}(\bar{x}_p, z) =$$

$$= \max_r \left\{ w_r^z \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} w_{ij}^r \mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_{pi}) - (I-1) \right\} \right\},$$

$$p \in \overline{1, P}, z \in \overline{1, Z}, r \in \overline{1, K}.$$

4. Обчислення енергії помилки на основі критерію (3)

$$E = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (y_{pz} - d_{pz})^2.$$

5. Налаштування ваги правил і параметрів функції належності (зворотний хід)

$$w_r^z = \begin{cases} w_r^z - \eta \frac{\partial E}{\partial w_r^z}, & (r, z) \in H, z \in \overline{1, Z}, \\ 0, & (r, z) \notin H \end{cases}$$

$$r \in \overline{1, K},$$

$$H = \{(2,1), (4,1), (6,1), (7,2), (8,3), (1,4), (3,4), (5,4)\}$$

$$m_{i1} = m_{i1} - \eta \frac{\partial E}{\partial m_{i1}}, i \in \overline{1, I},$$

$$\sigma_{i1} = \sigma_{i1} - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{i1}}, i \in \overline{1, I};$$

за моделлю (1)

$$\frac{\partial E}{\partial w_r^z} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mu_{\tilde{A}_r}(\bar{x}_p) \delta_{pz},$$

$$\frac{\partial E}{\partial m_{i1}} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{ij}}}{\partial m_{i1}} \sum_{r=1}^K w_{ir}^r \text{Id}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz}),$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{i1}} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{ij}}}{\partial \sigma_{i1}} \sum_{r=1}^K w_{ir}^r \text{Id}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz})$$

або за моделлю (2)

$$\frac{\partial E}{\partial w_r^z} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mu_{\tilde{A}_r}(\bar{x}_p) \delta_{pz},$$

$$\frac{\partial E}{\partial m_{i1}} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{ij}}}{\partial m_{i1}} \sum_{r=1}^K w_{ir}^r \text{ReLU}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz}),$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{i1}} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{ij}}}{\partial \sigma_{i1}} \sum_{r=1}^K w_{ir}^r \text{ReLU}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz}),$$

де η – параметр, що визначає швидкість навчання, $0 < \eta < 1$ (при великому η навчання відбувається швидше, але збільшується небезпека отримати неправильне рішення),

$$\text{Id}'(s_{pr}^{(2)}) = 1,$$

$$\text{ReLU}'(s_{pr}^{(2)}) = \begin{cases} 1, & s_{pr}^{(2)} > 0 \\ 0, & s_{pr}^{(2)} < 0 \end{cases},$$

$$\text{maxout}'(\bar{s}_{pz}^{(3)}) = \begin{cases} 1, & r = \arg \max_k \{s_{pz}^{(3)}\} \\ 0, & r \neq \arg \max_k \{s_{pz}^{(3)}\} \end{cases}, k \in \overline{1, K},$$

$$\frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{i1}}}{\partial m_{i1}} = \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_{pi})(1 - \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_{pi})) \frac{1}{\sigma_{i1}},$$

$$\frac{\partial \mu_{\tilde{A}_{i1}}}{\partial \sigma_{i1}} = \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_{pi})(1 - \mu_{\tilde{A}_{i1}}(x_{pi})) \left(\frac{x_{pi} - m_{i1}}{(\sigma_{i1})^2} \right),$$

$$\delta_{pz} = \text{maxout}'(\bar{s}_{pz}^{(3)})(y_{pz} - d_{pz}).$$

6. Перевірка умови завершення. Якщо $E > \varepsilon$, то збільшити номер ітерації n , перехід до 3. Значення ε обчислюється експериментально.

5. Алгоритм ідентифікації параметрів математичних моделей штучної нейронної мережі динамічного управління буфером запасів на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі. Алгоритм ідентифікації параметрів математичних моделей штучної нейронної мережі ди-

намічного управління буфером запасів на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі, призначений для реалізації на GPU за допомогою технології CUDA, представлений на рисунку 2. Ця блок-схема функціонує таким чином.

1. Номер ітерації $n=1$, ініціалізація за допомогою рівномірного розподілу на інтервалі $(0,1)$ математичних очікувань m_{ij} , середньоквадратичних відхилень σ_{ij} , $i \in \overline{1, I}$, $j \in \overline{1, J}$.

2. Задання навчальної множини

$$\{(\bar{x}_p, \bar{d}_p) | \bar{x}_p \in R^I, \bar{d}_p \in \{0,1\}^I\}, p \in \overline{1, P},$$

де $\bar{x}_p$ – p -й нормований навчальний вхідний вектор,

$\bar{d}_p$ – p -й навчальний вихідний вектор,

I – кількість вхідних змінних,

P – потужність навчальної множини.

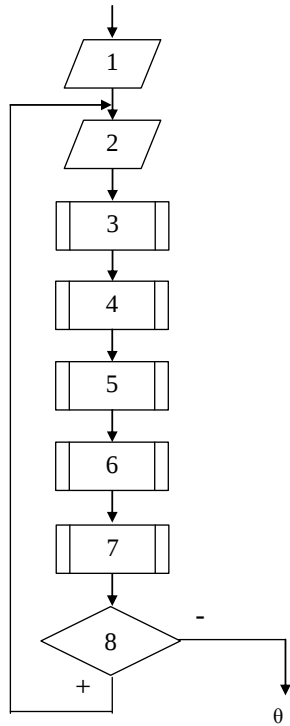


Рисунок 2. Блок-схема алгоритму ідентифікації параметрів математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі динамічного управління буфером запасів на основі методу зворотного поширення в пакетному режимі

3. Обчислення вихідного сигналу за моделлю (1) або (2), використовуючи ZP ниток, які згруповані в Z блоків. Кожна нитка обчислює y_{pz} .

4. Обчислення енергії помилки на основі критерію (3), використовуючи ZP ниток,

які згруповані у Z блоків. У кожному блоці, враховуючи паралельну редукцію, обчислюється часткова сума з P елементів виду $\frac{(y_{pz} - d_{pz})^2}{2P}$. Часткові суми, отримані у кожному блоці, складаються.

5. Налаштування ваги правил, використовуючи KP ниток, які згруповані в K блоків. У кожному блоці на основі паралельної редукції обчислюється сума із P елементів виду $\frac{\mu_{A_r}(\bar{x}_p)\delta_{pz}}{P}$.

6. Налаштування параметрів m_{il} функції належності, використовуючи IP ниток, які згруповані в I блоків. У кожному блоці на основі паралельної редукції обчислюється сума із P елементів виду $\frac{\partial \mu_{A_{ij}}}{\partial m_{il}} \sum_{r=1}^K w_{il}^r \text{Id}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz})$ для моделі (1)

або $\frac{\partial \mu_{A_{ij}}}{\partial m_{il}} \sum_{r=1}^K w_{il}^r \text{ReLU}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz})$ для моделі (2).

7. Налаштування параметрів σ_{il} функції належності, використовуючи IP ниток, які згруповані в I блоків. У кожному блоці на основі паралельної редукції обчислюється сума із P елементів виду $\frac{\partial \mu_{A_{ij}}}{\partial \sigma_{il}} \sum_{r=1}^K w_{il}^r \text{Id}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz})$ для моделі (1)

або $\frac{\partial \mu_{A_{ij}}}{\partial \sigma_{il}} \sum_{r=1}^K w_{il}^r \text{ReLU}'(s_{pr}^{(2)}) \sum_{z=1}^Z (w_r^z \delta_{pz})$ для моделі (2).

8. Перевірка умови завершення. Якщо $E > \varepsilon$, то $n=n+1$, перехід до 3.

Результати дослідження. Чисельне дослідження запропонованих математичних моделей штучної нейро-нечіткої мережі та звичайного багатошарового перцептрона проводилося в пакеті Matlab з використанням Deep Learning Toolbox (для ідентифікації параметрів моделі багатошарового перцептрона на основі зворотного поширення), Fuzzy Logic Toolbox (для ідентифікації параметрів запропонованої моделі штучної нейро-нечіткої мережі (1) та (2) на основі зворотного поширення).

У таблиці 1 наведено обчислювальні складності, середньоквадратичні помилки (Mean Square Error, MSE), ймовірності прийняття неправильних рішень з динамічного управління буфером запасів, отримані на основі набору даних логістичної компанії «Ecol Ukraine» за допомогою штучної нейронної мережі типу багат шаровий перцептрон (MLP) та нейронна мережа з радіально-

базисними функціями (RBFNN) зі зворотним поширенням (BP), та запропонованих моделей (1) та (2) зі зворотним поширенням (BP). При цьому MLP мав два приховані шари (кожен складався з шести нейронів, як і вхідний шар), RBFNN мала один прихований шар з 12 нейронів, P – потужність навчальної множини, N – кількість виконаних ітерацій.

Таблиця 1. Обчислювальна складність, середньоквадратична помилка, ймовірність прийняття неправильних рішень щодо динамічного управління буфером запасів

Модель та метод ідентифікації параметрів	MSE	Ймовірність прийняття неправильного рішення	Обчислювальна складність
MLP з BP з логістичною функцією активації без використання CUDA	0.50	0.20	$T=PN$
RBFNN з BP в пакетному режимі з функцією активації Гауса без використання CUDA	0.40	0.15	$T=PN$
Авторська модель (1) з BP в пакетному режимі з логістичною функцією належності з використанням CUDA	0.10	0.07	$T=N$
Авторська модель (2) з BP в пакетному режимі з логістичною функцією належності з використанням CUDA	0.20	0.10	$T=N$

Обговорення результатів. На основі проведених експериментів було встановлено, що:

1. Для збільшення буфера запасів на 1/3 необхідно, щоб виконувалася хоча б одна з двох умов:

– глибина перебування у червоній зоні буфера запасів становила щонайменше половину цієї зони, тобто кількість запасів не більша за половину цієї зони (параметри функції належності $m_{11} \approx x_1^{\min} + \frac{x_1^{\max} - x_1^{\min}}{6}$, $\sigma_{11} \approx -0.05$, де $x_1^{\min}$ – мінімальна кількість запасів товару (межа між чорною та червоною зонами буфера запасів), $x_1^{\max}$ – максимальна кількість запасів товару (межа між зеленою та синьою зонами буфера запасів));

– тривалість знаходження у червоній зоні буфера запасів становила щонайменше чотири дні (параметри функції належності $m_{21} \approx 4$, $\sigma_{21} \approx 0.05$).

2. Для зменшення буфера запасів на 1/3 необхідно, щоб тривалість знаходження в зеленій зоні буфера запасів становила не менше чотирьох днів (параметри функції належності $m_{31} \approx 4$, $\sigma_{31} \approx 0.05$).

Відповідно до даних таблиці 1 найкращі результати дає модель (1) з ідентифікацією параметрів на основі зворотного поширення (BP).

На основі проведених експериментів можна зробити наступні висновки.

MLP та RBFNN мають у прихованому шарі функції активації лише одного типу (логістичну та Гауса відповідно), що знижує точність класифікації.

Кількість нейронів у прихованому шарі MLP та RBFNN не автоматизована і визначається емпіричним шляхом, що знижує точність класифікації та швидкість ідентифікації параметрів моделі.

Запропоновані моделі дозволяють усунути ці недоліки.

Висновки:

1. Для вирішення проблеми підвищення ефективності динамічного управління буфером запасів було досліджено відповідні методи штучного інтелекту. Ці дослідження показали, що на сьогоднішній день найефективнішим є використання штучних нейронних мереж у поєднанні з системою нечіткого виведення.

2. Новизна дослідження полягає в удосконаленні методу динамічного управління буфером запасів, який, на відміну від існуючих, використовує нечітку логіку та штучні нейронні мережі, що забезпечує представлення знань про управління буфером запасів у вигляді правил з лінгвістичними конструкціями, які є легкодоступними для розуміння людиною; зменшує обчислювальну складність,

середньоквадратичну помилку та ймовірність прийняття неправильного рішення за рахунок автоматичного вибору структури моделі, зменшення ймовірності попадання в локальний екстремум та використання технології паралельної обробки інформації для зворотного поширення в пакетному режимі.

3. Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований метод нейро-нечіткого динамічного управління буфером запасів за рахунок використання нечіткої логіки та штучних нейронних мереж забезпечує ймовірність неправильного прийняття рішень з динамічного управління буфером запасів 0.07, а середньоквадратичну помилку – 0.10.

4. Подальшими перспективами дослідження є використання запропонованого методу нейро-нечіткого динамічного управління буфером запасів для різних інтелектуальних систем управління динамічними об'єктами природною мовою.

Список використаних джерел / References

- [1] U. P. Nagarkatte and N. Oley, *Theory of Constraints and Thinking Processes for Creative Thinkers: Creative Problem Solving*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.
- [2] B. Sproull, *Theory of Constraints, Lean, and Six Sigma Improvement Methodology: Making the Case for Integration*. London: CRC Press, 2019.
- [3] J. F. Cox, and J. G. Schleher, *Theory of Constraints Handbook*. New York, NY: McGraw-Hill, 2010.
- [4] E. M. Goldratt, "My saga to improve production", *Selected Readings Constraints Management*. Falls Church, VA: APICS, 1996, pp. 43-48.
- [5] E. M. Goldratt, *Production: The TOC Way*. MA: North River Press, 2003.
- [6] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, *Introduction to Neural Networks using Matlab 6.0*. New Delhi: The McGraw-Hill Comp., Inc., 2006.
- [7] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2009.
- [8] K.-L. Du, and K. M. S. Swamy, *Neural Networks and Statistical Learning*. London: Springer-Verlag, 2014.
- [9] E. Fedorov, O. Nechyporenko, and T. Utkina, "Forecast method for natural language constructions based on a modified gated recursive block", *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2604, pp. 199-214, 2020.
- [10] Z. Zhang, Z. Tang, and C. Vairappan, "A novel learning method for Elman neural network using local search", *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 181-188, 2007.
- [11] R. Dey, and F. M. Salem, "Gate-variants of gated recurrent unit (GRU) neural networks", *Circuits, Systems, and Neural Networks (CSANN) LAB, Department of Electrical and Computer Engineering Michigan State University, East Lansing, USA, Tech. Report. MI 48824-1226*, arXiv: 1701.05923, 2017.
- [12] K. Cho, B. van Merriënboer, C. Gulcehre, F. Bougares, H. Schwenk, and Y. Bengio, "Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation", in *Proc. Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2014, pp. 1724-1734.
- [13] H. Jaeger, W. Maass, and J. C. Principe, "Special issue on echo state networks and liquid state machines", *Neural Networks*, vol. 20, no. 3, pp. 287-289, 2007.
- [14] A. H. S. Hamdany, R. R. O. Al-Nima, and L. H. Albak, "Translating cuneiform symbols using artificial neural network", *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 19, no. 2, pp. 438-443, 2021.
- [15] A. Rotshtein, S. Shtovba, and I. Mostav, "Fuzzy rule based innovation projects estimation", in *Proc. Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS Int. Conf.*, 2001, pp. 122-126.
- [16] G. P. Reddy, Y. Deepika, K. S. Prasad, and Dr. G. K. Kumar, "Fuzzy logics associated with neural networks in the real time for better world", in *Proc. Int. Conf. on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing (ICAAMM)*, 2017, pp. 8507-8516.
- [17] V. T. Yen, Y. N. Wang, and P. V. Cuong, "Recurrent fuzzy wavelet neural networks based on robust adaptive sliding mode control for industrial robot manipulators", *Neural Computing and Applications*, vol. 31, no. 11, pp. 6925-6958, 2019.
- [18] H. Das, B. Naik, and H. S. Behera, "Medical disease analysis using neuro-fuzzy with feature extraction model for classification", *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 18, no. 100288, pp. 1-12, 2020.

E. E. Fedorov, *Dr. Tech. Sc., Professor*,
e-mail: fedorovee75@ukr.net

O. V. Nechyporenko, *Ph. D., Associate Professor*
e-mail: o.nechyporenko@chdtu.edu.ua
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

METHOD OF DYNAMIC MANAGEMENT OF INVENTORY BUFFER BASED ON SOFT CALCULATIONS

Currently, more and more companies seek to improve and optimize their business processes based on the implementation of the technology of the theory of constraints, which provides dynamic management of the inventory buffer and is used to manage supply chains. As a result, the relevance of the development of methods of intellectualization of the technology of the theory of constraints is increasing significantly. To date, there are no computer systems for dynamic management by the inventory buffer, which are based on soft calculations.

The aim of the work is to improve the efficiency of dynamic management of the inventory buffer by means of an artificial neuro-fuzzy network, which is trained on the basis of the back-propagation method.

In order to solve the problem of increasing the efficiency of the dynamic management of the inventory buffer, appropriate methods of artificial intelligence were investigated. Research data has shown that the most effective method today is the use of artificial neural networks in combination with a fuzzy inference system.

The paper proposes a method of dynamic management of the inventory buffer based on soft calculations. The novelty of the research is that for dynamic management of the inventory buffer a method based on fuzzy logic and an artificial neural network, and also two models of artificial neuro-fuzzy network of the dynamic management of the inventory buffer have been created, three criteria for evaluating the effectiveness of the proposed models have been selected, the parameters of the proposed models based on the method of back propagation in batch mode, oriented on the technology of information parallel processing, have been identified.

As a result of numerical study, it is established that the proposed method of neuro-fuzzy dynamic management of the inventory buffer provides a probability of incorrectly made decisions regarding the dynamic management of the inventory buffer of 0.07, and a root mean square error of 0.10.

The proposed models and procedures for their parametric identification allow to increase the speed, accuracy and reliability of decision-making. The proposed method of dynamic management of the inventory buffer based on soft calculations can be used in various intelligent systems.

Keywords: theory of constraints, artificial neural network, fuzzy inference systems, CUDA technology.

[0000-0002-6154-8411] **A. A. Sysoienko**, Ph. D. Student,

e-mail: Ampere859@gmail.com

[0000-0002-0009-337X] **S. V. Sysoienko**, Ph. D., Associate Professor

e-mail: s.sysoienko@chdtu.edu.ua

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

METHOD FOR MINIMIZATION OF BOOLEAN FUNCTIONS WITH A LARGE NUMBER OF VARIABLES BASED ON DIRECTED ENUMERATION

The development of computer technology directly depends on the development of methods for synthesizing components of digital computer technology, therefore the automation of the process is observed in the development of microcircuits. Boolean algebra is widely used for the synthesis of circuit models, and one of the problems in this case is the dependence of the complexity of implementing a given circuit on the number of variables of the Boolean function that implements it. Based on this, it can be argued that the increase in the number of variables in the functions that require minimization requires the search for new or improvement of existing methods of minimization of Boolean functions, which will be easy to use, descriptive and have the ability to automate the implementation of the minimization process.

The task of developing effective methods of minimization of Boolean functions for simulation of circuits with linear and polynomial dependence of simulation speed on the number of variables of the implemented Boolean function remains relevant.

The object of research is the process of minimization of Boolean functions, which are used in the construction of circuits of digital automata.

The purpose of this work is practical implementation of the method of minimization of Boolean functions based on directed enumeration when increasing the number of variables.

The objective considered in this work is to develop and implement the method of minimization of Boolean functions, which will help to minimize Boolean functions based on directed enumeration, the bitness of which exceeds ten variables, as well as to increase the efficiency of search when bonding implicants with a large uncertainty in the sets of functions. Since all existing methods of minimization face the problem of cumbersome calculations when the number of variables increases, the method of directed enumeration, which is quite effective in the case of large uncertainty in the sets, has been chosen for the study. Based on the calculations, it has been determined that this method of minimization of Boolean functions is efficient and easy to use. Its main advantage is the possibility of implementation by means of computer technology, and directed enumeration as the basis can reduce the requirements for hardware and software resources of automated design systems.

Keywords: *method of minimization, Boolean functions, set of function values, directed enumeration.*

Introduction. The use of algorithms that operate on Boolean structures is typical for solving many applied problems, for example, the study of the operation of circuits consisting of functional elements that can be used to describe the mathematical model of the operation of any computer, minimization of disjunctive normal forms, the problem about the feasibility of the Boolean function, the problem about the absence of tautologies, the problem about the completeness of the set of connections and many others

[1]. The rapid development of computer technology has led to the fact that most calculations related to various spheres of human activities are carried out automatically with the help of modern computers. Since the development of computer technology directly depends on the development of methods for synthesizing components of digital computer technology, the automation of the process is also observed in the development of microcircuits. The main work in the development and debugging is allocated to work with the cir-

cuit model, and only after that physical synthesis takes place. Boolean algebra is used for the synthesis of circuit models, that is, circuits are described using analytical expressions of logical functions. One of the problems that arise during the synthesis of circuits is the dependence of the volume (complexity of implementation) of the circuit on the number of variables of the Boolean function that implements it.

One logical function can be described by a set of equivalent representations in the form of logical formulas. It is known that any logical formula can be transformed into a disjunctive normal form (DNF). For this, for example, one needs to use the law of double negation, de Morgan's law, and the law of distributivity.

The disadvantage of the methods for obtaining the functions of a perfect DNF (or a perfect KNF) can be considered that when ensuring, in general, the correct functioning of the devices, the resulting circuits are often unreasonably complex. They require a large number of logical elements and have low efficiency. It is clear that the simpler is the analytical expression of the function, the more economical and simpler is its practical implementation on integrated microcircuits. That is why, when describing, it is necessary to obtain such a version of the formula, so that the logical function has the simplest representation of the logical function. After all, the compactness of the circuit directly depends on the simplicity of the formula of the logical function, and only in this case it is possible to obtain it with the best indicators of implementation complexity. In most cases, it is possible to simplify the logical expression without changing the function. The methods for simplifying a function are called the methods of minimizing functions.

Minimization means the transition from a perfect DNF to a DNF with a minimum of components, while the number of multipliers in each component should also be minimal, that is, it's necessary to reduce the number of variables and operations in the DDNF as much as possible.

There are quite a lot of minimization methods today, both analytical and graphical ones: the method of direct transformations of logical functions, the method of undefined coefficients, the Quine method, the Quine-McCluskey method, the graphical method, Karnaugh maps,

Veitch maps [2]. All of them have advantages and disadvantages, especially depending on the possibility of automating the process of their implementation and the number of variables in the functions to be minimized. At the same time, none of them is universal.

Therefore, the problem of minimization of the Boolean function is the most important stage of the logical synthesis of discrete devices. In the general formulation, the problem of minimization of Boolean functions has not yet been solved, but it is quite well researched in the class of disjunctive-conjunctive normal forms.

Based on this, it can be argued that the increase in the number of variables in the functions that require minimization requires the search for new or improvement of existing methods of minimization of Boolean functions, which will be easy to use, descriptive and have the ability to automate the implementation of the minimization process.

Analysis of recent research sources.

Quite a lot of modern research is devoted to the search for new and improvement of existing methods of minimization of Boolean functions, because this problem is relevant even today when synthesizing the models of digital devices to achieve the minimum complexity of their construction. In particular, one of the ways to implement new effective methods of minimization of Boolean functions is their representation in new forms. For example, in [3, 4] it is proposed to implement logical functions in an orthogonal form, which is considered as a promising direction for the development of Boolean algebra, and in [5, 6] the possibility of applying integer mathematical programming to minimization of Boolean functions is considered. When considering Boolean functions, typical of circuits that implement arithmetic operations, the gain is even greater. In addition, AND/EXOR circuits are easier to diagnose [7, 8]. The proposed method of minimization of 5-bit Boolean functions has a number of features for solving the problem of minimization of the logical function [8].

In [10], a description of a new method for minimizing Boolean functions in an orthogonal form of representation and obtaining a minimal DNF by step-by-step parallel decomposition of Boolean functions into an orthogonal form of representation is given during the allocation of

argument numbers to the basic and informational parts, respectively. It is shown that the proposed method of minimization of Boolean functions in an orthogonal form isn't inferior to the generally accepted methods of minimization by the implementation complexity factor and has the advantage that there is no need to perform additional minimization of intermediate results.

In addition, methods such as minimization by parts [11] and parallelization [12, 13] are widely used for minimization of Boolean functions, especially with a large number of variables.

To date, all possibilities for increasing the stability of cryptographic systems based on the use of logical operations (Boolean functions) of cryptographic transformation have not been exhausted. Cryptotransformation operations built on the basis of logical functions deserve special attention [14-15].

Although powerful studies have been conducted and promising results have been obtained regarding the methods of implementation of Boolean functions, the task of developing effective methods of minimizing Boolean functions for simulation of circuits with linear and polynomial dependence of simulation speed on the number of variables of the implemented Boolean function remains relevant.

The purpose and objectives of the research. The purpose of this work is practical implementation of the method of minimization of Boolean functions based on directed enumeration when increasing the number of variables.

Presenting main material. The method of minimization of functions based on directed enumeration is carried out as follows:

1. The truth table is sorted in ascending order by the values at which the function takes values of zeros and then ones. Thus, the table is divided into two subgroups.

2. The bitness of the truth table is determined and the number of contours of one variable is formed.

3. The presence of combinations of 0 and 1 in the formed contours of the 1st variable is checked.

4. There are three possible cases of distribution of 0 and 1 in the contour:

- the contour contains both zeros and ones;

- there are ones in the contour, but no zeros;
- there are zeros in the contour, but no ones.

5. The contour in which there are no zeros is written into the minimization formula and ones included in it are removed from the list (from the table). Variables and contours are deleted.

6. Recalculation of values in contours with one variable is performed again. If there are ones in the contour, but no zeros, then the search is repeated. If any other option occurs, then it is checked whether there are zeros in the contour, but there are no ones. If there are zeros and no ones, then contours that do not have ones are removed from the list.

7. The next step is to construct contours based on two variables.

8. Contours are built with a bitness equal to the number of variables. Recalculation takes place according to the algorithm described above.

The specificity of this method is that its greatest efficiency is achieved with a large number of undefined values on certain sets of the function.

Example 1. Let's consider the case of minimization of a f_1 Boolean function in four variables with a given option of values (Table 1).

Table 1. Sorted truth table of the f_1 function

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1
0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0
2	0	1	1	0	0
3	1	1	1	0	0
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	1
6	0	1	0	1	1
7	1	0	0	1	1
8	1	0	1	0	1
9	1	1	0	0	1
10	1	1	0	1	1
11	1	1	1	1	1

First, let's sort this truth table by the value of the f_1 function in the sets. Next, let's count the number of corresponding contours and enter the obtained values in Table 2.

Table 2. **One-variable contours for the f_1 function**

	0	1	1
1 x_1	1	5	2
2 $\bar{x}_1$	3	3	0
3 x_2	2	4	1
4 $\bar{x}_2$	2	4	1
5 x_3	4	2	2
6 $\bar{x}_3$	0	6	0
7 x_4	3	5	1
8 $\bar{x}_4$	1	3	1

As a result, we have that the number of zeros in the $\bar{x}_3$ contour is zero, and the number of ones is the maximum. Therefore, the resulting contour is removed from further calculations and is written into the minimal disjunctive normal form (MDNF) of the function.

Let's delete in Table 2 the lines on which the value of the sets coincides with the value of the minimized contour for one $\bar{x}_3$ variable (Table 3).

Table 3. **Deletion of rows in the truth table of the f_1 function**

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1
0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0
2	0	1	1	0	0
3	1	1	1	0	0
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	1
6	0	1	0	1	1
7	1	0	0	1	1
8	1	0	1	0	1
9	1	1	0	0	1
10	1	1	0	1	1
11	1	1	1	1	1

After deletion of lines and recalculating the contours (Table 3), in which the f_1 function

takes the value of one, we remove $\bar{x}_1$ from further use, since there are no more ones left in it.

Let's form two-variable contours for the f_1 function (Table 4).

Table 4. **Two-variable contours for the f_1 function**

	0	1	1
1 x_1x_2	1	1	0
2 $x_1\bar{x}_2$	0	1	0
3 x_1x_3	1	2	0
4 x_1x_4	0	1	0
5 $x_1\bar{x}_4$	0	0	0
6 x_2x_3	2	1	0
7 x_2x_4	0	1	0
8 $x_2\bar{x}_4$	2	0	0
9 $\bar{x}_2x_3$	2	1	0
10 $\bar{x}_2x_4$	1	0	0
11 $\bar{x}_2\bar{x}_4$	1	1	0
12 x_3x_4	1	1	0
13 $x_3\bar{x}_4$	3	1	0

Thus, after minimization and recalculation of values, we have that MDNF functions $f_1 = \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1x_2 \vee x_1x_4$ or $f_1 = \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1x_2 \vee x_2x_4$.

Since the method of minimization of Boolean functions by directed enumeration allows to minimize functions with an arbitrary number of variables, let's consider an example of minimization of six-variable Boolean function (Table 5).

Table 5. **Six-variable truth table for the f_2 function**

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	f_2
0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	0	0	1	0	1	0
3	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	1	0	0	1	1
6	0	0	1	0	1	0	1
7	0	0	1	1	0	1	1
8	0	0	1	1	1	0	1

Example 2. Using the values of Table 5, let's form the contours for the one-variable f_2 function (Table 6) and calculate the correspondence between the values of the truth table and one-variable contours for the sets in which the f_2 function takes a zero value and sets in which the function takes a one value.

As a result of the calculations, we have that x_1 and x_2 contours count zero values in the truth table, therefore they are removed from further consideration and do not participate in the formation of two-variable contours, and the x_3 contour is included in the MDNF f_2 function, therefore it also does not participate in the formation of two-variable contours.

The lines covered by the contour are also deleted from the truth table (Table 7).

Table 6. One-variable contours for the f_2 function

		0	1	1
1	x_1	0	0	0
2	$\bar{x}_1$	4	5	1
3	x_2	0	0	0
4	$\bar{x}_2$	4	5	1
5	x_3	0	4	0
6	$\bar{x}_3$	4	1	1
7	x_4	2	2	0
8	$\bar{x}_4$	2	3	1
9	x_5	3	2	0
10	$\bar{x}_5$	1	3	1
11	x_6	2	3	1
12	$\bar{x}_6$	2	2	0

Table 7. Deletion of rows from the truth table of the f_2 function

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	f_2
0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	0	0	1	0	1	0
3	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	1	0	0	1	1
6	0	0	1	0	1	0	1
7	0	0	1	1	0	1	1
8	0	0	1	1	1	0	1

After deletion of rows and columns in the truth table, we recalculate the contours where the function has a one value (Table 8).

Table 8. Truth table of the f_2 function after deletion

No.	x_1	x_2	x_4	x_5	x_6	f_2
0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0
2	0	0	1	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	1	1

It is obvious that x_4 , x_5 and $\bar{x}_6$ contours do not participate in the formation of two-variable contours, so we form two-variable contours from such one-variable ones: $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$, $\bar{x}_5$, x_6 (Table 9).

Table 9. Two-variable contours for the f_2 function

		0	1	1
1	$\bar{x}_1\bar{x}_2$	4	1	0
2	$\bar{x}_1\bar{x}_4$	2	1	0
3	$\bar{x}_1\bar{x}_5$	1	1	0
4	$\bar{x}_1x_6$	2	1	0
5	$\bar{x}_2\bar{x}_4$	2	1	0
6	$\bar{x}_2\bar{x}_5$	1	1	0
7	$\bar{x}_2x_6$	2	1	0
8	$\bar{x}_4\bar{x}_5$	0	1	0
9	$\bar{x}_4x_6$	1	1	0
10	$\bar{x}_5x_6$	1	1	0

Research results. The obtained method provides a positive effect due to the processing of the amount of information greater than the length of the key sequence.

The number of transformation functions in the sets is selected taking into account the bitness of command codes and the bitness of the information being converted. At the same time, the sequence of functions in the sets and their number can additionally provide an increase in the confidentiality of the information transcoding process and guarantee the implementation of requirements for high-speed access.

To quantitatively assess the efficiency of access to information based on the implementation of the developed method, it is proposed to measure the time of cryptographic transcoding in the number of operations of cryptographic addition. A standard cryptosystem provides transcoding during the time of key formation and the time of one cryptographic addition operation. The device provides transcoding in four cryptographic addition operations and the time of key formation.

Calculations of cryptographic transcoding time under the condition of using a four-bit device are presented in Table 10.

Table 10. Calculations of cryptographic transformation time

Time of key sequence acquisition	Cryptographic transcoding time (in the number of cryptographic addition operations)					
	standard	proposed	standard	proposed	standard	proposed
2	6	8	12	8	24	12
4	10	12	20	12	40	16
6	14	16	28	16	56	20
8	18	20	36	20	72	24
10	22	24	44	24	88	28
12	26	28	52	28	104	32
	2 bits		4 bits		8 bits	
	Increase of the amount of information					

Since a four-bit cryptographic transformation device is used, we can simultaneously process 2-4 bits of information. When processing 6-8 bits of information, the device will process it in two cycles of operation, 12-16 bits of information – in three cycles of operation, etc.

The results of evaluating the efficiency of cryptographic transformation of information when implementing the developed method under

the condition of using a four-bit information transcoding device are shown in Figure 1.

In Figure 1, we have the following designations:

- 0R – standard coding system;
- 1R – system with 2-bit data transformation;
- 2R – system with 4-bit data transformation;
- 4R – system with 8-bit data transformation.

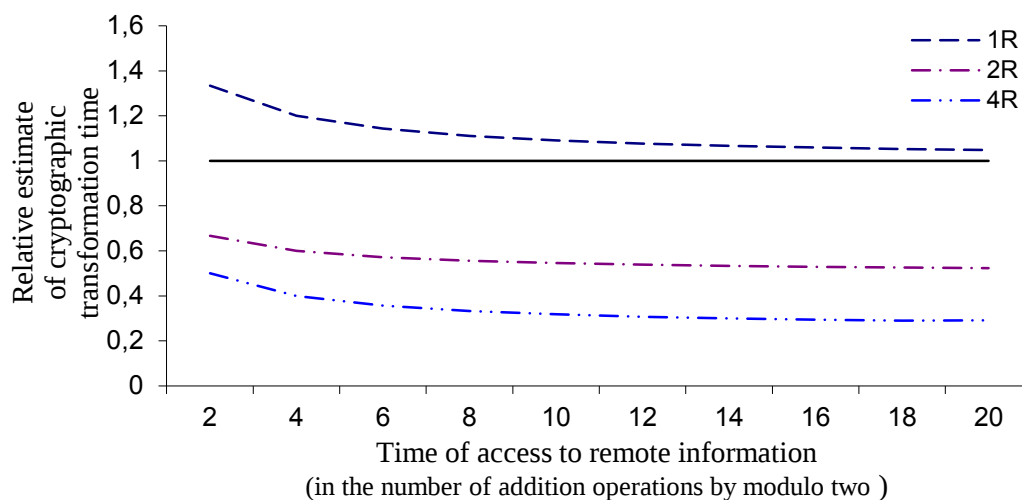


Figure 1. Dependence of the relative estimate of cryptographic transcoding time on the time of access to protected remote information

From the graph shown in Figure 1, it can be seen that the relative estimate of cryptographic transcoding time depends on the amount of processed information and the time of obtaining the key sequence.

Taking into account the calculations of the cryptographic transformation time (Table 10) and the dependence of the relative estimate of cryptographic transcoding time on the time of access to protected remote information (Figure 1), we can confidently conclude that the application of this method allows to increase the speed of access to confidential information from 1.65 up to 3.1 times depending on the key acquisition time and transformation bitness.

Discussion of the result. After counting the contours in this truth table (Table 9), we have found that the $\bar{x}_4\bar{x}_5$ contour at zero value of the function occurs zero times, therefore, it is included in the MDNF of f_2 function.

After deletion of the line covered by the $\bar{x}_4\bar{x}_5$ contour and recalculation of values in the sets in which the function takes the values of one, we have that the $\bar{x}_4\bar{x}_5$ contour has covered all the remaining sets. Therefore, the number of obtained contours is zero, and so the construction of three or more variable contours does not make sense. Consequently, we have obtained MDNF of the $f_2 = x_3 \vee \bar{x}_4\bar{x}_5$ function.

The performed calculations have confirmed the efficiency and simplicity of applying the method of minimization of Boolean functions based on directed enumeration with the number of variables 4 and 6. Moreover, the use of this method of finding MDNF of a function makes it possible to reduce the requirements for software and hardware of automated systems of discrete device design due to the simplicity of implementation of the directed enumeration algorithm, which is the basis of the proposed method.

Conclusions. Therefore, the conducted research on the implementation of the method of minimization of Boolean functions based on directed enumeration makes it possible to affirm that the considered method shows effective results when increasing the number of undefined values in certain sets of functions, which makes it possible to reduce the time of access to confidential information resources from 1.65 to 3.1 times depending on the time of obtaining the key sequence and the transformation bitness.

The implemented method based on directed enumeration has shown the correctness of its use when minimizing Boolean functions with an increased number of variables, and the simplicity of the directed enumeration algorithm allows for its technical implementation on computer equipment. In further scientific research, this method will be used to solve the problem of construction of a discrete model of pseudorandom sequence synthesis using available computing equipment and checking the possibility of increasing the stability of pseudorandom sequences built on the basis of operations of cryptographic transformation to linear cryptanalysis.

References

- [1] V. H. Babenko, "A method of increasing the speed of information protection systems based on the use of specialized logical functions", Ph. D. thesis: 05.13.21, Cherkasy, 2009 [in Ukrainian].
- [2] IT journal of articles. [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/automata_theory/dfa_minimization.htm [in Ukrainian].
- [3] S. V. Burmistrov, and O. B. Piven, "The matrix method of parallel decomposition as a generalized method of minimization in the orthogonal form of representation", *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, no. 4 (21), pp. 151-157, 2015 [in Ukrainian].
- [4] Yu. A. Kochkarev, I. I. Osipenkova, and E. N. Panasko, "Ortogonal forms of presentation of Boolean functions in device blocks", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, special issue, pp. 39-42, 2009.
- [5] V. F. Senchukov, and T. V. Denysova, "Minimization of Boolean functions by numbers of argument value sets", *Otkrytye informatsionnye i kompiuternye integrirovannyye tekhnologiyi: sci. papers*, Kharkiv: Nats. aerokosm. un-t "KhAI", iss. 83, pp. 156-167, 2019 [in Ukrainian].
- [6] V. F. Senchukov, and T. V. Denysova, "v-minimization of Boolean functions by distance matrix and reduction to a mathematical programming problem", *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii: coll. of sci. papers*, Kharkiv: Nats. aerokosm. un-t "KhAI", iss. 88, pp. 123-133, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.32620/oikit.2020.88.10.

- [7] Kh. Faraj, "Design error detection and correction system based on Reed-Muller matrix for memory protection", *Inter. J. of Computer Applications* (0975-8887), vol. 34, no. 8, pp. 42-55, Nov., 2011. [Online]. Available: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume34/number8/4123-5929>. doi: 10.5120/4123-5929.
- [8] M. T. Solomko, "Minimization of Boolean functions in polynomial and mixed bases by the method of image transformations", in *Twenty-third Int. Sci. and Pract. Seminar Combinatorial Configurations and Their Applications*, Zaporizhzhia-Kropyvnytskyi, May 13-15, 2021, pp. 168-174. [Online]. Available: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2021/conf/1.4/Petrenyuk_ISPS-23-proc.pdf [in Ukrainian].
- [9] V. Riznyk, and M. Solomko, "Research of 5-bit Boolean functions minimization protocols by combinatorial method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4 (2 (42)), pp. 41-52, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.140351>
- [10] Yu. A. Kochkarev, S. V. Burmistrov, and S. F. Aksenov, "Minimization of partially defined Boolean functions in an orthogonal form of representation", *Prikladnaya radioelektronika*, vol. 12, no. 3, pp. 423-430, 2013. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre_2013_12_3_8 [in Russian].
- [11] Yu. A. Kochkarev, S. V. Burmistrov, and S. F. Aksenov, "Minimization of Boolean functions by parts", *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, no. 4, pp. 110-115, 2012. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2012_4_18 [in Russian].
- [12] S. V. Burmistrov, "Parallel decomposition as the main method of minimizing Boolean functions in an orthogonal form of representation", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, pp. 67-73, 2014 [in Ukrainian].
- [13] S. V. Burmistrov, O. M. Panasco, and N. V. Kovalska, "A matrix method of parallel decomposition for the minimization of symmetric Boolean functions in the form of an extended polynomial", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 1, pp. 130-135, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2018.162604> [in Ukrainian].
- [14] T. V. Myronyuk, S. V. Sysoenko, V. G. Babenko et al., *Information Protection Based on Information-Driven Permutation Operations*: monograph, Cherkasy State Technol. Univ. Cherkasy, Ukraine: publisher Ye. I. Hordienko, 2021, pp. 103-164 [in Ukrainian]. ISBN 978-966-97302-2-0.
- [15] S. G. Semenov, and I. V. Myronets, "Improvement of the method of minimization of Boolean functions under the condition of information redundancy", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 3 (35), pp. 92-99, Poltava: PNTU, 2015 [in Ukrainian].

Список використаних джерел

- [1] В. Г. Бабенко, "Метод підвищення швидкодії систем захисту інформації на основі використання спеціалізованих логічних функцій", дис. канд. техн. наук: 05.13.21. Черкаси, 2009.
- [2] ІТ журнал статей. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.tutorialspoint.com/automata_theory/dfa_minimization.htm
- [3] С. В. Бурмістров, та О. Б. Півень, "Матричний метод паралельної декомпозиції як узагальнений метод мінімізації в ортогональній формі представлення", *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*: наук.-техн. журн., № 4 (21), с. 151-157, 2015.
- [4] Y. A. Kochkarev, I. I. Osipenkova, and E. N. Panasko, "Ortogonal forms of presentation of Boolean functions in device blocks", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, спецвип., с. 39-42, 2009.
- [5] В. Ф. Сенчуков, та Т. В. Денисова, "Мінімізація булевих функцій за номерами наборів значень аргументів", *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: науч. тр., Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", вып. 836 с. 156-167, 2019,
- [6] В. Ф. Сенчуков, та Т. В. Денисова, "v-мінімізація булевих функцій за матрицею відстаней та зведенням до задачі математичного програмування", *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*: зб. наук. пр., Харків: Нац. аерокосм. ун-т "ХАИ", вип. 88, с. 123-133, 2020. doi: 10.32620/oikit.2020.88.10.
- [7] Kh. Faraj, "Design error detection and correction system based on Reed-Muller matrix for

- memory protection", *Inter. J. of Computer Applications* (0975-8887), vol. 34, no. 8, pp. 42-55, Nov. 2011. [Online]. Available: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume34/number8/4123-5929>. doi: 10.5120/4123-5929.
- [8] М. Т. Соломко, "Мінімізація булевих функцій у поліномному та змішаному базисах методом образних перетворень", *Двадцять третій Міжнар. наук.-практ. семінар Комбінаторні конфігурації та їх застосування*, Запоріжжя-Кропивницький, 13-15 трав. 2021 р., с. 168-174. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&t/2021/conf/1.4/Petrenyuk_ISPS-23-proc.pdf
- [9] V. Riznyk, and M. Solomko, "Research of 5-bit Boolean functions minimization protocols by combinatorial method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4(2(42)), pp. 41-52, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.140351>
- [10] Ю. А. Кочкарев, С. В. Бурмистров, и С. Ф. Аксенов, "Минимизация частично-определенных булевых функций в ортогональной форме представления", *Прикладная радиоэлектроника*, т. 12, № 3, с. 423-430, 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prrr_2013_12_3_8
- [11] Ю. А. Кочкарев, С. В. Бурмистров, и С. Ф. Аксенов, "Минимизация булевых функций по частям", *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*, № 4, с. 110-115, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2012_4_18
- [12] С. В. Бурмистров, "Паралельна декомпозиція як основний метод мінімізації булевих функцій в ортогональній формі представлення", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 67-73, 2014.
- [13] S. V. Burmistrov, O. M. Panasco, & N. V. Kovalska, "Матричний метод паралельної декомпозиції для мінімізації симетричних булевих функцій у вигляді розширеного полінома", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 130-135, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2018.162604>
- [14] Т. В. Миронюк, С. В. Сисоєнко, В. Г. Бабенко та ін., *Захист інформації на основі операцій перестановок, керованих інформацією: монографія*, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси, Україна: видавець Гордієнко Є. І., 2021, с. 103-164. ISBN 978-966-97302-2-0.
- [15] С. Г. Семенов, та І. В. Миронець, "Вдосконалення методу мінімізації булевих функцій за умови інформаційної надлишковості", *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 3 (35), с. 92-99, Полтава: ПНТУ, 2015.

А. А. Сисоєнко, аспірант,
e-mail: Ampere859@gmail.com

С. В. Сисоєнко, канд. техн. наук, доцент
e-mail: s.sysoienko@chdtu.edu.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ БУЛЕВИХ ФУНКЦІЙ З ВЕЛИКОЮ КІЛЬКІСТЮ ЗМІННИХ НА ОСНОВІ НАПРАВЛЕНОГО ПЕРЕБОРУ

Розвиток обчислювальної техніки напряму залежить від розвитку методів синтезу компонентів цифрової обчислювальної техніки, тому автоматизація процесу спостерігається і при розробці мікросхем. Для синтезу моделей схем широко використовується булева алгебра і однією із проблем, що виникають при цьому, вважається залежність складності реалізації певної схеми від кількості змінних булевої функції, що її реалізує.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що збільшення кількості змінних у функціях, які потребують мінімізації, вимагає пошуку нових або вдосконалення існуючих методів мінімізації

булевих функцій, що будуть простими у застосуванні, наочними та матимуть можливість автоматизувати реалізацію процесу мінімізації.

Залишається актуальною задача розробки ефективних методів мінімізації булевих функцій для моделювання схем, що мають лінійну та поліноміальну залежність швидкості моделювання від кількості змінних булевої функції, що реалізується.

Об'єкт дослідження – процес мінімізації булевих функцій, які використовуються при побудові схем цифрових автоматів.

Метою роботи є практична реалізація методу мінімізації булевих функцій на основі направленого перебору при збільшенні кількості змінних.

Задача, яка розглядається в цій роботі, полягає в розробці та реалізації методу мінімізації булевих функцій, який дозволить мінімізувати булеві функції на основі направленого перебору, розрядність яких перевищує десять змінних, а також збільшити ефективність пошуку при склеюванні імплікант з великою невизначеністю на наборах функцій.

Оскільки всі існуючі методи мінімізації стикаються з проблемою громіздких обчислень при збільшенні кількості змінних, для дослідження було вибрано саме метод направленого перебору, який є досить ефективним при великій невизначеності на наборах.

На основі проведених розрахунків визначено, що розглянутий метод мінімізації булевих функцій дієвий та простий у застосуванні. Основною його перевагою є можливість реалізації засобами обчислювальної техніки, а покладений в основу направлений перебір дозволяє зменшити вимоги до програмно-апаратних ресурсів систем автоматизованого проектування.

Ключові слова: метод мінімізації, булеві функції, набір значень функції, направлений перебір.

[0000-0003-4816-4680] **В. В. Міхав**¹, аспірант,

e-mail: mihaw.wolodymyr@gmail.com

[0000-0001-8791-0063] **Є. В. Мелешко**¹, д-р техн. наук, професор,[0000-0001-6951-2002] **О. М. Дресв**¹, канд. техн. наук, доцент,[0000-0002-1596-4123] **А. О. Лавданський**², канд. техн. наук, доцент¹Центральноукраїнський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МОДЕЛЬ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ТИПУ P2P

У цій статті проведено дослідження алгоритмів роботи peer to peer мереж. Проведено порівняльний аналіз методів пошуку даних у централізованих, децентралізованих неструктурованих та децентралізованих структурованих однорангових мережах. Виявлено, що існуючі методи роботи однорангових мереж не застосовують для покращення пошуку даних рекомендаційної системи. Розроблено математичну модель рекомендаційної системи для децентралізованої P2P мережі з огляду на вподобання користувачів та кількість переходів до завантаження даних. Розроблено метод формування рекомендацій для користувачів комп'ютерної мережі типу peer to peer на основі запропонованої математичної моделі.

У P2P мережах виникає проблема індексації та пошуку файлів на різних пристроях мережі. З різних причин шукані файли можуть бути недоступні для користувача, навіть якщо вони були додані раніше до системи та проіндексовані. Наприклад, комп'ютери, що містять потрібний файл або таблиці маршрутизації до нього чи його частин, вийшли з мережі або застосовуються технології побудови P2P мережі з ймовірнісними методами пошуку, що не завжди знаходять далеко розташовані від комп'ютера користувача файли, тощо.

Рекомендаційні системи використовуються для побудови списків рекомендацій користувачам на основі їх попередніх дій, зокрема, лайків, оцінок, переглядів, скачувань тощо. Такі системи дозволяють полегшити пошук при великій кількості об'єктів у системі, доповнюючи класичну пошукову видачу рекомендаціями, а в деяких ситуаціях навіть заміняють пошук. Також рекомендаційні системи можуть застосовуватися для ранжування результатів класичного пошуку. Таким чином, вони можуть різними способами поєднуватися зі звичайними пошуковими алгоритмами. В P2P мережах застосування рекомендаційних систем може мати додаткову користь. Якщо користувач шукає конкретний файл, що був доданий до мережі раніше, і файл з різних причин не знайдено, можна надати користувачу список рекомендацій з огляду на його вподобання і, можливо, пошуковий запит.

Запропоновані у роботі модель та метод формування списків рекомендацій у peer to peer мережі розраховані на загальний випадок і не прив'язані до конкретного пошукового запиту, можуть застосовуватися у неструктурованих та структурованих P2P мережах для ознайомлення користувача з контентом, який йому може сподобатися, на основі прогнозування його вподобань. Це може збільшити загальний інтерес користувачів до контенту мережі.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, однорангові мережі, peer to peer, рекомендаційні системи, пошук даних.

Вступ. У цій роботі запропоновано математичну модель рекомендаційної системи для однорангової комп'ютерної мережі типу peer to peer.

P2P – це однорангові комп'ютерні мережі, що базуються на принципі рівноправності вузлів мережі і характеризуються тим, що

будь-які вузли можуть з'єднуватися між собою для надання послуг один одному, на відміну від традиційної архітектури, в якій лише окрема категорія учасників (сервери) може надавати певні сервіси іншим [1]. Відомими прикладами використання P2P мереж є торенти для обміну файлами та децентралізовані

блокчейн-платформи, включаючи Bitcoin, також їх можна використовувати для управління ресурсами в мережі IoT, паралельного програмування та машинного навчання, кешування даних та резервного копіювання [1-5]. У рамках цієї роботи розглядалося застосування P2P мереж для розподіленого зберігання та обміну даними.

У P2P мережах виникає проблема індексації та пошуку файлів на різних пристроях мережі [6-7], а алгоритмів рекомендаційних систем, орієнтованих на таку архітектуру, не було знайдено під час проведеного дослідження. Найближчий до рекомендаційних систем знайдений алгоритм – децентралізований інтелектуальний пошук, що використовує коефіцієнти подоби [6], але він призначений саме для пошуку.

Рекомендаційні системи будують списки рекомендацій користувачам на основі їх попередніх дій (лайків, оцінок, переглядів, скачувань тощо). Такі системи дозволяють полегшити пошук при великій кількості об'єктів, доповнюючи класичну пошукову видачу рекомендаціями, а в деяких ситуаціях навіть замінюють пошук, а також можуть застосовуватися для ранжування результатів пошуку. Таким чином, рекомендаційні системи можуть різними способами поєднуватися зі звичайними пошуковими алгоритмами.

В P2P мережах застосування рекомендаційних систем може надати додаткову користь. Оскільки в P2P мережах немає серверів, на яких зберігаються усі дані, а файли розподілені по всіх пристроях системи, то не завжди всі файли доступні. Отже, при пошуку файлів слід враховувати не тільки релевантність запиту, а й доступність файлів та швидкість їх завантаження. Рекомендаційні системи можуть запропонувати користувачу файли, що зможуть також зацікавити його і є доступними для швидкого завантаження у певний момент часу, якщо потрібний файл на цей момент недоступний. Також поєднання пошукової та рекомендаційної систем дасть змогу збалансувати результати пошукової видачі за кількома параметрами, а саме, релевантністю, доступністю, швидкістю завантаження, схожістю, рекомендованістю. Було вирішено побудувати математичну модель такої системи для подальшої розробки методів та алгоритмів на її основі, а також програмної моделі для тестування алгоритмів.

Мета та задачі дослідження. Метою цієї роботи є розробка математичної моделі рекомендаційної системи для однорангової комп'ютерної мережі типу peer to peer, яка має полегшити пошук даних у децентралізованих мережах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести дослідження існуючих методів роботи peer to peer мереж.

- Розробити математичну модель рекомендаційної системи для децентралізованої комп'ютерної peer to peer мережі.

- Розробити метод формування рекомендацій для користувачів peer to peer мережі на основі запропонованої математичної моделі.

Виклад основного матеріалу. Спочатку розглянемо відомі алгоритми індексації та пошуку даних у P2P мережах.

Технології P2P мереж можна розділити на такі три види:

- Централізована однорангова мережа.
- Неструктурована децентралізована однорангова мережа.
- Структурована децентралізована однорангова мережа.

Централізована однорангова мережа. Інформація про індекс файлів зберігається на центральному сервері, кожний дочірній вузол повинен підключатися до нього, щоб знайти ресурси. Найбільшою перевагою такого підходу є просте обслуговування і швидке індексування. Однак, оскільки вся мережа значною мірою залежить від центрального сервера, якщо він вийде з ладу – вся система стане непрацездатною. Тож виникає проблема «єдиної точки відмови». Прикладом такої мережі є файлообмінний клієнт BitTorrent [7, 8]. Для роботи з ним потрібен «трекер» (tracker) – спеціалізований сервер, що працює за протоколом HTTP [8]. Трекер потрібен для того, щоб клієнти могли знайти один одного. Фактично на трекері зберігаються IP-адреси, входні порти клієнтів та хеш-суми, що унікально ідентифікують об'єкти, які беруть участь у завантаженнях. За стандартом імена файлів на трекері не зберігаються, і дізнатися їх по хеш-сумах не можна. Однак на практиці трекер часто, крім своєї основної функції, виконує і функцію невеликого веб-сервера. Такий сервер зберігає файли метаданих і описи поширюваних файлів, надає статистику завантажень по різних файлах, показує поточну кіль-

кість підключених «пірів» (учасників файло-обміну) тощо. Для підвищення працездатності системи у BitTorrent допускається існування декількох трекерів.

Неструктурована децентралізована однорангова мережа. Цей тип мережі використовує алгоритм пошуку Flooding і транслює запит файлу, який потрібно знайти, усім вузлам мережі для будь-якого пошуку [1, 6]. Коли вузол хоче завантажити файл, він створює запит із назвою файлу або ключовим словом і надішле його усім вузлам, підключеним до нього. Якщо в цих вузлах є шуканий файл, встановлюється з'єднання з відповідним вузлом для завантаження. Якщо ні, запит продовжують пересилати на сусідні вузли, доки не буде знайдено розташування файлу. Типовий представник цього методу таких мереж – Gnutella рання версія. Слід зазначити, що, коли масштаб мережі стає дуже великим, цей метод пошуку почне викликати «шторм трансляції», який серйозно знизить пропускну здатність мережі. Хоча цей метод дозволяє уникнути проблеми «єдиної точки відмови» централізованих однорангових мереж, він все одно є дуже неефективним. Для усунення проблеми «шторму трансляції» було розроблено багато алгоритмів, але всі вони полягають у тому, що при пошуку файлу опитуються не всі вузли мережі, а тільки їх частина. Такі алгоритми знайдуть файл, який дійсно є в мережі, не завжди, але вони є певним компромісом між швидкістю роботи мережі й ефективністю пошуку даних. Найвідоміші з них [1, 6, 9, 10]:

– Метод широкого первинного пошуку (Breadth First Search, BFS) з додаванням до пошукового запиту параметра часу життя (Time-to-level, TTL). Параметр TTL визначає максимальну кількість переходів, якими можна пересилати запит. При типовому пошуку початкове значення для TTL становить зазвичай 5-7, яке зменшується щоразу, коли запит надсилається. Коли TTL дорівнює 0, повідомлення більше не передається.

– Метод випадкового широкого первинного пошуку (Random Breadth First Search, RBFS) було запропоновано як поліпшення «наївного» підходу BFS. У методі RBFS пошуковий запит пересилається лише частині вузлів мережі, вибраній у випадковому порядку. Якій саме частині вузлів – це параметр методу RBFS. Перевага RBFS полягає в тому, що не потрібна глобальна інформація про

стан контенту мережі; вузол може отримувати локальні рішення так швидко, як це потрібно. З другого боку, цей метод є ймовірнісним. Тому деякі великі сегменти мережі можуть бути недосяжними.

– Інтелектуальний пошуковий механізм (Intelligent Search Mechanism, ISM). Поліпшення швидкості й ефективності пошуку інформації за допомогою цього методу досягається за рахунок мінімізації витрат на зв'язки, тобто на кількість повідомлень, що передаються між вузлами, та мінімізації кількості вузлів, які опитуються для кожного пошукового запиту. Щоб досягти цього, для кожного запиту оцінюються лише ті вузли, які найбільше відповідають цьому запиту. Інтелектуальний пошуковий механізм складається з двох компонентів – профайлу (profile) та способу його ранжування, так званого рангу релевантності. Кожний вузол мережі будує інформаційний профайл для кожного із сусідніх вузлів. Профайл містить останні відповіді кожного з вузлів. За допомогою рангу релевантності здійснюється ранжування профайлів вузлів для вибору тих сусідніх, які надаватимуть найбільш релевантні документи на запит. Механізм профайлів використовується для того, щоб зберігати останні запити, а також кількісні характеристики результатів пошуку. При реалізації моделі ISM використовується єдиний стек запитів розміром $O(TN)$, в якому зберігається T запитів для N вузлів. Як тільки стек заповнюється, відбувається заміна «останнього найменш використовуваного» (Least Recently Used, LRU) для збереження останніх запитів. Функція «ранг релевантності» (Relevance Rank, RR) використовується вузлом P для виконання оперативної класифікації його сусідів та визначення тих, які слід опитувати першими за запитом q . Для обчислення рангу релевантності кожного вузла P P_i порівнює q з усіма запитами q_j у структурі профайлу, для якого відомий список відповідей на попередні запити, та обчислюється $RR(P_i, q)$:

$$RR(P_i, q) = \sum_{j \leq Q} Sim(q_j, q)^a \cdot S(P_i, q_j), \quad (1)$$

де Q – множина запитів q_j , на які була відповідь у вузла P_i , $j \leq Q$; $S(P_i, q_j)$ – кількість результатів, що повертаються вузлом P_i на запит q_j ; метрика Sim розраховується за правилом косинуса:

$$Sim(q_j, q) = \frac{q_j \cdot q}{|q_j| \cdot |q|} \quad (2)$$

і забезпечує вищий ранг вузла, який повертає більше результатів; параметр a – дозволяє збільшувати вагу запитів, найбільш подібних до поточного. Метод ISM ефективно працює у мережах, де вузли містять деякі спеціалізовані відомості. Зокрема у мережі Gnutella якість пошуку дуже залежить від «оточення» вузла, з якого задається запит. Ще одна проблема методу ISM полягає в тому, що пошукові повідомлення можуть зациклюватися, тому не в змозі досягти деяких частин мережі. Цю проблему можна вирішити, вибираючи невелику випадкову підмножину вузлів і додаючи до набору релевантних вузлів для кожного запиту, тоді механізм ISM став охоплювати більшу частину мережі.

– Методи «більшості результатів за минулою евристикою» (RES). В цих методах кожний вузол пересилає запит підмножині своїх вузлів, утворених на підставі деякої узагальненої статистики. Запит у методі RES є задовільним, якщо видається Z або більше результатів (Z – деяка стала). У методі RES вузол q пересилає запити до k вузлів, які видали найбільші результати останніх m запитів. Метод RES подібний до методу ISM, але використовує більш просту інформацію про вузли. Його головний недолік порівняно з ISM – відсутність аналізу параметрів вузлів, зміст яких пов'язаний із запитом. Тому метод RES характеризується швидше як кількісний, а не якісний підхід. RES хороший тим, що він маршрутизує запити у великі сегменти мережі (які, можливо, також містять більш релевантні відповіді). Він також захоплює сусідів, які менш перевантажені, починаючи з тих, котрі зазвичай повертають більше результатів.

– Метод «випадкових блукань» (Random Walkers Algorithm, RWA) полягає в тому, що кожний вузол випадково пересилає повідомлення із запитом, що називається «посилкою», одному зі своїх вузлів. Щоб скоротити час, необхідний на отримання результатів, ідея однієї «посилки» розширена до « k -посилок», де k – кількість незалежних посилок, послідовно запущених з пошукового вузла. Очікується, що « k -посилок» після T кроків досягне тих самих результатів, що й одна посилка за kT кроків. Цей алгоритм нагадує метод RBFS, але в RBFS кожний вузол пересилає повідомлення запиту частині з його сусідів. До того ж, в RBFS передбачається експоненційне збільшення повідомлень, що пере-

силаються, а в методі випадкових блукань – лінійне. Обидва методи – і RBFS, і RWA – не використовують жодних явних правил для того, щоб адресувати пошуковий запит до найбільш релевантного змісту.

– Метод «адаптивного ймовірнісного пошуку» (Adaptive Probabilistic Search, APS). В APS кожний вузол розгортає на своїх ресурсах локальний індекс, що містить значення умовних ймовірностей для кожного сусіда, який може бути обраний наступного переходу майбутнього запиту. Головна відмінність від RWA – те, що у APS вузол використовує зворотний зв'язок від попередніх пошуків (як умовних ймовірностей) замість цілком випадкових переходів. Тому метод APS часто дає кращі результати, ніж RWA.

Структурована децентралізована однорангова мережа. Нині найбільшого поширення набула структурована децентралізована мережа [11-14], тобто мережа на основі DHT (distributed hash table, розподілена хеш-таблиця) [14]. DHT використовує більш структурований метод маршрутизації на основі пар ключ-значення. Для кожного вузла мережі обчислюється хеш-значення, воно стає його ідентифікатором. Для кожного файлу, що треба розмістити у мережі, також обчислюється хеш-значення такою самою хеш-функцією (воно стає ключем файлу), після чого файл записується на вузол, ідентифікатор якого максимально близький до ключа файлу за певною метрикою відстані. Кожний вузол мережі зберігає власну таблицю маршрутизації у мережі, де міститься інформація про вузли, ідентифікатори яких максимально близькі до нього за обраною метрикою. Прикладом практичної реалізації є мережа I2P, файлообмінний клієнт iMule, криптовалюта Ethereum [1-5]. Слід зазначити, що в реальних системах у тій чи іншій формі сервери у системі все ж таки наявні, і DHT часто відіграє лише допоміжну функцію, тобто маршрутизація в мережі побудована не тільки на ній. Зокрема, в Ethereum DHT використовується лише як ефективний механізм вибору партнерів. На цей момент існують такі алгоритми роботи P2P мереж, що реалізують протокол DHT: Kademlia [15] і Chord [16], і серед них найчастіше використовується алгоритм Kademlia. Розглянемо принцип роботи алгоритму Kademlia. Хеш значення найчастіше обчислюється алгоритмом SHA-1, метрикою відстані є операція XOR.

Таблиця маршрутизації зберігається у вигляді так званих K-buckets. У кожному K-bucket вузла зберігається інформація про K вузлів мережі, чия відстань до нього знаходиться в межах інтервалу $[2^i, 2^{i+1})$. Протокол Kademlia містить чотири типи повідомлень: 1) PING – необхідний для перевірки існування конкретного вузла у мережі; 2) STORE запит, що дає змогу розмістити інформацію на заданому вузлі; 3) FIND_VALUE запит, що дозволяє знайти значення за ключем; 4) FIND_NODE запит, що використовується для пошуку найближчих K вузлів до заданого ідентифікатора (поведінка подібна до FIND_VALUE, тільки ніколи не повертає значення, завжди вузли).

На цей час усі три види технологій побудови P2P мереж використовуються.

Як показує дослідження, у P2P мережах з різних причин може бути відсутній доступ до шуканих файлів. У такому разі користувачу доречно надати список рекомендацій на схожі файли. Однак моделей та методів роботи рекомендаційних систем для P2P мереж в існуючих працях знайдено не було. Розглянемо можливість побудови рекомендаційної системи для P2P мереж різного типу.

Найпростіше побудувати рекомендаційну систему у централізованих однорангових мережах, оскільки там наявний сервер, через який проходить інформація про завантаження файлів. Отже, на основі статистики завантаження файлів різними користувачами можна побудувати рекомендаційну систему на колаборативній фільтрації. Її точність можна підвищити, якщо надати можливість користувачам оцінювати файли та зберігати оцінки на сервері.

Більш складною задачею є побудова рекомендаційної мережі для децентралізованих P2P мереж – як неструктурованих, так і структурованих. Оскільки сервери у таких системах відсутні, то кожний окремий комп'ютер буде самостійно розраховувати собі рекомендації на основі доступної йому інформації. Будемо вважати, що кожний комп'ютер системи містить інформацію про k найближчих (поняття та метрика визначення відстані залежать від конкретного алгоритму реалізації мережі) вузлів мережі, розташованих на них файлів та статистику завантажень (i , можливо, оцінки користувачів файлам). Також він може запитати інформацію у своїх «сусідів» про їх «сусідів», про яких йому не відомо, і т. д. Чим

більшою буде глибина запиту, тим більше буде інформації про наявні у мережі файли і тим точнішими будуть рекомендації, але й довшим час формування рекомендацій та більшою ймовірністю виникнення проблеми «шторму трансляцій». Отже, при формуванні списку рекомендацій слід враховувати не тільки подобу користувачів, а й кількість переходів до файлів у мережі.

Було запропоновано наступну математичну модель роботи рекомендаційних систем у peer-to-peer мережах. У моделі наявні такі елементи:

$f_{i,k}$ – наявний файл k в бібліотеці користувача i ;

f_k – файл k в системі, незалежно від наявності його у користувача;

F_i – множина завантажених файлів користувача i ;

F – множина всіх фізично наявних файлів, файли дублюються у різних користувачів;

D – множина всіх оцінок користувачів файлам у системі (замість оцінки можна використовувати, наприклад, факт завантаження файлу, тоді D може приймати значення $\{0, 1\}$);

D_i – множина оцінок файлам користувача i ; $d_{i,k}$ – оцінка користувачем i окремого файлу k , $d_{i,k} \in [-1..1]$;

$v_{i,j}$ – коефіцієнт схожості вподобань користувачів i та j ;

p_i – ймовірність наявності в мережі користувача i в довільний момент часу;

$e(i, k)$ – наявність файлу k у користувача i (1 або 0);

$c_k(i, j)$ – мінімальна кількість переходів, яку потрібно здійснити від користувача i до користувача j ;

$c(i, k)$ – мінімальна кількість переходів від користувача i до користувача, в якого наявний файл k ;

$U(k)$ – множина користувачів, які мають завантажений файл k ;

$|U|$ – потужність множини, кількість елементів у множині (Приклад: $|U(k)|$ – кількість представлень файлу k);

N – кількість користувачів.

Нехай користувач i не має у власних списках F_i та D_i файлу k : $e(i, k)=0$, але відомо що цей файл є у наявності у користувача j . Тоді пропонуємо використати такі величини для визначення необхідності рекомендувати цей файл поточному користувачу:

$c(i, j)>0$ – чим менше, тим краще, бо менший шлях до передавання інформації;

$v_{i,j}$ – чим більше, тим краще, бо більше шансів схожих вподобань у користувачів;

$d_{j,k}$ – чим більше, тим краще, бо файл оцінено як хороший користувачем j ;

$|U(k)|$ – популярність файлу, чим більше, тим краще, бо розподілене отримання файлу значно скоротить час його завантаження. Впливає на оцінювання не безпосередньо, бо зі збільшенням цього числа буде більша множина рекомендацій від «сусідів».

Вага рекомендації від користувача j становитиме

$$r(i, k, j) = \frac{v_{i,j} d_{j,k} p_j}{c(i, j)}. \quad (3)$$

Оцінкою швидкості завантаження файлу з одного джерела є:

$$t(i, k, j) \sim p_i p_j c(i, j), \quad (4)$$

де враховано ймовірність підключення до мережі двох користувачів одночасно та кількість сегментів, які потрібно подолати, щоб дістатися до файлу. Швидкість завантаження з групи джерел можна визначити наступним чином:

$$t(i, k) \sim \left(\sum_j^N \frac{e(j, k)}{p_i p_j c(i, j)} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Алгоритм визначення рекомендації:

1) Обираємо глибину аналізування $n > 0$.

2) Для обраної глибини знаходимо множину рекомендаційних ваг для користувача i за виразом

$$R_i = \bigcup_{k=1}^{|F|} R(i, k), \quad (6)$$

$$\text{де } R(i, k) = \sum_{j=1}^N r(i, k, j) \begin{cases} 1, & 1 \leq c(i, j) \leq n \\ 0, & c(i, j) > n \end{cases}.$$

3) Для користувача обираємо рекомендацію як $k_i = k \text{ of } \max(R_i)$. Якщо треба створити список рекомендацій, обираємо M найкращих і ранжуємо у порядку спадання значення R_i .

Підсилення або послаблення критерію рекомендації можна реалізувати коефіцієнтами $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, якщо скористатися наступним виразом розрахунку ваги рекомендації:

$$r(i, k, j) = \frac{v_{i,j}^\alpha d_{j,k}^\beta p_j^\gamma}{c(i, j)^\delta}. \quad (7)$$

Розглянемо різні випадки, при яких у P2P мережах може виникнути необхідність надання користувачу списків рекомендацій:

1) користувач нічого не шукає, а тільки зайшов у додаток $\rightarrow$ надаємо користувачу список рекомендацій з огляду на його вподобання.

2) користувач шукає конкретний файл, що був доданий до мережі раніше, за його ключем (хеш-значенням); файл не знайдено з різних причин (комп'ютери, що містять файл або таблиці маршрутизації до файлу, вийшли з мережі, застосовуються технології P2P з ймовірнісним методом пошуку, наприклад, неструктуровані мережі та RBFS тощо) $\rightarrow$ надаємо користувачу список рекомендацій з огляду на його вподобання і пошуковий запит.

3) користувач шукає файли за ключовими словами (залежно від практичної реалізації файлообмінні системи можуть містити таку функцію, якщо зберігають не тільки файли, а й ключові слова); хеш-значення ключових слів, представлених у запиті, не знайдено у мережі з різних причин $\rightarrow$ надаємо користувачу список рекомендацій з огляду на його вподобання та пошуковий запит. Або знайдено хеш-значення ключових слів, їм відповідає декілька різних файлів $\rightarrow$ формуємо пошукову видачу, ранжуємо список результатів рекомендаційною системою.

На основі запропонованої математичної моделі пропонується такий метод формування рекомендацій у P2P мережах для (1) випадку використання:

1-й етап. Збирається інформація з таблиць маршрутизації комп'ютерів користувача та його «сусідів» і їх «сусідів» з глибиною пошуку n . Необхідною інформацією є хеш-значення файлів, їх розташування і статистика завантажень (та оцінки користувачів за наявності).

2-й етап. На основі зібраної інформації для кожного файлу у створеному на кроці 1 списку обчислюється R_i за формулою (7) із запропонованої математичної моделі, але тільки для файлів, які поточний користувач раніше не завантажував.

3-й етап. Обираємо M файлів з найвищим значенням R_i та ранжуємо у порядку спадання цього значення.

4-й етап. Надаємо користувачу список рекомендованих файлів, сформований на кроці 3.

5-й етап. Зберігаємо шлях до рекомендованих файлів у таблиці маршрутизації на час t_x для швидкого їх пошуку на випадок, якщо протягом заданого проміжку часу користувач ними зацікавиться.

Результати досліджень. У роботі було розроблено математичну модель рекоменда-

ційної системи для децентралізованої P2P мережі з огляду на вподобання користувачів та кількість переходів до завантаження даних. Також розроблено метод формування рекомендацій для користувачів комп'ютерної мережі типу peer to peer на основі запропонованої математичної моделі.

Обговорення результатів. Запропонована математична модель рекомендаційної системи для децентралізованої P2P розрахована на випадок, коли користувачам слід надати загальні рекомендації, незалежно від їх пошукового запиту. Рекомендації базуються на прогнозуванні вподобань користувачів, вподобання прогнозуються на основі зібраної інформації про дії схожих користувачів у системі. Також при формуванні вподобань враховується кількість переходів до потрібної інформації, щоб оптимізувати час формування рекомендацій та завантаження файлів.

Висновки. У цій статті проведено дослідження існуючих алгоритмів роботи peer to peer мереж. Проведено порівняльний аналіз методів пошуку даних у централізованих, децентралізованих неструктурованих та децентралізованих структурованих однорангових мережах. Виявлено, що однорангові мережі не застосовують для покращення пошуку даних рекомендаційні системи. Розроблено математичну модель рекомендаційної системи для децентралізованої P2P мережі з огляду на вподобання користувачів та кількість переходів до завантаження даних. Розроблено метод формування рекомендацій для користувачів комп'ютерної мережі типу peer to peer на основі запропонованої математичної моделі.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в такому:

– Розроблено математичну модель рекомендаційної системи для однорангової комп'ютерної мережі типу peer to peer для подальшої розробки комп'ютерної імітаційної моделі та тестування алгоритмів рекомендаційних і пошукових систем.

– Розроблено метод формування рекомендацій для користувачів комп'ютерної мережі типу peer to peer, що дозволяє врахувати особливості розподіленого зберігання даних у мережі та полегшити пошук потрібної інформації у ній.

Практичне значення. Запропоновано формули для відбору файлів у рекомендаційні списки, що враховують дії користувачів у мережі та час пошуку файлів.

Перспективи подальших досліджень.

Запропоновані модель та метод формування списку рекомендацій у peer to peer мережі розраховані на загальний випадок і не прив'язані до конкретного пошукового запиту. У подальших дослідженнях планується дослідити випадки, коли треба сформувати користувачу списки рекомендацій у відповідь на невдалий пошуковий запит з огляду на його зміст. В такому випадку рекомендації мають бути близькими до пошукового запиту, а при їх формуванні можна враховувати інформацію, зібрану з інших комп'ютерів під час відповідного пошукового запиту. Також планується розробити відповідні алгоритми та програмну модель для тестування запропонованих методів.

Список використаних джерел / References

- [1] Ju. Riposo, *Diffusion on the Peer-to-Peer Network*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022.
- [2] S. G. M. Koo, *Multimedia Content Distribution Using Peer-to-Peer Overlay Networks: The Design and Analysis of the Next Generation Peer-to-Peer Networks*, VDM Verlag Dr. Müller, 2008.
- [3] A. Bellet, R. Guerraoui, M. Taziki, and M. Tommasi, "Personalized and private peer-to-peer machine learning", in *Proc. Twenty-First Int. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics*, vol. 84, 2018, pp. 473-481. [Online]. Available: <http://proceedings.mlr.press/v84/bellet18a/bellet18a.pdf>.
- [4] D. S. Milojevic, V. Kalogeraki, R. Lukose et al., "Peer-to-peer computing", Technical Report HPL-2002-57, HP Labs, 2002. [Online]. Available: <https://www.cs.kau.se/cs/education/courses/dvad02/p2/seminar4/Papers/HPL-2002-57R1.pdf>.
- [5] D. Ricardo, *Introduction to Bitcoin: Understanding Peer-to-Peer Networks, Digital Signatures, the Blockchain, Proof-of-Work, Mining, Network Attacks, Bitcoin Core ... Safety*, Expiscor Books; 1st ed., 2021.
- [6] D. Zeinalipour-Yazti, V. Kalogeraki, and D. Gunopulos, "Information retrieval techniques for peer-to-peer networks", *Computing in Science & Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 20-26, 2004. doi: 10.1109/MCSE.2004.12.
- [7] E. K. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma, and S. Lim, "A survey and comparison of

- peer-to-peer overlay network schemes", *IEEE Communications survey and tutorial*, 2004. [Online]. Available: <https://snap.stanford.edu/class/cs224w-readings/lu04p2p.pdf>.
- [8] The BitTorrent Protocol Specification, 2017. [Online]. Available: http://www.bittorrent.org/beps/bep_0003.html.
- [9] V. Kalogeraki, D. Gunopulos, and D. Zeinalipour-Yazti, "A local search mechanism for peer-to-peer networks", *Proc. CIKM'02*, McLean VA, USA, 2002. [Online]. Available: <http://alumni.cs.ucr.edu/~csyiazti/downloads/papers/cikm02/cikm02.pdf>.
- [10] D. Zeinalipour-Yazti, "Information retrieval in peer-to-peer systems", M.Sc thesis, Dept. of Computer Science, University of California Riverside, 2003. [Online]. Available: <http://alumni.cs.ucr.edu/~csyiazti/papers/msc/html/>.
- [11] N. Shukla, D. Datta, and M. Pandey, "Towards software defined low maintenance structured peer-to-peer overlays", *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 14, pp. 1242-1260, 2021. doi: 10.1007/s12083-021-01112-7.
- [12] Y. Klots, I. Muliar, V. Cheshun, and O. Burdyug, "Use of distributed hash tables to provide access to cloud services", *Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University*, vol. 11 (67), pp. 85-95, 2020.
- [13] Yb. Shen, and T. R. Gadekallu, "Resource search method of mobile intelligent education system based on distributed hash table", *Mobile Netw Appl.*, 27, pp. 1199-1208, 2022. doi: 10.1007/s11036-022-01940-8.
- [14] S. Ratnasamy, I. Stoica, and S. Shenker, "Routing algorithms for DHTs: Some open questions. Peer-to-peer systems", in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2429. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 45-52. doi: 10.1007/3-540-45748-8_4.
- [15] Kademia: A Design Specification, 2010. [Online]. Available: <https://xlattice.sourceforge.net/components/protocol/kademia/specs.html>.
- [16] I. Stoica, R. Morris, D. R. Karger, M. F. Kaashoek, and H. Chord Balakrishnan, "A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 31 (4), 2001. doi: 10.1145/964723.383071.

V. V. Mikhav¹, Postgraduate Sstudent,
e-mail: mihaw.wolodymyr@gmail.com

Ye. V. Meleshko¹, Dr. Tech. Sc., Professor,

O. M. Driev¹, Cand. Tech. Sc., Associate Professor,

A. O. Lavdanskyy², Cand. Tech. Sc., Associate Professor

¹Central Ukrainian National Technical University

Universitetskiy ave., 8, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

²Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

A MODEL OF RECOMMENDER SYSTEM FOR P2P COMPUTER NETWORKS

In this article, a research of peer-to-peer network algorithms is conducted. A comparative analysis of data search methods in centralized, decentralized unstructured and decentralized structured peer-to-peer networks is carried out. It has been found that the existing methods of peer-to-peer networks do not use recommender systems to improve data search. A mathematical model of a recommender system for a decentralized P2P network has been developed, taking into account user preferences and the number of transitions to download data. A method of forming recommendations for peer-to-peer computer network users based on the proposed mathematical model has been developed.

In P2P networks, there is a problem of indexing and searching files on different network devices. For various reasons, searched files may not be available to a user, even if they were previously added to a system and indexed. For example, computers containing the desired file or routing tables to it or its parts have left a network, or P2P network construction technologies are used with probabilistic search methods that do not always find files located far from the user's computer, etc.

Recommender systems are used to build lists of recommendations for users based on their previous actions, including likes, ratings, views, downloads, etc. They make it possible to facilitate the search in a system with a large number of objects, supplementing the classic search, and in some situations even substituting the search. Recommender systems can also be used to rank classical search results. Thus, they can be combined with conventional search algorithms in various ways. In P2P networks, the use of recommender systems can have additional benefits. If a user is searching for a specific file that has been previously added to a network and the file is not found for various reasons, you can provide the user a list of recommendations based on his/her preferences and possibly search query.

A model and method of forming recommendation lists in peer-to-peer networks proposed in the paper are designed for the general case and are not tied to a specific search query, can be applied in unstructured and structured decentralized P2P networks to familiarize a user with a content that he/she may like based on the prediction of his/her preferences. This can increase the overall interest of users in a content of a network.

Keywords: *computer networks, peer-to-peer networks, P2P, recommender systems, data search.*

УДК 621.317; 658.56

[0000-0002-3074-3898] **О.-С. І. Корчинська, аспірант,**

e-mail: olha-solomiia.i.korchynska@lpnu.ua

[0000-0002-0591-6304] **М. М. Микийчук, д-р техн. наук, професор**

e-mail: mykolamm@ukr.net

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

ДЖЕРЕЛА МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЯК ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

Сталий розвиток науки та техніки, впровадження численних інновацій та ускладнення технологічних процесів, особливо в частині метрологічного забезпечення, зумовлюють важливість дослідження та аналізу джерел метрологічних ризиків, які певним чином впливають на формування якості продукції на етапі виготовлення. Усе це породжує багато нових метрологічних ризиків для виробництва, які необхідно вчасно ідентифікувати, класифікувати, виявити їх причини та наслідки. Авторами визначено та описано основні джерела метрологічних ризиків як факторів впливу на технологічний процес та здійснено їх узагальнену класифікацію, що дозволяє об'єднати фактори впливу різної природи в певні групи та полегшити процес ідентифікації під час оцінювання метрологічних ризиків. Пропонується поділяти їх на джерела зовнішнього середовища, на які підприємство не може впливати, а лише адаптуватися під них, та джерела внутрішнього середовища, на які можна впливати. Зовнішнє середовище включає соціально-економічні, науково-інноваційні та природно-екологічні фактори. До джерел внутрішнього середовища відносяться технічні, людські та фактори системи метрологічного забезпечення. Ідентифікація повинна включати ризики, незалежно від їхньої природи, складності та можливості контролю. Отриману з різних джерел інформацію про ідентифіковані ризики рекомендується зберігати в єдиній інформаційній системі, основою якої є реєстр ризиків. У ньому зберігається інформація про виявлені причини та наслідки кожного ризику, а дані структуруються згідно з запропонованою класифікацією, яка дозволяє їх описати та порівняти. Наявність такого реєстру дозволяє отримати інформацію, яка стосується джерела конкретного ризику, а також є основою для його оцінювання та мінімізації.

Ключові слова: ідентифікація метрологічних ризиків, реєстр ризиків, зовнішні фактори впливу, внутрішні фактори впливу, метрологічне забезпечення виробництва.

Вступ. Виробничі процеси з кожним днем стають все складнішими через численні інновації, наукові розробки та жорсткіші вимоги до показників якості. Це вимагає певних змін для усіх елементів виробництва, зокрема й метрологічного забезпечення (МЗ). Під час проектування технологічних процесів (ТП) набуває значного поширення використання інтелектуальних сенсорів, мережевих технологій, інтернету речей та машинного навчання [1, 2]. У зв'язку з цим створюються нові труднощі, пов'язані з необхідністю адаптації метрологічних процесів на етапі виготовлення, що сприяють виникненню численних ризиків, пов'язаних з МЗ виробництва. Тому оцінювання метрологічного ризику (МР) [3] необхідно здійснювати окремо від інших ризиків. Обов'язковою умовою перед оцінюванням є ідентифікація МР. Процес

ідентифікації складається з виявлення та реєстрації їх джерел, причин та наслідків, які певним чином впливають на ТП. Джерелами МР є будь-які фактори, що впливають на МЗ виробництва і перешкоджають його нормальному розвитку та функціонуванню. Ці фактори впливу можуть формуватися внутрішнім середовищем, на яке виробництво може впливати, і зовнішнім середовищем, на яке виробництво впливати не може. Тому при ідентифікації факторів необхідно вивчити та зрозуміти внутрішній і зовнішній контекст організації [4]. На діяльність кожного підприємства впливає багато факторів, які взаємодіють між собою, залежать від сфери діяльності та змінюються в часі. Тому необхідно класифікувати потенційні небезпеки та фактори впливу в категорії для кращого аналізу та розуміння їх природи.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є визначення та опис факторів впливу на технологічний процес як джерел метрологічних ризиків та проведення їх узагальненої класифікації. Основними *задачами* для досягнення поставленої мети є: дослідження та аналіз джерел метрологічних ризиків, які впливають на формування якості продукції на етапі виготовлення, вивчення впливу метрологічних ризиків на якість продукції та класифікація їх джерел з метою їх ідентифікації та оцінювання.

Виклад основного матеріалу

1. Зовнішні фактори впливу на технологічний процес. Фактори впливу на ТП умовно можна поділити на фактори прямого та непрямого впливу. Джерела МР, пов'язані з зовнішнім середовищем, є факторами непрямого впливу, тобто такими, що не здійснюють безпосереднього впливу на механізми ТП. Таке зовнішнє середовище впливає на всі підприємства одразу, а не безпосередньо на якість конкретне. Вага впливу таких факторів також не є однаковою та значною мірою залежить від діяльності виробництва. Так, для прикладу, екологічні чинники зовнішнього середовища матимуть більший вплив в атомній енергетиці порівняно з виробництвом смартфонів. Тому охарактеризувати точний вплив зовнішнього чинника на показники метрологічної діяльності можливо з певною імовірністю через їх масштабність і опосередкований характер впливу. Процеси зовнішнього середовища є взаємопов'язаними. Так, політична або соціальна діяльність може впливати на стан навколишнього середовища, що, зі свого боку, дуже сильно впливатиме на виробництво. Таким чином, фактори зовнішнього середовища пов'язані між собою кореляційними зв'язками, з якими зміна одного з факторів впливає на інші складові [5]. Таку особливість обов'язково необхідно враховувати під час проведення оцінювання МР. В такому випадку проводити факторний аналіз є доволі складною задачею і для ідентифікації таких ризиків недостатньо залучити персонал виробництва. Необхідним є залучення експертів певної сфери для проведення якіснішого аналізу.

Зовнішні ризики безпосередньо не залежать від діяльності підприємства і слабо або зовсім не піддаються впливу з його боку та виникають ізольовано від нього. Попри це, їх ідентифікація та аналіз є необхідними в процесі оцінювання МР, а їх вплив на ТП бу-

де залежати від адаптивності виробництва та ефективності системи управління якістю. Тому одним із важливих завдань є ретельне дослідження впливу зовнішніх факторів на процес виготовлення, своєчасне визначення найвпливовіших джерел ризиків та врахування його впливу під час оцінювання МР [3].

Зовнішнє середовище забезпечує виробництво необхідними ресурсами для допомоги його внутрішньому потенціалу, тому врахування його факторів, що породжують МР, є обов'язковим і містить аналіз зовнішніх елементів оточення підприємства. Основним напрямом під час такого аналізу є визначення та розуміння наявних і потенційних загроз, з якими виробництво може або вже зіткнулося.

До зовнішніх факторів впливу пропонується віднести: соціально-економічне середовище, науково-технічний та інноваційний розвиток країни, екологічний стан навколишнього середовища.

Соціально-економічні фактори. Джерела МР, які відносяться до цієї групи, виникають внаслідок дії таких факторів, як соціальні, політичні та економічні. В рамках цієї класифікації їх пропонується об'єднати і віднести до однієї групи соціально-економічних факторів.

Соціально-економічні фактори є однією з основних груп, що породжують МР, які так само впливають на якість продукції на етапі виготовлення, а отже, потребують належного дослідження [6], аналізу й оцінювання [3]. Дослідження впливу соціально-економічних зовнішніх впливів на ТП є важливим етапом ідентифікації МР, а проведення аналізу полягає у діагностиці основних проблем метрологічного забезпечення виробництва (МЗВ), які потрібно вирішити, встановленні їх джерел та імовірних наслідків.

Соціальні фактори – це джерела МР, які виникають внаслідок непередбачуваних подій у суспільстві як результат будь-яких соціальних процесів у країні. Ці фактори включають такі події, як зміна демографічних показників, якості освіти, вікового розподілу, соціальних настроїв/звичаїв та ставлення людей до праці, а також терористичну діяльність, що призводить до проблем з людськими ресурсами, до зміни попиту на продукцію через зниження її якості та зупинок виробництва.

Політичні фактори впливу – це джерела МР, які спричиняють виникнення збитків та зниження якості продукції внаслідок зміни

політичної ситуації в країні. Врахування такого виду ризиків особливо важливе в країнах з нестабільним законодавством. Події, пов'язані з цими факторами, включають вибори урядовців з новими політичними планами, рівень бюрократії та корупції, зміни в нормативно-правовому регулюванні в метрологічній діяльності, а також нові закони та правила і будь-які зміни в політичному середовищі, що призводять до зміни податкової політики, трудового права, комунальних тарифів, митного контролю та політичної стабільності в цілому [7].

Економічні фактори – це джерела МР, які впливають на зміни якості продукції внаслідок змін в економіці країни та зумовлюють загальний стан економіки. Пов'язані події включають розподіл бюджету, зміну цін, темпи економічного зростання, ціни на енергоносії, що спричиняють зміни в оплаті праці, рівні наявного доходу та його розподіл.

Таким чином, якість продукції на етапі виготовлення перебуває під впливом соціальних, політичних та економічних подій і рішень, які є джерелами МР. До якого з трьох наведених вище факторів відноситься певний МР, охарактеризувати важко, оскільки його джерелом можуть бути одночасно всі три фактори. Для прикладу, ризики, пов'язані з розподілом бюджету, виникають одразу внаслідок певних змін в економіці та політиці країни. Саме тому МР, спричинені цими факторами, пропонується відносити до однієї соціально-економічної групи.

Науково-інноваційні фактори. Науково-інноваційні фактори – це джерела МР, що спричиняють втрати внаслідок відставання виробництва від науково-інноваційних процесів країни в сфері метрології. Науково-інноваційні ризики залежать від виду галузі, в якій функціонує підприємство, тому наслідки в разі їх виникнення будуть різними для кожного виробництва. Особливо варто звертати увагу на такі ризики підприємствам, які функціонують у новітніх галузях науки та техніки, оскільки саме там відбувається дуже стрімкий науково-інноваційний розвиток. Варто зазначити, що до наукових інновацій належать нові підходи до виконання нових та старих речей, вирішення нових чи старих проблем. Вони передбачають не лише інновації в технічному обладнанні, але й нові методи та способи організації ТП. Події, пов'язані з цією групою ризиків, включають швидкий науково-технологічний прогрес, появу нового вимірю-

вального обладнання та методів вимірювання, нових конструкторських і технологічних розробок, системи передачі та обробки інформації, автоматизацію виробництва, що спричиняють додаткові витрати на оновлення МЗ, час на введення нових методів та розробок у ТП, підготовку відповідного персоналу, що, зі свого боку, породжує багато МР, пов'язаних з організаційними рішеннями та інтеграційними процесами [8]. Впровадження інновацій у сферу МЗ виробництва не лише покращує якість продукції, але й збільшує конкурентоспроможність виробництва. Впроваджувати наукові інновації необхідно також для того, щоб уникнути значних ризиків у майбутньому внаслідок старіння методів і технологій виробництва, що впливатимуть на якість. Важливим є своєчасне та обдумане введення інновацій в механізми функціонування виробництва, проте слід обережно здійснювати ці процеси, оскільки неправильні рішення можуть призвести до критичних наслідків.

Природно-екологічні фактори. Природно-екологічні фактори – це джерела МР, які виникають внаслідок проявлення стихійних сил природи і спричиняють незаплановані зміни кінцевого результату метрологічної діяльності. Такі фактори першочергово пов'язані з особливостями місцевості (географічне розташування, природні катаклізми, специфіка кліматичних умов), в якій розташоване і проводить свою діяльність підприємство.

До подій, пов'язаних з цією групою ризиків, належать зміни температури, тиску, вологості, виникнення повеней, пожеж і землетрусів, що впливають на результати вимірювання та персонал, що його здійснює, а також частково пошкоджують або повністю знищують метрологічне обладнання та лабораторії. Природно-екологічні фактори створюють ризики, пов'язані з непридатними умовами навколишнього середовища. Такі МР можуть впливати на результати метрологічної діяльності та забезпечення необхідної якості продукції на етапі виготовлення, зокрема на забезпечення відтворюваності вимірювань. Згідно з [9] відтворюваність вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає близькість результатів вимірювань тієї самої величини, виконаних у різних умовах (у різний час, у різних місцях, різними методами та засобами), але приведених до однакових умов вимірювання (температура, тиск, вологість та ін.). Слід звернути увагу на «однакові

умови вимірювання». Ці умови згідно з NIST [10] мають відповідати міжнародно прийнятим значенням температури (20 °C) та тиску (760 мм рт. ст.). Невелика зміна цих параметрів може вплинути на появу додаткових похибок, які необхідно враховувати під час оформлення результатів вимірювання. Відносна вологість, температурні градієнти, вібрація та вміст CO₂ у повітрі впливають на показник заломлення світла, на що потрібно зважати під час здійснення відповідних вимірювань.

Персонал, що здійснює метрологічну діяльність, також може піддаватися впливу природно-екологічних факторів. Непридатні умови та стихійні лиха, такі як пожежі, землетруси, блискавки можуть спричиняти травми на виробництві, хвороби, психологічні розлади і навіть смерті. Також ця група факторів впливає на ресурсне забезпечення виробництва і може різко погіршити умови його використання.

Виробництво не може впливати на умови навколишнього середовища, проте воно здатне адаптуватися та впроваджувати необхідні рішення для забезпечення нормальних умов. Для цього має приділятися увага дотриманню норм температури, тиску, вологості, освітленості, вібрації, шуму і т. д. Метрологічна діяльність повинна бути призупинена, якщо умови навколишнього середовища ставлять під сумнів достовірність її результатів.

2. Внутрішні фактори впливу на технологічний процес. Внутрішнє середовище, так само як і зовнішнє, є джерелом МР. Усі фактори, що безпосередньо залежать від діяльності підприємства і впливають на якість продукції, що виготовляється, є внутрішніми факторами. Такі фактори належать до факторів прямого впливу та є індивідуальними для кожного підприємства. МР, пов'язані з некоректними графіками проведення калібрування, виникають внаслідок недоліків у системі організації лише конкретного виробництва та не впливають на інші. Вага впливу таких ризиків, як і у зовнішніх, є також різною і значною мірою залежить від організаційної діяльності конкретного виробництва. Для прикладу, МР, пов'язані з графіками калібрування, будуть мати різний вплив залежно від здатності виробництва оперативно реагувати на їх наслідки.

Вплив внутрішнього чинника на показники метрологічної діяльності легше охарактеризувати, оскільки тут існує більш зрозумілий причинно-наслідковий зв'язок ризикових

подій порівняно з зовнішніми МР. Процеси, пов'язані з внутрішнім середовищем, також є взаємозалежними. Неправильне поводження з вимірювальним обладнанням з боку персоналу впливатиме на коректність його роботи, що, зі свого боку, впливатиме на якість продукції на етапі виготовлення. Проте тут простіше ідентифікувати й проаналізувати такі послідовні та взаємозалежні ризики, оскільки вони відбуваються в межах виробництва, а у керівництва є повний доступ до усіх процесів та ресурсів. Порівняно із зовнішніми ризиками, для проведення факторного аналізу внутрішніх чинників не потрібно залучати сторонніх осіб, оскільки вони є некомпетентними у механізмах діяльності виробництва.

Оскільки внутрішні ризики виникають як результат діяльності підприємства, тому вони повністю піддаються його контролю, а їх вплив буде залежати від своєчасного визначення джерел ризиків, а також заходів щодо їх ліквідації чи мінімізації. Тому внутрішні ризики необхідно аналізувати й оцінювати нарівні з зовнішніми. Хоча вони й мають певні особливості, проте більшою мірою ці два чинники є схожими, а значущість наслідків у разі виникнення таких МР матиме згубний вплив на якість виготовлення продукції, незалежно від природи їх походження: внутрішні чи зовнішні.

До внутрішніх факторів впливу пропонується віднести: персонал, що здійснює метрологічну діяльність, систему МЗ та технічне забезпечення виробництва.

Фактори системи метрологічного забезпечення. МЗ багатьма способами впливає на неперервність та ритмічність виробництва, собівартість продукції, обсяг її випуску, продуктивність праці та ефективність у багатьох процесах виробництва і споживання. Для визначення факторів впливу, які є джерелами МР системи МЗВ, необхідно дати визначення терміну «метрологічне забезпечення». В нормативному документі з метрології [9] представлено наступне поняття МЗ:

- установа та застосування метрологічних норм та правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності та потрібної точності вимірювань.

Фактори системи МЗ є джерелами МР, які виникають внаслідок порушення метрологічних норм і правил для забезпечення необхідної точності та єдності вимірювань. Події,

пов'язані з цією групою ризиків, включають застарілу документацію робочих процесів, методів вимірювання, незабезпечення процедур відтворення та передачі одиниць вимірювань, неоптимальне поєднання процедур підвищення точності вимірювань та затрат на їх досягнення, відсутність нормативно-методичної бази, недотримання єдності вимірювань та метрологічної відповідності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та інші події, що впливають на забезпечення якості та ефективності вимірювань. Згідно з [11] система показників якості МЗВ складається з показників результативності та ефективності. До показників результативності відносяться:

- забезпечення єдності вимірювань;
- забезпечення метрологічної відповідності ЗВТ;
- стандартизація методик виконання вимірювань;
- метрологічна експертиза конструкторської та технологічної документації;
- метрологічний нагляд та контроль;
- структура метрологічної служби;
- бази даних метрологічних характеристик.

До показників ефективності відносяться:

- точність вимірювань;
- достовірність контролю;
- повнота контролю;
- глибина контролю;
- оперативність контролю.

Повне або часткове недотримання описаних вище показників призводить до появи МР, які впливають на ТП та спричиняють втрати виробництва. Оскільки МЗВ є складною організаційно-технічною системою, складність якої зумовлена вдосконаленням сучасних виробничих процесів, потребою підвищення ступеня керованості та рівня автоматизації ТП, впровадження точніших методик виконання вимірювань, підвищення вимог до рівня якості та безпечності продукції, важливим завданням організації сучасних виробництв є створення високоефективних систем МЗВ для зменшення впливу факторів, пов'язаних з цією категорією джерел МР. Окрім цього, система МЗВ включає усі метрологічні складові виробництва, зокрема технічне забезпечення та персонал, що здійснює метрологічну діяльність.

Технічне забезпечення і людський фактор становлять суттєву частину МЗВ [12],

тому фактори впливу, пов'язані з ними, слід виділяти в окремі категорії та оцінювати окремо.

Технічні фактори. Фактори технічного забезпечення виробництва – це джерела МР, які призводять до зміни кінцевого результату внаслідок використання у виробничому процесі невідповідного обладнання та технологій.

Події, пов'язані з цією групою ризиків, включають несвоєчасне виведення обладнання з експлуатації, несвоєчасне метрологічне обслуговування (перевірка, калібрування) обладнання, його зберігання та транспортування, застаріле програмне забезпечення ЗВТ, невідповідні еталони, що впливають на достовірність результатів вимірювання та калібрування цим обладнанням. З цього боку, техніка має досить широке значення і стосується не тільки апаратного забезпечення (еталони, ЗВТ), але й програмного або їх комбінації, що використовується для оптимізації ТП. Програмне забезпечення включає спеціалізовані операційні системи, програмні забезпечення ЗВТ, програми для проведення багатовимірних вимірювань з одночасним використанням великої кількості сенсорів, автоматичного моніторингу стану систем, оцінки результату вимірювання та захисту інформації. Використання метрологічного обладнання під час здійснення метрологічної діяльності робить її ефективнішою і продуктивнішою. В більшості випадків її використання є обов'язковою умовою, оскільки в іншому випадку здійснювати вимірювання та калібрування стає неможливим. Вимірювання різниці потенціалів між шарами кори головного мозку неможливо здійснити без відповідного обладнання для підсилення, знешумлення, вимірювання та опрацювання сигналів електроенцефалограм [13]. На сьогоднішній день значного розвитку і поширення набувають автоматичні системи вимірювання та контролю на етапі виготовлення. Ці системи не потребують участі спеціального персоналу для проведення самих вимірювань. Проте критично необхідним у цьому випадку є своєчасне обслуговування, калібрування та моніторинг контрольних показників цього обладнання. В іншому випадку це може спричинити виникнення МР, що призведуть до критичних та невідворотних наслідків, які в майбутньому вплинуть на якість продукції та виробництво. Для зниження такого роду ризиків необхідно забезпечувати спеціально обладнані приміщення для прове-

дення вимірювань. Вони мають бути досить просторими, щоб зменшити ризик виникнення небезпечних ситуацій та пошкодження устаткування, а також забезпечені витратними матеріалами для проведення вимірювань, випробувань та калібрувань. Використання пошкодженого та неповіреного обладнання і його невчасне виведення з експлуатації може призвести до виникнення МР. Також слід враховувати, що наявне устаткування може функціонувати належним чином, проте його метрологічні характеристики можуть не відповідати вимогам певних методик вимірювань. Щоб уникнути ризиків, пов'язаних з цим, необхідно перед виконанням робіт оцінити наявне обладнання з наявними методиками та підібрати найоптимальніший варіант. Окрім цього, виробництво повинне мати розроблені процедури поводження з вимірювальним обладнанням, його транспортування, зберігання, експлуатації та обслуговування.

Людський фактор. Людський фактор – це джерело МР, яке виникає внаслідок впливу людської діяльності на ТП. До подій, пов'язаних з цією групою ризиків, належать: відсутність кваліфікованого персоналу, неправильне використання вимірювального обладнання, робота з порушенням вимог інструкцій з використання обладнання, недотримання графіків калібрування, неправильне заповнення звітів, що впливають на результати вимірювань та калібрування, проведення перевірок, кінцеву якість вихідного продукту і можуть спричинити пошкодження метрологічного обладнання. В основному джерела МР, пов'язаних з людським фактором, виникають через невиконання посадових обов'язків, низьку кваліфікацію, порушення технологій, процедур та корпоративних правил, помилки та зловживання. Для досягнення необхідної якості та зменшення кількості ризиків, пов'язаних з цією групою, виробництву варто звертати особливу увагу на навички, знання та компетентність кожного зі співробітників залежно від виду виконуваної ним роботи (проведення вимірювань, складання графіків, заповнення звітів чи догляд за приладами). Згідно з [14] компетентність – це вміння мобілізувати в конкретній ситуації отримані знання та досвід з огляду на зовнішні обставини. Невідповідне обслуговування вимірювального обладнання, порушення в процесі проведення вимірювання, виявлення та усунення дефектів

і отримання недійсних результатів є наслідком некомпетентності персоналу, що впливає на ТП. Важливим є врахування не лише компетентності персоналу, але й інших чинників, що впливають на продуктивність. Такі властивості, як швидкість і точність роботи, можуть також впливати на якість продукції та залежати від фізичного, психологічного та емоційного стану людини. Дослідження [15] показує, що людські фактори, такі як ознайомлення із завданнями, втома, навчання та коливання уваги, впливають на результат будь-якого виробничого процесу. МР, пов'язані з людським фактором, необхідно досліджувати, незалежно від типу виробництва. Навіть на підприємствах з високим рівнем автоматизації їх аналіз є дуже важливим. Для прикладу, на об'єктах ядерної енергетики, де процедури контролю виконуються людьми, машинами або комбінацією людини й машини [16], людський фактор виявився важливим для виробництва.

У сфері метрології, персонал, як і в інших сферах, є основним джерелом ризиків [17]. Для мінімізації впливу МР, пов'язаних з людським фактором, роботодавець повинен забезпечити необхідне обладнання та приміщення, яке забезпечить свободу переміщення і точність дій. Керівництво має бути впевненим у компетентності своїх працівників, особливо тих, хто працює з обладнанням, яке потребує спеціальних навичок та досвіду. Усі завдання, чи то калібрування, чи догляд за приладами, повинні надаватися з огляду на відповідну освіту, досвід та підготовку. Проте необхідно зауважити, що люди не лише є джерелами ризиків, але й здатні вправно ними керувати та усувати їх, використовуючи свою винахідливість для вирішення неочікуваних проблем.

Результати досліджень. Внаслідок проведеного дослідження факторів впливу на ТП пропонується класифікація МР від цих факторів впливу (рисунок 1).

Така класифікація разом з методом оцінювання МР [3] дозволяє детальніше оцінити розмір не лише комплексного показника, але й кожного структурного рівня та зрозуміти, яка саме група джерел МР робить найбільший вплив на значення комплексного показника (внутрішні технічні чи зовнішні соціально-економічні).

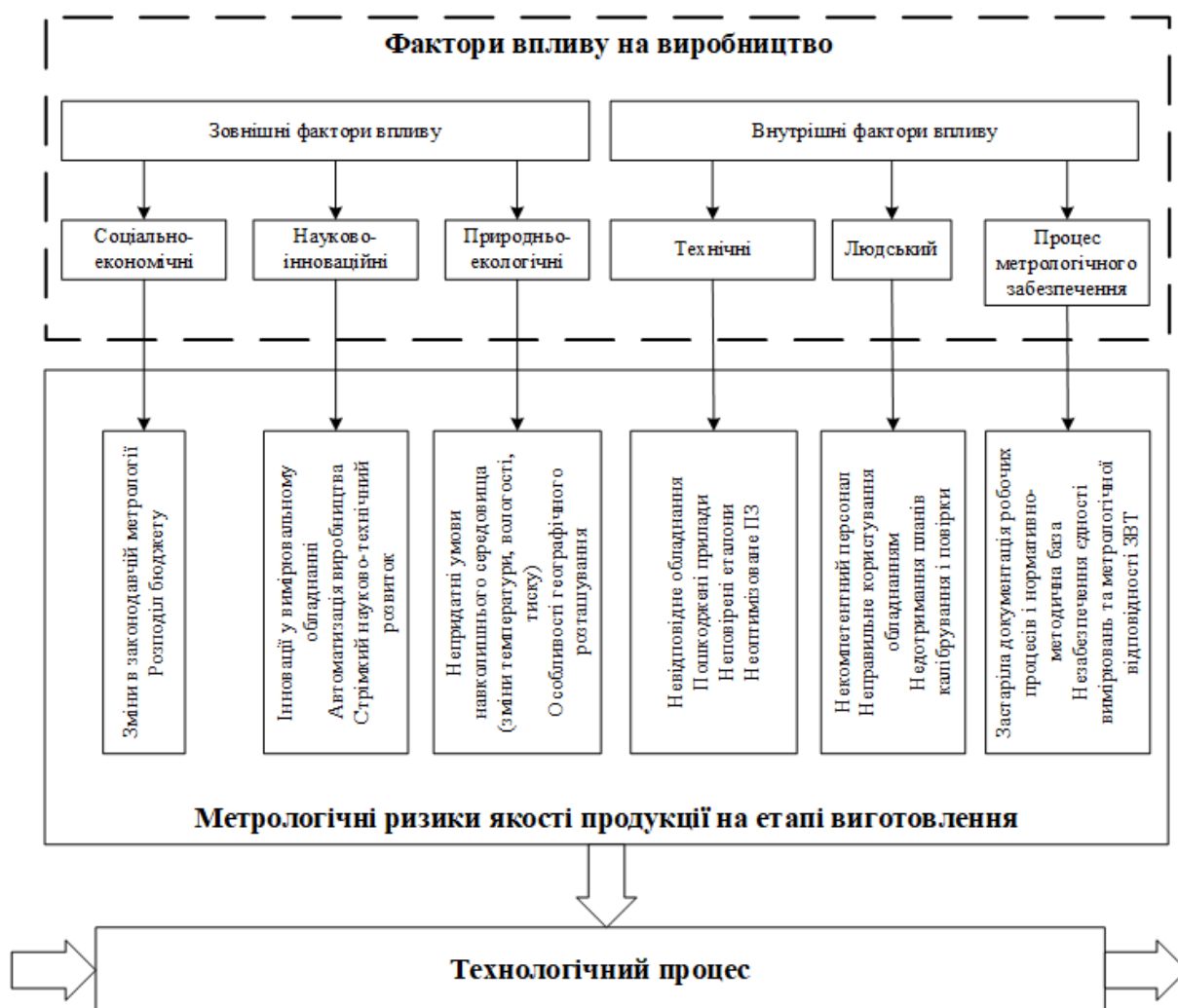


Рисунок 1. Класифікація МР від факторів впливу на технологічний процес

Тому перед оцінкою ризиків необхідна ідентифікація факторів впливу, які є джерелами МР. Отримана з різних джерел інформація про виявлені ризики збирається в одній інформаційній системі, основою якої є реєстр ризиків [4]. У ньому дані структуруються згідно з наведеною класифікацією (рисунок 1), яка дозволяє їх описати та порівняти. Приклад такого реєстру ризику зображено в таблиці 1.

Реєстр ризику є одним із методів представлення, збереження та моніторингу ризиків, їх потенційних джерел (факторів впливу) та імовірних наслідків, які впливають на ТП. Наявність такого реєстру дозволяє отримати інформацію, яка стосується джерела конкретного ризику, а також є основою для оцінки комплексного показника МР [3], що включає різні групи джерел МР. Розробка такого реєстру, особливо за наявності великої кількості джерел ризиків, потребує значних зусиль [18]. Тому для їх ідентифікації пропонується залу-

чати якомога більшу кількість персоналу та проводити періодичний моніторинг для виявлення нових МР і контролю вже існуючих. Ідентифікація повинна включати ризики, незалежно від того, чи впливає на них виробництво (внутрішні фактори впливу), чи ні (зовнішні фактори впливу).

Обговорення результатів. У цьому дослідженні представлений комплексний аналіз джерел метрологічних ризиків, які впливають на технологічний процес виробництва. Авторами визначено й описано основні джерела метрологічних ризиків та запропоновано систему класифікації за факторами впливу. Також наведено реєстр ризиків як інструмент для збору та моніторингу інформації щодо ризиків, їх потенційних джерел і ймовірних наслідків, що впливають на технологічний процес виробництва. Значущість цього дослідження полягає в його практичному значенні для аналізу факторів впливу на технологічний

процес та їх зв'язку з метрологічними ризиками якості продукції на етапі виробництва. Результати дослідження можуть бути використані для розробки більш свідомого управління метрологічними ризиками на етапі виробництва продукції, що спричинить покращення якості та підвищення ефективності виробничого процесу. Подальші дослідження в цій галузі мають бути зосереджені на розробці математичної моделі для оцінювання метрологічного ризику. Це створить умови для більш точного

та надійного управління метрологічними ризиками на етапі виробництва. Зі стрімким та безперервним розвитком науки і технологій використання інтелектуальних систем і алгоритмів машинного навчання набуває значного поширення. У результаті ускладнюється процес метрологічного забезпечення виробництва, виникають нові небезпеки. Необхідно продовжити дослідження й аналіз метрологічних ризиків для забезпечення якості та безпеки продукції, що випускається.

Таблиця 1. Реєстр метрологічних ризиків

№	МР	Причини (джерела) МР	Наслідки
Зовнішні фактори впливу			
1	<i>Соціально-економічні</i>		
1.1	Внесення змін до Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність»	Оновлення вмісту Закону згідно з вимогами законодавства ЄС	Витрати часу на інтеграцію відповідних змін на виробництвах
1.2	...	...	...
2	<i>Науково-інноваційні</i>		
2.1	Розвиток «Індустрії 4.0»	Науково-технічний розвиток України в сфері метрології і кіберфізичних систем	Адаптація виробництва під кіберфізичні системи вимірювання
2.2	...	...	...
3	<i>Природно-екологічні</i>		
3.1	Невідповідна температура навколишнього середовища на виробництві	Підвищення температури навколишнього середовища внаслідок зміни погодних умов	Збільшення похибки результату внаслідок проведення вимірювання за межами нормальних умов роботи обладнання
3.2	...	...	...
Внутрішні фактори впливу			
4	<i>Технічні</i>		
4.1	Відсутність спеціального обладнання для вимірювання нерівності поверхні матеріалів	Відсутність фінансування на закупівлю необхідного обладнання	Застосування не призначеного для цього обладнання, що призводить до зниження якості матеріалів
4.2	...	...	...
5	<i>Людський</i>		
5.1	Несвоєчасна повірка/калібрування ЗВТ	Відсутність графіків повірки/калібрування та відповідального персоналу за їх дотримання	Використання неповіренних/невідкаліброваних ЗВТ, що призводить до недостовірності результатів вимірювання
5.2	...	...	...
6	<i>Система метрологічного забезпечення</i>		
6.1	Застаріла нормативно-методична база виробництва для проведення калібрування	Несвоєчасне отримання інформації про отримання/оновлення нової нормативно-методичної бази	Протермінування підготовки протоколів з результатами калібрування
6.2	...	...	...

Висновки. Необхідність дослідження та аналізу джерел метрологічних ризиків, які є факторами, що впливають на технологічний процес, зумовлена стрімким та безперервним розвитком науки і техніки та зростанням вимог до показників якості. Під час проектування технологічних процесів набуває значного поширення використання інтелектуальних систем та алгоритмів машинного навчання, що ускладнює процес метрологічного забезпечення виробництва і призводить до виникнення нових небезпек. Ці небезпеки є джерелами метрологічних ризиків, які необхідно ідентифікувати та класифікувати. Джерелами метрологічних ризиків є будь-які фактори, що впливають на метрологічне забезпечення виробництва і перешкоджають його нормальному розвитку та функціонуванню.

Авторами визначено й описано основні джерела метрологічних ризиків, які впливають на технологічний процес, та наведено їх узагальнену класифікацію.

Новизною цієї роботи є визначення та опис основних джерел метрологічних ризиків, які є факторами впливу на технологічний процес виробництва.

Практична цінність полягає в аналізі факторів впливу на технологічний процес та встановленні їх взаємозв'язків із метрологічними ризиками якості продукції на етапі виготовлення.

Перспектива подальших досліджень пов'язана з розробкою математичної моделі оцінювання метрологічних ризиків, яка створить умови для більш усвідомленого управління метрологічними ризиками на етапі виготовлення продукції.

Список використаних джерел

- [1] М. Микийчук, Б. Стадник, С. Яцишин, та Я. Луцик, "Розумні вимірювальні засоби для кіберфізичних систем", *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 77, с. 3-16, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2016.77.003>.
- [2] О. Васілевський, "Концепція метрологічного забезпечення в індустрії 4.0", *ІТКІ*, т. 48, № 2, с. 37-44, Верес. 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-37-44>.
- [3] О.-С. Корчинська, та Т. Гут, "Система управління метрологічними ризиками якості продукції на етапі виготовлення", *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 83, № 1, с. 29-34, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.029>.
- [4] *Risk management – Guidelines*, ISO 31000:2018, 2018. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>.
- [5] Ю. Ковтуненко, А. Олексійчук, та Т. Васалатій, "Фактори зовнішнього середовища, які впливають на вибір стратегії виробничого підприємства", *Інвестиції: практика та досвід*, т. 11, с. 55-58, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.investplan.com.ua/pdf/11_2016/13.pdf.
- [6] F. R. Khan, "Socio-economic factors influencing entrepreneurship development: An empirical study across the small and medium enterprises of Chennai", *International Journal of Students Research in Technology & Management*, vol. 2, no. 3, pp. 89-94, State of Tamil Nadu, India, May, 2014.
- [7] M. K. Zonouzi, M. Hoseyni, and M. Khoramshahi, "Political factors affecting the survival of SMEs case study: An empirical study in Tehran Grand Bazaar", *Asia Pacific Management Review*, vol. 26, no. 1, pp. 47-56, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.07.002>.
- [8] S. Aghmiuni, S. Siyal, Q. Wang, and Y. Duan, "Assessment of factors affecting innovation policy in biotechnology", *Journal of Innovation and Knowledge*, vol. 5, pp. 180-190, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2019.10.002>.
- [9] *Метрологія. Терміни та визначення*, ДСТУ 2681:1994, Київ, Україна, 1 січ., 1995. [Online]. Available: https://dtp.lg.ua/Dokumentacija%20i%20oformlenie/DSTU_2681-94_metrologiya_terminy_i_opredeleniya.pdf.
- [10] *Standard temperature and pressure (STP)*, NIST. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_temperature_and_pressure.
- [11] М. Микийчук, "Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення", дис. д-ра техн. наук, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2012, с. 292.
- [12] М. Микийчук, П. Столярчук, та Т. Бубе-ла, "Основні завдання та ознаки метроло-

- гічного забезпечення якості продукції", *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 74, 2013.
- [13] S. Artemuk, V. Brydinskyi, I. Mykytyn, and Y. Khoma, "Application of deep neural networks for EEG signal processing in brain-controlled wheeled robotic platform", in *2021 11th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2021, pp. 81-85. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660965.
- [14] С. Лейко, "Поняття компетенція та компетентність: теоретичний аналіз", *Педагогічний процес: теорія і практика*, т. 4, с. 128-135, 2013.
- [15] H. Baayen, S. Vasishth, R. Kliegl, and D. Bates, "The cave of shadows: Addressing the human factor with generalized additive mixed models", *Journal of Memory and Language*, vol. 94, pp. 206-234, 2017.
- [16] N. Anuar, and J. Kim, "A direct methodology to establish design requirements for human-system interface (HSI) of automatic systems in nuclear power plants", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 326-338, 2014.
- [17] Yong Bai, Wei-Liang Jin, *Marine Structural Design*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, p. 977, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13664-1>.
- [18] T. Tambovceva, "Classification of factors influencing environmental management of enterprise", *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 22, no. 6, pp. 867-884, 2016. doi: 10.3846/20294913.2016.116000.
- ity at the manufacturing stage", *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, vol. 83, no. 1, pp. 29-34, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.029> [in Ukrainian].
- [4] *Risk management – Guidelines*, ISO 31000:2018, 2018. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>.
- [5] U. Kovtunen, A. Oleksiichuk, and T. Vasalatii, "External environment factors that affect the choice of strategy of industrial enterprises", *Investysii: praktyka ta dosvid*, vol. 11, pp. 55-58, 2016. [Online]. Available: http://www.investplan.com.ua/pdf/11_2016/13.pdf [in Ukrainian].
- [6] F. R. Khan, "Socio-economic factors influencing entrepreneurship development: An empirical study across the small and medium enterprises of Chennai", *International Journal of Students Research in Technology & Management*, vol. 2, no. 3, pp. 89-94, State of Tamil Nadu, India, May, 2014.
- [7] M. K. Zonouzi, M. Hoseyni, and M. Khoramshahi, "Political factors affecting the survival of SMEs case study: An empirical study in Tehran Grand Bazaar", *Asia Pacific Management Review*, vol. 26, no. 1, pp. 47-56, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.07.002>.
- [8] S. Aghmiuni, S. Siyal, Q. Wang, and Y. Duan, "Assessment of factors affecting innovation policy in biotechnology", *Journal of Innovation and Knowledge*, vol. 5, pp. 180-190, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2019.10.002>.
- [9] *Metrology. Terms and definitions*, DSTU 2681:1994, Kyiv, Ukraine, Jan. 1, 1995. [Online]. Available: https://dtp.lg.ua/Dokumentacija%20i%20formlenie/DSTU_2681-94_metrologiya_termyny_i_opredeleniya.pdf [in Ukrainian].
- [10] *Standard temperature and pressure (STP)*, NIST. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_temperature_and_pressure.
- [11] M. Mykyychuk, "Metrological assurance of product quality at the manufacturing stage", Ph. D. dissertation, Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2012, p. 292 [in Ukrainian].
- [12] M. Mykyychuk, P. Stolyarchuk, and T. Bubela, "Main tasks and signs of metrological product quality assurance",

References

- [1] M. Mykyychuk, B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, Y. Lutsyk, "Smart measuring instruments for cyber-physical systems", *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, vol. 77, pp. 3-16, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2016.77.003> [in Ukrainian].
- [2] O. Vasilevskyi, "The concept of metrological equipment in industry 4.0", *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, vol. 48, no. 2, pp. 37-44, Sept., 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-37-44> [in Ukrainian].
- [3] O-S. Korchynska, and T. Hut, "Metrological risks in management system of product qual-

- Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia, vol. 74, 2013 [in Ukrainian].
- [13] S. Artemuk, V. Brydinskyi, I. Mykytyn, and Y. Khoma, "Application of deep neural networks for EEG signal processing in brain-controlled wheeled robotic platform", in *2021 11th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2021, pp. 81-85. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660965.
- [14] S. Leyko, "Concepts of competence and competence: theoretical analysis", *Pedahohichnyi protses: teoriia i praktyka*, vol. 4, pp. 128-135, 2013 [in Ukrainian].
- [15] H. Baayen, S. Vasishth, R. Kliegl, and D. Bates, "The cave of shadows: Addressing the human factor with generalized additive mixed models", *Journal of Memory and Language*, vol. 94, pp. 206-234, 2017.
- [16] N. Anuar, and J. Kim, "A direct methodology to establish design requirements for human-system interface (HSI) of automatic systems in nuclear power plants", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 326-338, 2014.
- [17] Yong Bai, Wei-Liang Jin, *Marine Structural Design*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, p. 977, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13664-1>.
- [18] T. Tambovceva, "Classification of factors influencing environmental management of enterprise", *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 22, no. 6, pp. 867-884, 2016. doi: 10.3846/20294913.2016.116000.

O-S. I. Korchynska, *Ph. D. Student*,
e-mail: olha-solomiiia.i.korchynska@lpnu.ua

M. M. Mykyychuk, *Dr. Sc., Professor*
e-mail: mykolamm@ukr.net

Lviv Polytechnic National University
Stepan Bandera st, 12, Lviv, 79000, Ukraine

SOURCES OF METROLOGICAL RISKS AS FACTORS OF INFLUENCE ON THE TECHNOLOGICAL PROCESS

The constant development of science and technology, the introduction of numerous innovations, and the complication of technological processes, especially in the part of metrological support, determine the importance of research and analysis of sources of metrological risks, which in a certain way affect the formation of product quality at the manufacturing stage. All this gives rise to many new metrological risks for production, which must be identified, classified, and their causes and consequences must be identified in time. The authors have identified and described the main sources of metrological risks as factors influencing on the technological process and have made their generalized classification, which allows to combine the influencing factors of different nature into certain groups and to facilitate the identification process during the assessment of metrological risks. It is proposed to divide them into sources of the external environment, on which the enterprise can't influence, but only adapt to them, and sources of the internal environment, which can be influenced. The external environment includes socio-economic, scientific-innovative, and natural-ecological factors. The sources of the internal environment include technical, human, and metrological support system factors. Identification should include risks, regardless of their nature, complexity, and controllability. It is recommended to store information about identified risks obtained from various sources in a single information system, which is based on the risk register. It stores information about each risk's identified causes and consequences, and the data is structured according to the proposed classification, allowing it to be described and compared. Such a register allows for obtaining information related to the source of a specific risk and serves as a basis for its assessment and minimization.

Keywords: metrological risks identification, risk register, external factors of influence, internal factors of influence, metrological support of production.

[0000-0001-9082-0771] **Н. М. Козяр¹**, канд. техн. наук,

e-mail: nazarkozyar@ukr.net

[0000-0002-0240-1807] **О. В. Кириченко¹**, д-р техн. наук, професор,

e-mail: okskir@meta.ua

[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса¹**,

e-mail: victory101@ukr.net

[0000-0002-2373-2429] **С. П. Кириченко¹**,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко²**, д-р техн. наук, професор,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-0234-8655] **С. О. Колінько²**, канд. фіз.-мат. наук, доцент,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін²**

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

²Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РІЗНИХ ЧИННИКІВ НА ШВИДКІСТЬ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ КИСНЕВМІСНИХ ОКИСНЮВАЧІВ ТА МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ

Вивчено вплив різних чинників (теплообмін із зовнішнім середовищем, що залежить від діаметра зразка суміші та матеріалу оболонки, яка ізолює його, вологість окиснювача, склад та вологість середовища) на швидкість і стабільність процесу горіння ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2) та металевих палих (Mg , Al , ПАМ) для різних значень технологічних параметрів (співвідношення й дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, вологості окиснювача, діаметра зразка та матеріалу оболонки) і зовнішніх умов (складу та вологості середовища, зовнішнього тиску). Встановлено діапазони зміни параметрів, що характеризують зазначені чинники, в межах яких спостерігається зменшення швидкості горіння сумішей більш, ніж у 2...3 рази, стабілізація процесу горіння та підвищення його стійкості до зовнішніх впливів. Капсуляція частинок порошку окиснювача (наприклад алюмінієм) приводить до зменшення швидкості горіння суміші та підвищення стійкості процесу її горіння до зовнішніх термічних впливів, що пояснюється суттєвим зменшенням вологості окиснювача. Процеси горіння сумішей у повітрі, азоті або аргоні значно різняться, що пояснюється різними кінетичними характеристиками процесів термічного розкладання окиснювачів, окиснення та займання частинок металевих палих у цих середовищах.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, кисневмісні окиснювачі, металеві палні, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

Вступ. Нині піротехнічні вироби на основі ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2 та ін.) і металевих палих (Mg , Al , сплав ПАМ та ін.) широко використовуються у різних галузях народного господарства та військової техніки (освітлювальні, сигнальні й трасувальні засоби, спалахувальні та запалювальні патрони і снаряди, еле-

менти ракетно-космічної техніки та ін.) [1-7]. Зазначені вироби при практичному використанні часто піддаються різним зовнішнім термовпливам (наприклад при пожежах у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах термоударних впливів при запусках та польоті виробів та ін.), що призводить до передчасного пожежовибухонебезпечного спрацювання сумішей [5-8]. В результаті

відбувається руйнування піротехнічних виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння, які розлітаються у різні боки і мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильні матеріали, легкозаймисті будови, пускові установки з обслуговуючим персоналом та ін.) [9-15]. Тому велике практичне значення для запобігання можливим руйнуванням виробів при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні в умовах зовнішніх термічних дій має вміння регулювати швидкість розвитку процесу горіння сумішей, насамперед за допомогою технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, величини та природи добавки органічних і неорганічних речовин та ін.).

Нині достатньо добре вивчено вплив на швидкість горіння зазначених вище технологічних параметрів [1-4, 8, 10, 12, 14]: встановлено діапазони їх зміни, в межах яких процес горіння сумішей протікає стабільно без вибухонебезпечного розвитку; вивчено вплив підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість розвитку процесу горіння сумішей для значень технологічних параметрів, що використовуються у піротехнічному виробництві. Разом з тим, крім перелічених вище основних параметрів, є низка інших не вивчених чинників, які також роблять суттєвий вплив на швидкість горіння сумішей (наприклад теплообмін з навколишнім середовищем, що залежить від діаметра заряду та матеріалу оболонки, яка ізолює його, а також вологість окиснювача, склад та вологість середовища, в якому зберігаються і відпалюються заряди сумішей, зовнішні тиски та ін.).

Мета та задачі досліджень. Мета роботи: встановлення закономірностей впливу теплообміну з навколишнім середовищем, його складу, вологості та тиску, а також вологості окиснювача на швидкість і стійкість процесу розвитку горіння ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів та металевих палих.

Задачами досліджень є:

- визначення сукупності параметрів, що характеризують досліджувані чинники, які приводять до сповільнення і підвищення стійкості процесу горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів;
- встановлення діапазонів зміни зазначених параметрів та зовнішніх умов, при яких

може відбуватися зростання швидкості та зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей.

Виклад основного матеріалу. Зразки піротехнічних сумішей виготовлялися з використанням стандартних методів пресування порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2) та металевих палих (Mg , Al , ПАМ) [1, 4]. Співвідношення компонентів у сумішах характеризується коефіцієнтом надлишку окиснювача α , їх густина – коефіцієнтом ущільнення K_Y , а дисперсність використовуваних промисловістю порошків окиснювачів та металевих палих – середніми розмірами частинок окиснювачів $d_{ок}$ (мкм) та металевих палих d_m (мкм), які розраховувалися за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками.

Коефіцієнт надлишку окиснювача характеризує ступінь відхилення цієї системи від системи стехіометричного складу: $\alpha = \frac{\xi_{ок}}{\xi_m \cdot l_c}$ (ξ_m , $\xi_{ок}$ – відносні масові вмісти у суміші відповідно металевих палих і окиснювача, $l_c \cong 2,9$ – стехіометричний коефіцієнт). При цьому суміші з $\alpha < 1$ вважаються Perezбагаченими металевим палим, при $\alpha > 1$ – Perezбагаченими окиснювачем, а у випадку $\alpha = 1$ – система є стехіометричною.

Коефіцієнт ущільнення $K_Y = \frac{\rho_c}{\rho_{max}}$ (ρ_c – густина зразка (досягнута), ρ_{max} – максимально можлива густина зразка).

Дослідження процесу горіння зразків сумішей проводили на стандартному піротехнічному обладнанні [1, 3]. Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалось за формулою $u = \frac{h}{\tau}$ (h – висота зразка, м; τ – середній час згоряння зразка, с).

Для реєстрації початку та закінчення горіння зразка суміші найнадійнішими є безконтактні методи, при яких датчики, що сприймають зміни яких-небудь фізичних параметрів, не піддаються безпосередній дії високотемпературних продуктів згоряння. До них передусім відносяться методи, що ґрунтуються на застосуванні датчиків теплового випромінювання.

Реєстрація моменту закінчення процесу горіння здійснювалась фотодатчиком (як приймачі випромінювання використовувалися фотодіоди ФД – 1, ФД – 2, ФД – 3а), розташованим напроти заднього торця зразка

і фіксує момент виникнення свічення в отворі заднього торцевого бронювання. Це дає можливість використовувати достатньо просту і доступну у виготовленні конструкцію зразка, відмінну від звичайної конструкції, що широко освоєна піротехнічною промисловістю, тільки наявністю отвору в торцевому бронюванні. Виконання отвору може проводитися без механічної обробки, з мінімальною зміною існуючої технології. За мірну базу при цьому приймається повна висота зразка. Вплив ділянок з нестационарністю процесу на початку і в кінці горіння (кінцеві ефекти) може бути практично виключеним шляхом підбору відповідної висоти заряду.

Істотну роль при вимірюванні швидкості горіння відіграє спосіб запалювання. Основна вимога до способу запалювання – малий час запалювання (що визначається тепловим потоком) в поєднанні з одночасністю запалювання всієї поверхні зразка. Для запалювання зразків найчастіше застосовуються електрична спіраль і порошкове навішування. Час запалювання і поширення полум'я по всій поверхні зразка при підпалі спіралями у декілька разів вищий, ніж при використуванні зерених навішувань, при цьому з останніх найефективнішим є димний порох.

Для запалювання використовувалось зернене навішування димного порошу ДРП, розміщене у спалаховій камері пірогенного

типу з соплом, направленим на заряд, біля торця зразка у спеціальній втулці з прорізами, які забезпечують обтікання торця продуктами згорання навішування.

Відносна похибка вимірювання u не перевищувала 7...9 %. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.

Результати досліджень. В результаті проведених досліджень встановлено, що при горінні стехіометричної суміші $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}$ заміна менш теплопровідної оболонки зразка на більш теплопровідну, тим більше перехід до зразка без оболонки, призводить до значного збільшення швидкості горіння. Швидкість горіння для паперової оболонки – $13,5 \cdot 10^{-3}$ м/с; сталеві – $14,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; мідної – $14,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; без оболонки – $18,6 \cdot 10^{-3}$ м/с ($d_m = 100 \dots 110$ мкм; $d_{ок} = 100 \dots 110$ мкм; $T_0 = 303$ К; діаметр зразків становить $1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $K_v = 0,78$; тиск атмосферний). Теплофізичні властивості матеріалів оболонок наведено у таблиці 1. При цьому функція оболонки зводиться не тільки до теплоізоляції, але й до зміни умов тепловіддачі від нагрітих продуктів горіння до вихідних шарів суміші. Швидкість горіння сумішей з малими діаметрами зразка найбільш суттєво залежить від матеріалу оболонок. Так, за рахунок зміни теплопровідності оболонок можна змінити швидкість горіння суміші у 3...4 рази.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів оболонок [1, 4]

Матеріал	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність c , кДж/кг·К
Латунь	8400	111	0,385
Алюміній	2650	209	0,896
Сталь	7830	53,6	0,465
Мідь	8900	390	0,388

Як видно з таблиці 2, швидкість горіння сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, $\text{PAM} + \text{NaNO}_3$ зі збільшенням теплопровідності оболонки зростає, а у сумішей Mg , Al , PAM з оксидами BaO_2 , MnO_2 швидкість горіння зі збільшенням теплопровідності оболонки зменшується. Швидкість горіння суміші нітрату стронцію з магнієм підвищується зі збільшенням теплопровідності оболонки більшою мірою, ніж суміші магнію з нітратом натрію. Горіння суміші $\text{PAM} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$

та $\text{PAM} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ при підвищенні теплопровідності оболонки взагалі може затухати. У сумішей $\text{Mg} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ швидкість горіння зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності оболонки зростає при малих розмірах частинок металу та, навпаки, зменшується при їх великих розмірах. Встановлено також, що за певних умов (наприклад зі збільшенням розміру частинок окиснювача) швидкість горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ також може зменшуватись при збільшенні теплопровідності оболонки.

Таблиця 2. Вплив матеріалу оболонки на швидкість горіння (10^{-3} м/с) стехіометричних сумішей при атмосферному тиску

Суміш	Коефіцієнт ущільнення суміші, K_y	Без оболонки	Мідь	Сталь	Папір	$\frac{u_{\text{без обол.}}}{u_{\text{папер. обол.}}}$
Ba(NO ₃) ₂ + Mg	0,78	4,9	4,6	3,7	3,4	1,4
Sr(NO ₃) ₂ + Mg	0,78	4,8	4,6	3,4	3,2	1,4
BaO ₂ + Mg	0,77	11,2	5,0	5,1	5,2	2,7
MnO ₂ + Mg	0,57	12,8	4,9	5,0	5,6	2,2
NaNO ₃ + Al	0,78	—	—	—	1,2	—
BaO ₂ + Al	0,77	8,2	2,7	2,8	3,7	2,2
MnO ₂ + Al	0,53	8,8	3,6	4,1	4,2	2,1
NaNO ₃ + ПАМ	0,78	4,9	4,6	3,6	2,9	1,7
BaO ₂ + ПАМ	0,77	10,2	3,3	3,4	4,0	2,6
MnO ₂ + ПАМ	0,57	10,0	3,8	4,0	4,4	2,3

Примітка: для магнію $d_m = 94$ мкм; для алюмінію $d_m = 34$ мкм; для сплаву ПАМ $d_m = 94$ мкм; $d_{ок} = 94$ мкм; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків – $1,5 \cdot 10^{-2}$ м

Перехід від зразка суміші Mg + NaNO₃ в оболонці (наприклад паперовій) до зразка без оболонки призводить, крім збільшення швидкості горіння, також до зміщення положення максимуму на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку окиснювача (рисунк 1), при цьому найсильніше зазначений вплив проявляється в області $\alpha = \alpha_{u_{max}}$ та значно послаблюється при $\alpha > 1,0$.

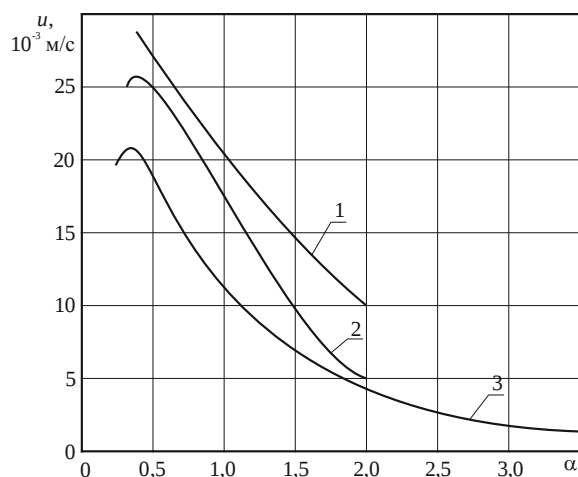


Рисунок 1. Вплив діаметра зразка суміші Mg + NaNO₃ на залежність швидкості горіння при атмосферному тиску від α ($K_y = 0,85$; МПФ-3; $d_{ок} < 380$ мкм; $T_0 = 293$ К) при діаметрі зразка D : 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м (без оболонки); 2 – $D = 2,55 \cdot 10^{-2}$ м (без оболонки); 3 – $D = 2,55 \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова)

Збільшення ступеня вологості NaNO₃ призводить до зростання швидкості горіння суміші Mg + NaNO₃ (рисунк 2). Капсуляція частинок порошку NaNO₃ металами (у цьому

випадку алюмінієм) призводить до вельми суттєвого послаблення залежності $u(P)$ (рисунк 3), при цьому зі зменшенням K_y зазначений вплив капсуляції частинок порошку окиснювача на залежність $u(P)$ помітно підсилюється.

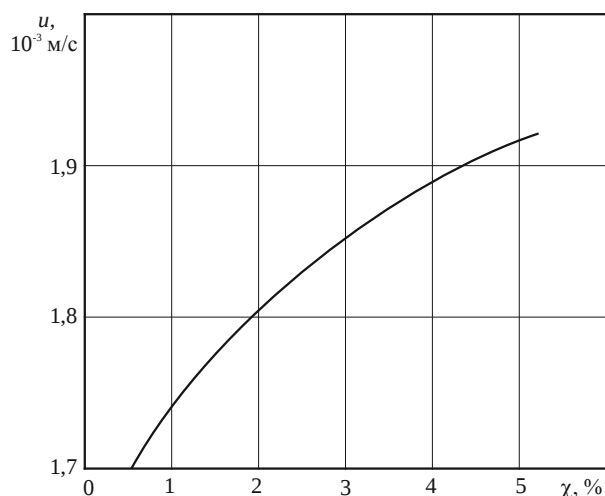


Рисунок 2. Залежність швидкості горіння суміші NaNO₃ + ПА-4 при атмосферному тиску від вмісту води χ ($K_y = 0,9$; $d_{ок} = 100 \dots 140$ мкм; $T_0 = 293$ К)

На швидкість горіння сумішей впливає склад навколишнього газового середовища. Наприклад, при горінні сумішей Mg з NaNO₃ у випадку відхилення складу суміші від стехіометричного швидкості горіння у повітрі, азоті й аргоні суттєво різняться (рисунк 4). Спалювання зразків суміші у зволоженому середовищі (у цьому випадку у вологому повітрі) приводить до значного

зменшення швидкості горіння та вельми суттєвого зміщення положення максимуму

на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку металевого пального (рисунк 5).

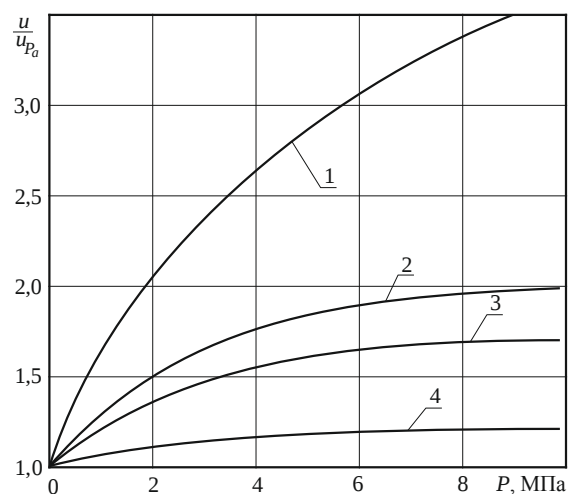


Рисунок 3. Вплив капсульованого NaNO_3 на залежність відносної швидкості горіння суміші МПФ-4 + NaNO_3 від P ($\alpha = 1,0$; $d_{ок} = 100...140$ мкм): 1 – NaNO_3 вихідний ($K_V = 0,7$); 2 – NaNO_3 , капсульований алюмінієм ($K_V = 0,7$); 3 – NaNO_3 вихідний ($K_V = 0,9$); 4 – NaNO_3 , капсульований алюмінієм ($K_V = 0,9$)

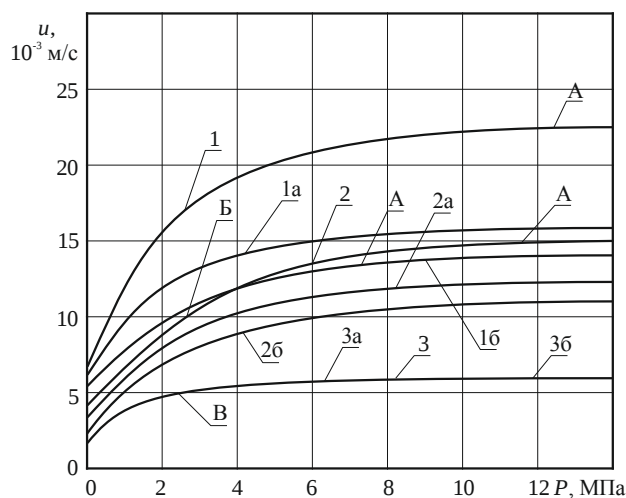


Рисунок 4. Залежність швидкості горіння сумішей МПФ-3 + NaNO_3 від P у різних середовищах: А – 50 % МПФ-3 + 50 % NaNO_3 (1 – повітря; 1а – азот; 1б – аргон); Б – 40 % МПФ-3 + 60 % NaNO_3 (2 – повітря; 2а – азот; 2б – аргон); В – 29,4 % МПФ-3 + 70,6 % NaNO_3 (3 – повітря; 3а – азот; 3б – аргон)

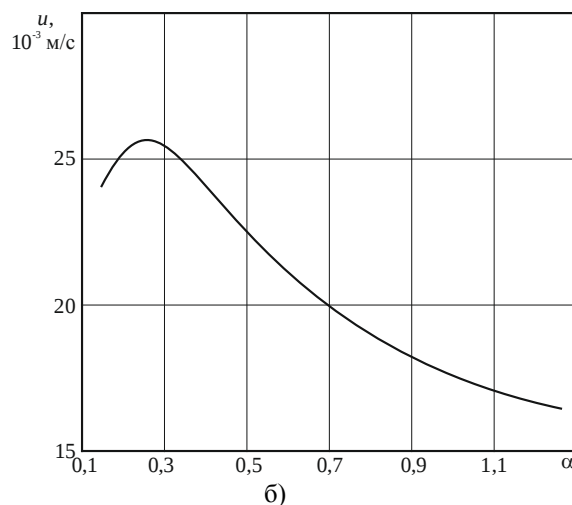
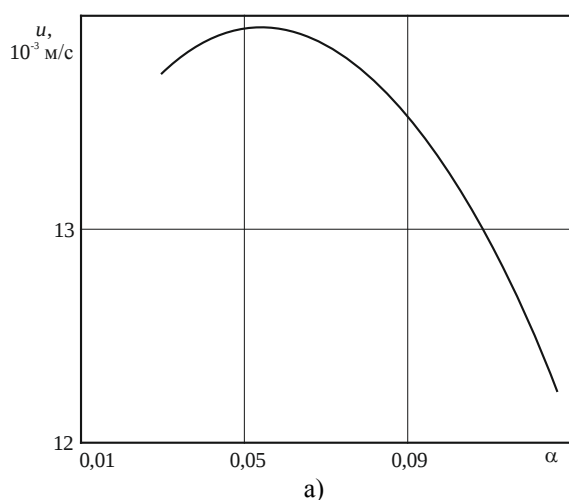


Рисунок 5. Вплив вологості повітря на залежність швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ від α ($K_V = 0,88$; $d_m = 75...105$ мкм; $d_{ок} = 250$ мкм): а) – вологе повітря; б) – сухе повітря

Обговорення результатів. Встановлено, що одна й та ж оболонка може як уповільнювати, так і прискорювати горіння сумішей залежно від умов спалювання та рецептури суміші: наприклад, швидкість горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ при $\alpha > 1$ (надлишок окиснювача) у сталевій оболонці вища, ніж у картонній. Та ж суміш при $\alpha < 1$ (надлишок пального) горить з більшою швидкістю у картонних оболонках, ніж у сталевих; при

цьому процес горіння сумішей стає нестабільним та вибухонебезпечним. Швидкість горіння сумішей суттєво залежить від діаметра зразка: наприклад, суміші $\text{NaNO}_3 + \text{ПА-4}$ ($\alpha = 0,63$), які запресовані у картонні оболонки діаметром, меншим $2 \cdot 10^{-2}$ м, при атмосферному тиску не горять ($d_{ок} \leq 280$ мкм, $T_0 = 293$ К); процес горіння сумішей, які запресовані в оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-2}...3 \cdot 10^{-2}$ м, протікає нестабільно; стабільне горіння су-

мішей при атмосферному тиску спостерігається лише у сумішей, які запресовані в оболонки діаметром, більшим $3 \cdot 10^{-2}$ м. При цьому з підвищенням зовнішнього тиску критичний діаметр зразка суміші, що горить, зменшується. До підвищення стабільності процесу горіння сумішей приводять також зміна співвідношення компонентів, зменшення розміру частинок металевих пального, підвищення коефіцієнта ущільнення суміші.

При цьому капсуляція частинок порошку окиснювача (наприклад алюмінієм) приводить до зменшення швидкості горіння суміші та підвищення стійкості процесу її горіння до зовнішніх термічних впливів, що пояснюється суттєвим зменшенням вологості окиснювача. Крім цього, на швидкість горіння сумішей значно впливають склад та вологість навколишнього середовища: наприклад, процеси горіння сумішей у повітрі, азоті або аргоні значно різняться, що пояснюється різними кінетичними характеристиками процесів термічного розкладання окиснювачів, окиснення та займання частинок металевих палих у цих середовищах; у вологих середовищах процес горіння сумішей уповільнюється та стає більш стабільним внаслідок наявності у продуктах розкладання окиснювачів значної кількості парів води, що уповільнюють процеси екзотермічного окиснення частинок металевих пального.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу різних чинників на швидкість горіння піротехнічних сумішей на основі порошків кисневмісних окиснювачів і металевих палих отримано наступні нові результати:

1. Заміна більш теплопровідної оболонки зразка сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, ПАМ + NaNO_3 на менш теплопровідну (наприклад металеву на паперову) приводить до зменшення швидкості горіння більш, ніж у 2...3 рази та помітної стабілізації процесу горіння. Найбільш сильний вплив коефіцієнта теплопровідності оболонки виявляється зі збільшенням розміру частинок металевих пального та окиснювача. Стабільне горіння при атмосферному тиску спостерігається тільки у зразків сумішей, які запресовані в оболонки діаметром, більшим $3 \cdot 10^{-2}$ м, а при підвищенні зовнішнього тиску

(до 10 МПа) значення зазначеного діаметра зменшуються у декілька разів. Крім цього, до підвищення стабільності процесу горіння сумішей приводить також регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення). Зменшення ступеня зволоження окиснювача (наприклад NaNO_3 або $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ шляхом капсуляції його частинок (наприклад алюмінієм)) також приводить до зменшення швидкості горіння суміші та його стабілізації. Капсуляція частинок порошків окиснювачів приводить до послаблення залежності $u(P)$ та підвищення стійкості процесу горіння сумішей до зовнішніх термічних впливів.

2. Швидкість горіння сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, ПАМ + NaNO_3 зі збільшенням теплопровідності оболонки зростає більш, ніж у 3...4 рази, а процес горіння стає нестабільним і вибухонебезпечним. При цьому перехід від зразка суміші в оболонці (наприклад паперовій) до зразка без оболонки призводить до збільшення швидкості горіння та до зміни характеру залежності $u(\alpha)$: максимум на кривій зміщується у бік надлишку окиснювача.

Незалежно від матеріалу оболонки, процес горіння сумішей, які запресовані в оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-2}$... $3 \cdot 10^{-2}$ м, протікає нестабільно. Зменшення вологості зовнішнього середовища (наприклад повітря) призводить до зростання швидкості горіння сумішей, зміщення положення максимуму на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку металевих пального та, у цілому, до дестабілізації процесу горіння сумішей.

Перспективи подальших досліджень.

Надалі планується проведення досліджень щодо визначення залежностей швидкості горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин від параметрів зовнішніх термічних впливів (підвищення температури нагріву, зовнішні тиски, швидкості обдуву потоком повітря та ін.), що дозволяє встановлювати критичні діапазони зміни цих параметрів, перевищення яких може призводити до передчасного займання зарядів сумішей і пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі в умовах зберігання, транспортування та застосування.

Список використаних джерел

- [1] О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, та Ю. Г. Лега, *Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів*. Київ, Україна: Наукова думка, 2012.
- [2] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвузів. темат. зб. наук. пр.*, вип. 19, с. 323-332, 2018.
- [3] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [4] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 56-67, 2019.
- [5] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [6] Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, та В. В. Цибулін, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [7] Є. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв* Чорнобиля Нац. ун-ту цивільного захисту України, т. 5, № 2, с. 37-51, 2021.
- [8] Є. П. Кириченко, В. В. Ковалишин, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- [9] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, та В. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [10] Є. Кириченко, "Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках", *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивільного захисту України*, т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.
- [11] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацювання піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 122-130, 2022.
- [12] Є. П. Кириченко, "Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 53-63, 2022.
- [13] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.
- [14] В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, та О. І. Гарасим'юк, "Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей", *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14, 2016.
- [15] О. В. Kyrychenko, О. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and

S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.

References

- [1] O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, and Yu. G. Lega, *Fundamentals of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in the conditions of external thermal influences*, Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2012 [in Ukrainian].
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, O. C. Baranovsyy, and V. V. Tsybulin, "Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures", *Nauka ta vyrobnytstvo: interuniversity thematic collection of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [3] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskiy, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [4] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the influence of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products based on them", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [5] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [6] R. B. Motrichuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Ye. P. Kyrychenko, and V. V. Tsybulin, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [7] Ye. Kyrychenko, "Study of the processes of external thermal shock effects on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of a shot and flight", *Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya: coll. of sci. papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [8] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozdz, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [9] Ye. Kyrychenko, V. Gvozdz, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Dyadushenko, and V. Melnyk, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [10] Ye. Kyrychenko, "Investigation of ignition processes and the development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures made of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures", *Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya: coll. of sci. papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine*, vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].
- [11] Ye. Kyrychenko, V. Gvozdz, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, and O. Dyadushenko, "Prevention of premature triggering of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium, aluminum powders and metal oxides under conditions of external thermal effects", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 122-130, 2022 [in Ukrainian].

- [12] Ye. P. Kyrychenko, "Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [14] V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, and O. I. Garasimyyuk, "Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures", *Science Rise*, no. 2 (22), pp. 11-14, 2016 [in Ukrainian].
- [15] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.

N. M. Kozyar¹, *Cand. Tech. Sc.*,
O. V. Kyrychenko¹, *Dr. Tech. Sc., Professor*,
V. O. Kovbasa¹,
Ye. P. Kyrychenko¹,
V. A. Vaschenko², *Dr. Tech. Sc., Professor*,
S. O. Kolinko², *Cand. Phys. and Math. Sc., Associate Professor*,
V. V. Tsybulin²

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl
of the National University of Civil Defense of Ukraine
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON THE RATE OF DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS OF PYROTECHNIC MIXTURES BASED ON OXYGEN-CONTAINING OXIDIZERS AND METALLIC FUELS

Of great practical importance in preventing possible destruction of pyrotechnic products based on mixtures of powders of oxygen-containing oxidants and metal fuels in conditions of external thermal effects is the ability to regulate the speed of development of the combustion process of mixtures, first of all, with the help of technological parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient, amount and nature of additives of organic and inorganic substances, etc.). Currently, the influence of the above-mentioned technological parameters on the burning rate is sufficiently well studied. In addition to the main parameters listed above, there are a number of other unstudied factors that also have a significant impact on the burning rate of mixtures (for example, heat exchange with the environment, which depends on the diameter of the charge and the material of the shell that isolates it, as well as the humidity of the oxidizer, composition and humidity of environment in which mixture charges are stored and fired, external pressures, etc.).

The purpose of the work is to establish the regularities of the influence of heat exchange with the environment, its composition, humidity and pressure, as well as the humidity of the oxidizer on the speed and stability of the combustion process of compacted mixtures of oxygen-containing oxidizer powders and metal fuels.

Replacement of more heat-conductive shell of a sample of $Mg + NaNO_3$, $Mg + Sr(NO_3)_2$, $Al + NaNO_3$, $PAM + NaNO_3$ mixtures with a less heat-conductive one (for example, metal with paper one) leads to a decrease in the burning rate by more than 2...3 times and a noticeable stabilization of the combustion process. The strongest influence of the coefficient of shell thermal conductivity is manifested with an increase in the size of the particles of metal fuel and oxidizer. The regulation of techno-

logical parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient) also leads to an increase in the stability of the combustion process of mixtures. The reduction of the degree of hydration of the oxidizing agent (for example, NaNO_3 or $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ by encapsulating its particles (for example, with aluminum)) also leads to a decrease in the burning rate of the mixture and its stabilization. The encapsulation of particles of oxidizing powders leads to a weakening of the $u(P)$ dependence and an increase in the resistance of the mixture combustion process to external thermal influences.

The burning rate of mixtures of $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, $\text{PAM} + \text{NaNO}_3$ increases more than 3...4 times with the increase in thermal conductivity of the shell, and the burning process becomes unstable and explosive. The transition from a sample of the mixture in a shell (for example, a paper one) to a sample without a shell leads to an increase in the burning rate and to a change in the nature of the $u(\alpha)$ dependence: the maximum on the curve shifts to the side of the oxidant excess. A decrease in the humidity of the external environment (for example, air) leads to an increase in the rate of combustion of mixtures, a shift of the position of the maximum on the curve $u(\alpha)$ towards an excess of metallic fuel and, in general, to a destabilization of the combustion process of mixtures.

Keywords: fire safety, pyrotechnic mixtures, oxygen-containing oxidizers, metal fuels, burning speed, stability of burning process, external influences.

[0000-0002-6885-3662] **І. М. Іваненко**, канд. хім. наук, доцент
e-mail: i.ivanenko@kpi.ua

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ ШЛЯХОМ ГІДРОЛІЗУ БОРОГІДРИДІВ

Пошук чистої енергії для заміни енергії викопного палива є актуальною проблемою сучасності. Водень вважається придатним кандидатом для виробництва чистого та стійкого палива через його доступність, високу щільність енергії та відсутність забруднення. Відносно безпечним і недорогим способом отримання достатньої кількості водню є гідроліз борогідридів. Так, наприклад, борогідрид натрію має високу гравіметричну щільність енергії 9300 Вт·год/кг; містить ~10,6 мас.% водню і його розчин може вивільнити 90 % і більше стехіометричної кількості водню через реакцію гідролізу, яку можна проводити в умовах навколишнього середовища. При використанні відповідного каталізатора можна не тільки прискорити реакцію гідролізу NaNH_2 , але й регулювати кількість виділеного водню і швидкість його утворення.

У статті розглядаються такі важливі аспекти, як перспективність водних лужних розчинів борогідриду натрію для рідиннофазного хімічного зберігання водню, особливо в низькотемпературних паливних елементах, а також його місце в загальному ланцюгу водневої енергетики. Обговорюються методи вимірювання об'єму водню під час гідролізу борогідриду натрію; аналізується рН розчинів борогідриду натрію та його вплив на швидкість гідролізу. Розкриваються чотири найбільш вживані механізми реакції гідролізу борогідриду натрію.

Ключові слова: відновлювальна енергія, воднева енергетика, борогідрид натрію, напіврозклад, механізм реакції.

Вступ. Величезний попит на енергію останніми роками викликає швидке зменшення запасів викопного палива та збільшення викидів парникових газів у навколишнє середовище. Перехід від невідновлюваних ресурсів, таких як викопне паливо, до відновлюваної енергії на сьогодні розглядається як рішення для пом'якшення проблем енергетичної кризи та зменшення залежності від вуглецевмісного викопного палива для сталого майбутнього [1, 2]. Водень як екологічно чистий носій енергії розглядається як один із ключових сировинних компонентів для широкомасштабного застосування у відновлюваних джерелах енергії та ефективного розподілу енергії, зокрема в поєднанні з технологією паливних елементів [3, 4]. Однак широке впровадження водневої економіки все ще стикається з кількома проблемами, які пов'язані з його чистим виробництвом, ефективним зберіганням, безпечним і економічним розподілом.

Ключова проблема зберігання і транспортування водню через його вибухонебезпечність може бути вирішена декількома способами, одним з яких є використання борогідридів з подальшим їх гідролізом. Борогідриди –

негорючі й екологічно чисті сполуки як в сухому, так і в розчиненому стані з високим відношенням щільності енергії до маси і є чудовим матеріалом для зберігання водню. Реакція гідролізу борогідридів є рідиннофазним каталітичним гетерогенним процесом з виділенням тепла, а продукт їх розкладання, метабора, може бути використаний надалі як накопичувач водню. Швидкість розкладання борогідридів можна регулювати і контролювати за допомогою відповідного каталізатора. Питанню розробки нових та оптимізації традиційних каталізаторів гідролізу та/або розкладання борогідридів присвячено чимало наукових досліджень, за результатами яких лише на ScienceDirect надруковано майже 75 тисяч статей. Однак більшість з них зосереджена на характеристиках отриманих каталітично-активних матеріалів, а також на вивченні кінетики процесу вивільнення водню з борогідридів. Лише окремі одиничні роботи вивчали значення і перспективи борогідридної водневої енергетики; мало хто зосереджувався на механізмі цього хімічного процесу і, найцікавіше, дослідження впливу рН на кінетику цільового каталітичного процесу відбувалось

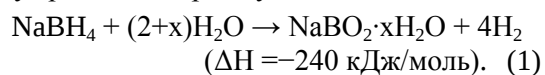
при повному ігноруванні явища самогідролізу і саморозкладання борогідридів.

У зв'язку з цим **метою** представленої оглядової статті було не висвітлення основних традиційних аспектів відомого каталітичного процесу гідролізу та/або розкладання борогідридів, а зосередження на тих важливих його нюансах, яким в опублікованих наукових працях майже не приділено уваги. Для цього вирішувалися такі **задачі дослідження**: охарактеризувати перспективність водних лужних розчинів борогідриду натрію для рідиннофазного хімічного зберігання водню, особливо в низькотемпературних паливних елементах, а також його місце в загальному ланцюгу водневої енергетики; представити методи вимірювання об'єму водню під час гідролізу борогідриду натрію; проаналізувати рН розчинів борогідриду натрію та його вплив на швидкість гідролізу; висвітлити механізми реакції гідролізу борогідриду натрію.

Виклад основного матеріалу. Опис методу. Гідроліз борогідридів являє собою вельми перспективний фізико-хімічний процес для генерування та/або зберігання водню. Борогідрид натрію (NaBH_4), також відомий як тетрагідроборат натрію, є одним з найбільш вивчених і досліджених вихідних матеріалів для цього процесу.

Вихідні дані. Індустріальне виробництво NaBH_4 реалізується методом Брауна-Шлезінгера за допомогою реакції гідриду натрію з триметилборатом ($4\text{NaH} + \text{B}(\text{OCH}_3)_3 \rightarrow \text{NaBH}_4 + 3\text{NaOCH}_3$) за температури 523-553 К. Інший промисловий процес, метод Байєра, використовує мелене боросилікатне скло, натрій і водень ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 7\text{SiO}_2 + 16\text{Na} + 8\text{H}_2 \rightarrow 4\text{NaBH}_4 + 7\text{Na}_2\text{SiO}_3$), а отриманий NaBH_4 екстрагується з борогідрид-силікатної суміші рідким аміаком під тиском.

Методика експериментів. NaBH_4 є одним з найбільш привабливих і широко використовуваних матеріалів завдяки своїй високій водневій ємності. Хімічне рівняння (1) описує реакцію гідролізу NaBH_4 [5]:



У рівнянні (1) x відповідає надлишку води і в реакції за температури, нижчої 100°C , кожний моль продукту зазвичай містить 2 моля води, що означає $x=2$.

Процес гідролізу NaBH_4 має повільну швидкість, особливо за кімнатної температу-

ри. Кислоти, а також платинові, паладієві, рутенієві та інші металічні каталізатори її значно прискорюють. Швидкість цієї реакції сильно залежить від робочої температури. На основі каталізатора оксиду кобальту, насиченого вуглецем, ($\text{C-Co}_3\text{O}_4$) максимальна швидкість утворення водню становить 5430 мл/(хв·г) при 47°C , тоді як при 27°C відповідна швидкість утворення водню становить лише 1176 мл/(хв·г) [5].

Загальна схема експериментів. Борогідрид натрію має високу гравіметричну щільність енергії, що становить $\sim 9300 \text{ Вт}\cdot\text{год/кг}$. Реакцію гідролізу NaBH_4 для отримання водню можна реалізовувати в умовах навколишнього середовища. Розчин NaBH_4 може вивільнити 90 % стехіометричної кількості водню в результаті реакції гідролізу. NaBH_4 можна вважати «розщеплювачем води», оскільки 50 % утворюваного водню виробляється саме з води. Цю реакцію можна використовувати в матеріалознавстві для приготування наночастинок, для екологічних застосувань, таких як видалення нітросполук та розкладання барвників. Водень, отриманий в результаті гідролізу борогідридів, може бути використаний для енергетичних застосувань, таких як двигуни внутрішнього згоряння, системи живлення паливних елементів, включаючи елементи з полімерним електролітом, мембранний паливний елемент (PEMFC), прямий борогідридний паливний елемент (DBFC) і невеликі портативні енергетичні пристрої, які можуть живити невеликі пристрої, такі як стільниковий телефон і незакріплена антена транспортних засобів тощо.

Результати досліджень.

Загальний ланцюг водневої енергетики. Ланцюг водневої промисловості в найбільш загальному вигляді включає п'ять послідовних складових: виробництво водню, зберігання та постачання водню, його розподілення, водневі паливні елементи та застосування, як показано на рисунку 1. Серед цих складових частин водневої енергетики перша (the upstream) і остання (the downstream) розвинені високою мірою, особливо це стосується виробництва водню та паливних елементів з протонообмінною мембраною (PEMFC) (див. рисунок 1). Технологія ж зберігання і доставки водню (the midstream) все ще є слабким місцем у загальному ланцюгу водневої промисловості, що має негативний вплив на комерційний розвиток водневої енергетики [5].

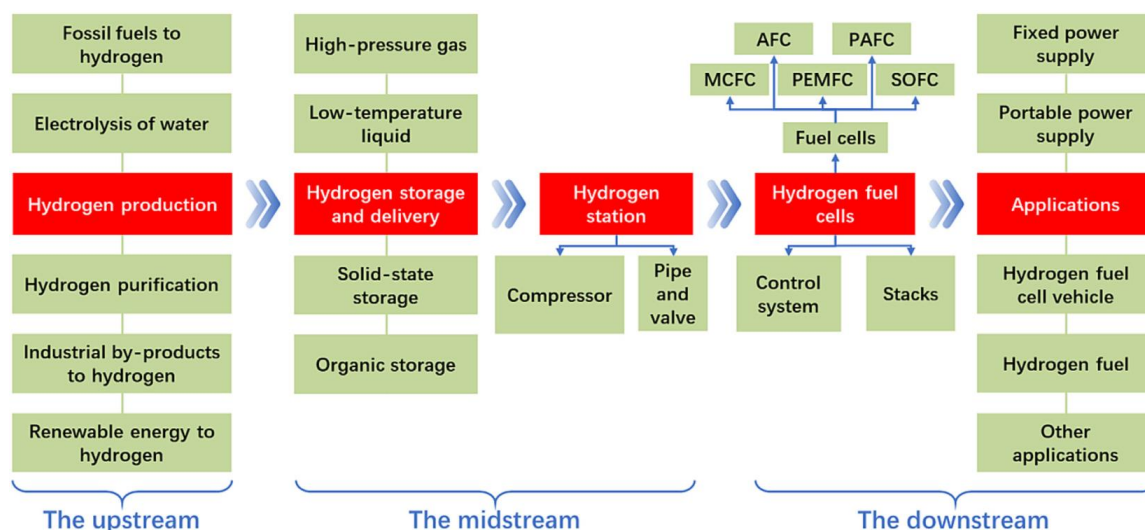


Рисунок 1. Ланцюг водневої енергетики [5]

Твердотільні накопичувачі водню можна розділити на фізикосорбційні та хемосорбційні залежно від характеру взаємодії між газоподібним воднем і твердими матеріалами, як показано на рисунку 2 [5]. Електрохімічне зберігання водню також відноситься до твердотілого накопичування водню. Електрохімічний метод фактично зберігає іони водню як мобільні заряди, що використовуються в оборотних батареях, а не в паливних елементах. Фізична сорбція газоподібного водню

відбувається на розвиненій поверхні матеріалів завдяки силам Ван-дер-Ваальса. Типові матеріали для фізикосорбції включають металоорганічні каркаси, клатратні гідрати, цеоліти та матеріали на основі карбону. Під час процесу хемосорбції газоподібний водень хімічно реагує з твердими матеріалами, утворюючи стабільні гідриди, які можна класифікувати на три категорії: елементні гідриди, інтерметалічні гідриди та складні гідриди (див. рисунок 2) [5].

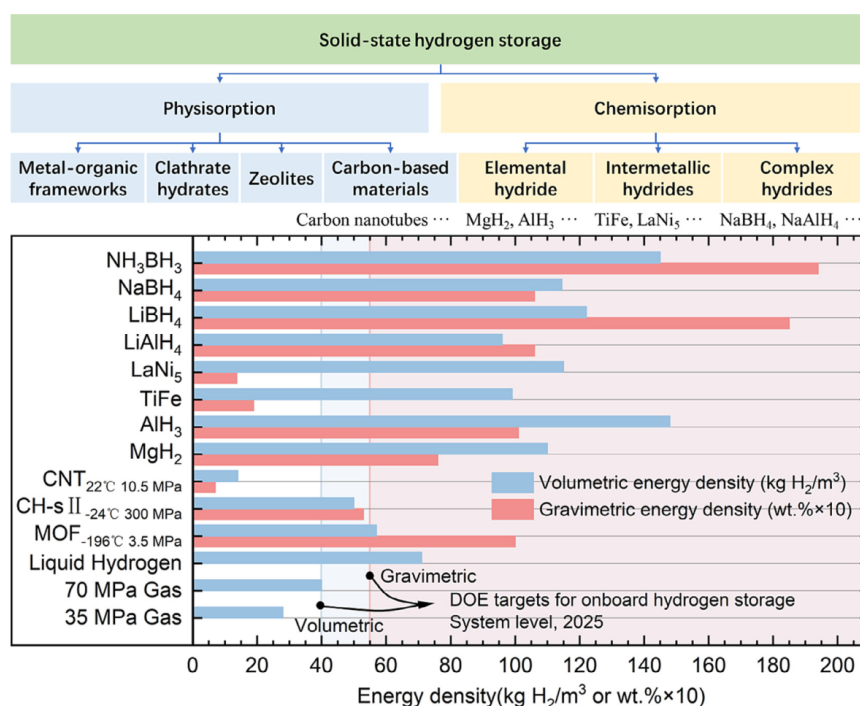
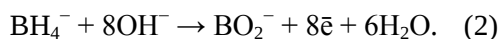


Рисунок 2. Технологія твердотілого зберігання водню та порівняння густини енергії, отримуваної різними методами [5]

Хімічні гідриди являють собою надійні джерела для виробництва та/або зберігання водню; є перспективними для отримання водню шляхом гідролізу і можуть забезпечити вимоги для промислового застосування. Вивільнений водень може бути використаний для енергетичних застосувань, таких як двигуни внутрішнього згоряння, металоповітряні джерела живлення та системи живлення паливних елементів, включаючи полімерну електролітну мембрану та борогідридні паливні елементи, а також невеликі портативні енергетичні пристрої, які можуть жити невеликі пристрої, такі як стільниковий телефон, безпілотні літальні апарати [2-3].

Зокрема борогідрид натрію (NaBH_4) має високу гравіметричну щільність енергії 9300 Вт·год/кг; містить ~10,6 мас.% водню (H_2) і його розчин може вивільнити 90 % і більше стехіометричної кількості H_2 через реакцію гідролізу, яку можна проводити в умовах навколишнього середовища.

Борогідрид натрію для водневої енергетики. Водні лужні розчини борогідриду натрію (тетрагідроборат натрію, NaBH_4) є дуже перспективними для рідиннофазного хімічного зберігання водню, особливо в низькотемпературних паливних елементах. Розчин NaBH_4 можна використовувати безпосередньо як рідке паливо для прямого борогідридного паливного елемента, робота якого базується на анодному електроокисненні борогід-аніонів BH_4^- , згідно з реакцією (2) [6]:



Також борогідрид натрію можна використовувати як «непряме паливо» для паливного елемента, фактично як носій водню. У цьому випадку пара $\text{NaBH}_4\text{--H}_2\text{O}$ дегідрується шляхом гідролізу відповідно до рівняння (3) у присутності відповідного каталізатора, а утворений газоподібний водень надалі окиснюється на аноді паливного елемента [6]:



Спосіб генерування водню шляхом гідролізу борогідриду натрію (NaBH_4) як одна з альтернатив резервуарам водню під тиском привернув велику увагу завдяки своїй негорючості, нетоксичності, високому вмісту водню (10,8 % за масою), стабільності в лужному розчині, легкому вивільненню H_2 , що не міс-

тить CO , шляхом гідролізу в присутності каталізатора навіть за кімнатної температури та рециркуляції побічних продуктів реакції [7].

Теоретично один моль NaBH_4 реагує з двома молями води з утворенням в результаті реакції гідролізу чотирьох молей водню. Однак система $\text{NaBH}_4\text{--H}_2\text{O}$ має кілька недоліків. Основним є зниження ефективності зберігання, пов'язане з утворенням гідратованого борату натрію як побічного продукту реакції, для розчинення якого необхідна велика кількість надлишку води [8]. Відповідно, гравіметрична ємність водню зменшується від 10,8 до 7,3 і 5,5 мас.% для $x = 2$ і 4 згідно з рівнянням (1) [8].

Крім того, концентрація NaBH_4 за температури 25 °C має бути нижчою 16 г на 100 г H_2O через низьку розчинність борату натрію (28 г на 100 г H_2O) [9]. Ефективність зберігання системи $\text{NaBH}_4\text{--H}_2\text{O}$ може значно знизитися після додавання стабілізатора (зазвичай NaOH), який необхідний для пригнічення самогідролізу, коли водень не потрібен. Незважаючи на це, натрій борогідрид все ще має потенціал застосування у нішевих і портативних паливних елементах, хоча міністерство енергетики США не надало жодних рекомендацій щодо застосувань NaBH_4 у бортових і транспортних засобах [7, 9].

При використанні відповідного каталізатора можна не тільки прискорити реакцію гідролізу NaBH_4 , але й регулювати кількість виділеного H_2 і швидкість його утворення.

Методи вимірювання об'єму водню під час гідролізу борогідриду натрію. Каталітичну активність матеріалу можна оцінити за допомогою вимірювання об'єму водню, що утворюється під час гідролізу NaBH_4 . Це можна зробити кількома методами, включаючи прилади для вимірювання виділення газу, вододозабірний метод і електронні ваги з високою точністю.

Найпоширенішим методом вимірювання об'єму виділеного водню є простий, дешевий, але достатньо точний метод витіснення води. Існують різні конструкції установок та апаратів для проведення реакції гідролізу в лабораторних умовах, в основному з використанням скляного посуду, як це показано на рисунку 3 [1].

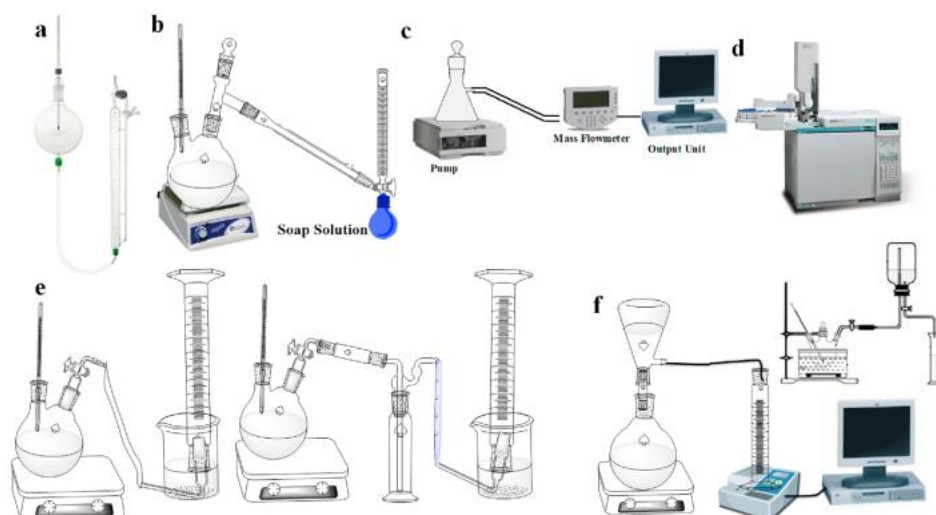


Рисунок 3. Методи вимірювання об'єму водню, що виділяється під час гідролізу NaBH_4 :

a) прилад для виділення газу; b) бульбашковий витратомір; c) масовий витратомір; d) газовий хроматограф; e) установка витіснення води; f) установка водовідведення [1]

pH розчинів борогідриду натрію та його вплив на швидкість гідролізу. Розчини борогідриду натрію у воді мають лужну реак-

цію; значення pH залежить від концентрації і зростає зі збільшенням вмісту NaBH_4 , як показано в таблиці 1 [10].

Таблиця 1. Значення pH розчинів борогідриду натрію за температури 24 °C [10]

Концентрація, моль/дм ³	0,01	0,1	1
pH	9,56 ± 0,02	10,05 ± 0,02	10,48 ± 0,02

Швидкість гідролізу NaBH_4 сильно залежить від pH. В кислотах гідроліз NaBH_4 відбувається практично спонтанно, а в сильно

лужному діапазоні розчини NaBH_4 порівняно стабільні за нормальних умов, як показано в таблиці 2 [10, 11].

Таблиця 2. Період напіврозкладу NaBH_4 за температури 25 °C [10, 11]

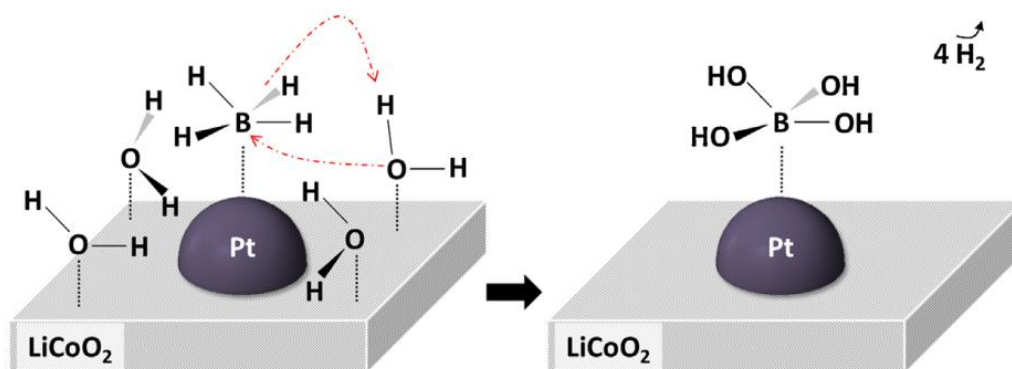
pH	4,0	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
t(½)	3,7 млхв	37 млхв	0,12 хв	0,37 хв	3,7 хв	36,8 хв	6,1 хв	61,4 хв	10,2 год	4,3 діб	42,6 діб	426 діб

Кінетика гідролізу NaBH_4 описується рівнянням псевдопершого порядку, а залежність швидкості гідролізу від pH і температури розраховується за допомогою емпіричної формули (4) [12-16]:

$$\log(t_{1/2}) = pH - (0,034 \cdot T - 1,92). \quad (4)$$

Механізм реакції. Один із перших механізмів був запропонований у 2002 р. Kojima та ін. [17], які повідомили про свій погляд на гідроліз BH_4^- у присутності Pt-каталізатора на LiCoO_2 -носії. Автори припустили, що BH_4^- адсорбується на Pt, тоді як H_2O адсорбується на носії, відповідно до моделі Ленгмюра–

Хіншеллуда. Потім адсорбовані частинки взаємодіють, внаслідок чого гідриди BH_4^- і протони молекул H_2O реагують з утворенням чотирьох еквівалентів H_2 , тоді як атоми кисню молекули води зв'язуються з атомом бору аніону BH_4^- . Kojima з колегами запропонували утворення BO_2^- як кінцевого продукту. Оскільки пізніше авторами [18, 19] було доведено, що B(OH)_4^- є більш термодинамічно стабільною сполукою, ніж BH_4^- , і її утворення є більш вірогідним, то механізм процесу можна описати, як зображено на рисунку 4.

Рисунок 4. Схематичне зображення гідролізу BH_4^- і H_2O на Pt-LiCoO_2 [6, 17]

Liu та ін. [20] також досліджували гідроліз борогідриду натрію за допомогою Pt-LiCoO_2 . Використовували рентгенівське поглинання і підтвердили механізм, запропонований Kojima та ін. Для платини, нанесеної на Co_3O_4 , Hung et al. [21] повідомили про каталітичний механізм, натхненний попереднім, де Co_3O_4 відіграє порівнянну роль LiCoO_2 . Механізм, запропонований усіма цими авторами, узгоджується з моделлю Ленгмюра–Хіншелвуда, де обидва реагенти адсорбуються на поверхні каталізатора і реагують з утворенням H_2 і B(OH)_4^- .

Andrieux та ін. [22] продемонстрували справедливості бімолекулярного механізму Ленгмюра–Хіншелвуда в умовах їхнього експерименту та запропонували відповідну схему реакції гідролізу борогідриду натрію у присутності наночастинок кобальту (рисунок 5). Каталітичний процес включає два різні адсорб-

ційні центри, позначені як А і В. Вважається, що адсорбційні центри А є такими багатими на електрони елементами, як $\text{O}^{\delta-}$ або Co^0 , тоді як центри В є електронodefіцитними, як $\text{Co}^{\delta+}$. Гідроліз чотирьох гідридів BH_4^- відбувається один за одним шляхом взаємодії з одним адсорбованим H_2O для кожного гідриду. Проте автори сумнівались щодо можливої десорбції проміжних продуктів реакції, кінетики елементарних стадій, природи адсорбційних центрів і каталітичної поверхні. Припускалось, що гідроліз чотирьох молекул гідриду буде реалізовано з чотирма різними адсорбованими молекулами H_2O при адсорбції аніона BH_4^- . При порівнянні механізмів Kojima та ін. [17] і Andrieux та ін. [22] помітно, що перша група неявно припускає, що адсорбційними центрами А є металева Pt, а центрами В – електродефіцитний Li або Co (рисунки 4 і 5).

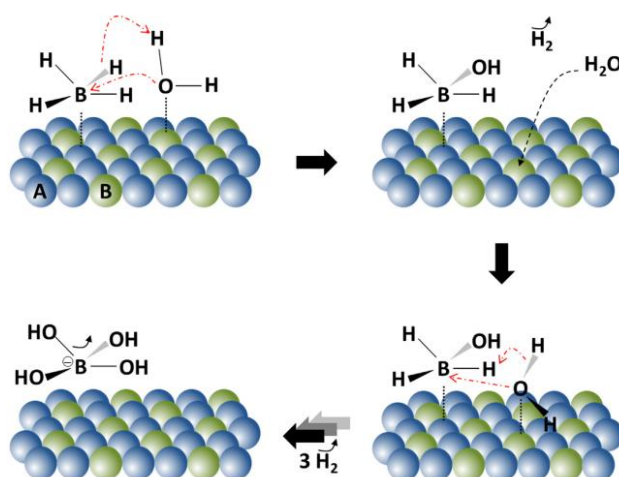


Рисунок 5. Схематичне зображення механізму Ленгмюра–Хіншелвуда, запропонованого Andrieux та ін. [22] для пояснення поверхневої каталітичної активності наночастинок кобальту [6]

У 2006 р. Guella та ін. [23] повідомили про альтернативний механізм. За допомогою ^{11}B ЯМР вони довели, що гідроліз BH_4^- є ступінчастою реакцією (рисунок 6). Першим кроком є дисоціативна адсорбція BH_4^- на двох поверхневих Pd-центрах, під час якої один з B–H-зв'язків гомолітично руйнується з утворенням BH_3^- і H. На другому етапі адсорбована

BH_3^- і H реагують з однією вільною молекулою H_2O і утворюють проміжний аніон $\text{BH}_3(\text{OH})^-$, який десорбується, а також молекулу H_2 . На третьому (і останньому) етапі $\text{BH}_3(\text{OH})^-$ піддається гідролізу швидше, ніж сам BH_3^- . Перший і другий кроки цього механізму узгоджуються з моделями Міхаеліса–Ментен і Елей–Ридел.

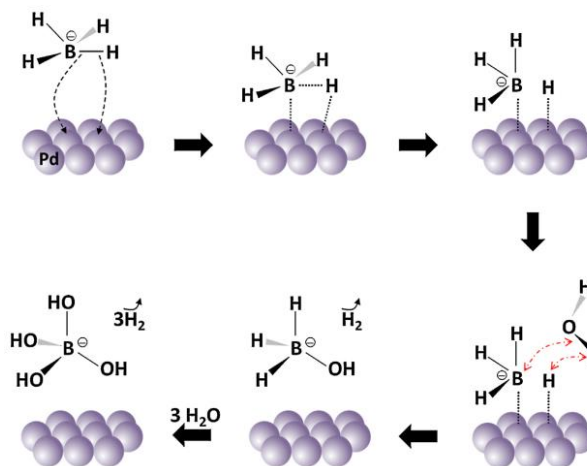


Рисунок 6. Схематичне зображення механізму Міхаеліса–Ментен, який враховує гідроліз BH_4^- на Pd-катализаторі [6, 23]

Дещо інший механізм запропонували R. Peña-Alonso та ін. [24] для Pt або Pd, закріплених на функціоналізованих вуглецевих нанотрубках (рисунок 7). Вони винайшли, що BH_4^- зазнає оборотної дисоціативної адсорбції на двох металевих центрах (M_I та M_{II}), внаслідок чого BH_3^- адсорбується на M_I , а H адсорбується на M_{II} . Негативний заряд BH_3^- переходить на водень завдяки високій провідності вуглецевої матриці. Адсорбований гідрид потім реагує з одним $\text{H}^{\delta+}$ однієї з вільних молекул

H_2O і вивільняє H_2 . Отриманий OH^- реагує з адсорбованим BH_3 , поки той переносить свої залишкові гідриди на вільний поверхневий центр M_{II} , формуючи адсорбовані $\text{BH}_2(\text{OH})^-$. Реакція продовжується аналогічним чином, доки не сформуються B(OH)_4^- і чотири молекули H_2 . Подібну послідовність реакції пропонували Holbrook and Twist з важкою водою D_2O на початку 1970-х для катализаторів – боридів кобальту і нікелю [25].

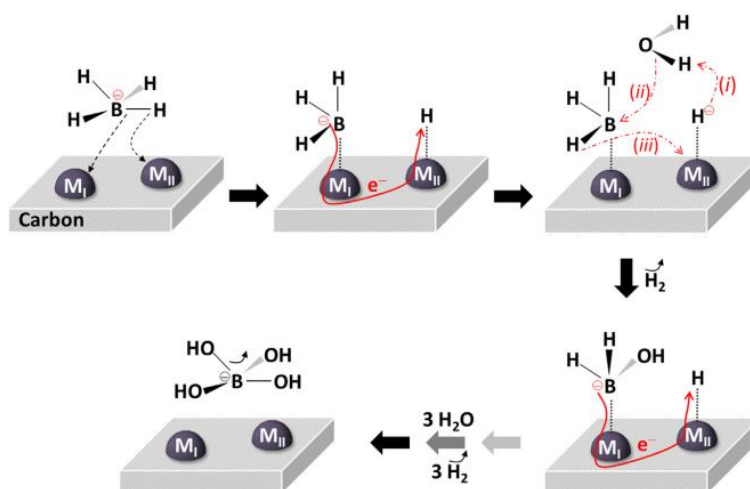


Рисунок 7. Схематичне зображення механізму Міхаеліса–Ментен, запропонованого R. Peña-Alonso та ін. [24] для пояснення каталітичної активності Pt та Pd [6]

Вальтер та ін. [26] дослідили вищезначену послідовність реакції і запропонували вираз для швидкості реакції, що враховував залежність концентрації аніонів OH^- . Вони довели перший порядок реакції, який підтвердився і за VH_4^- .

Обговорення результатів. Реакція гідролізу борогідридів дозволяє досягти високої щільності енергії не тільки за підвищених температур і тисків, а й за нормальних умов, що вказує на її великий потенціал для портативних пристроїв. За останні десятиліття багато дослідників досягли великих успіхів у дослідженні цього процесу, а також у розробці різноманітних як металічних, так і неметалічних каталізаторів цього процесу. В основному ці дослідження були зосереджені на вивченні кінетики реакції, а також на підготовці каталізаторів, включаючи скринінг активних компонентів, та на методах їх приготування.

Загальним недоліком переважної більшості опублікованих досліджень кінетики гідролізу та/або розкладання борогідридів, незалежно від використовуваного каталізатора і умов лабораторної реалізації цього процесу, є ігнорування явища самогідролізу та/або саморозкладання борогідридів. Це значно викривляє реальну картину кінетики, ускладнює об'єктивну оцінку інтенсивності процесу генерування водню та унеможливорює порівняння каталітичної активності синтезованих та/або досліджуваних каталізаторів.

Єдиним шляхом вирішення цієї проблеми є проведення і вивчення гідролізу борогідридів у сильно лужному середовищі (pH 13,0-14,0) при безперервному контролі pH досліджуваного робочого розчину.

Висновки. У статті оприлюднена спроба відійти від стандартного шаблонного підходу висвітлення важливого і вельми перспективного процесу генерування водню шляхом гідролізу борогідридів, що демонструє наукову новизну представленої роботи.

Практичну цінність роботи можна описати наступним чином. Охарактеризовано перспективність водних лужних розчинів борогідриду натрію для рідиннофазного хімічного зберігання водню, особливо в низькотемпературних паливних елементах. Представлено методи вимірювання об'єму водню під час гідролізу борогідриду натрію. Зосереджено

увагу на необхідності дослідження впливу pH на кінетику цільового каталітичного процесу, враховуючи явище самогідролізу і саморозкладання борогідридів. Висвітлено чотири основні механізми реакції гідролізу борогідриду натрію.

Список використаних джерел / References

- [1] H. N. Abdelhamid, "A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 1, Jan., pp. 726-765, 2021.
- [2] I. Ivanenko, and A. Ruda, "Cobalt, nitrogen-doped carbons as catalysts for sodium borohydride hydrolysis: role of surface chemistry", *Journal of Materials Science*, vol. 57, no. 27, June, pp. 1994-2011, 2022.
- [3] G. Diao, H. Li, I. Ivanenko, and T. Dontsova, "Nickel and cobalt effect on properties of MWCNT-based anode for Li-ion batteries", *Applied Nanoscience*, vol. 10, no. 4, March, pp. 4839-4845, 2020.
- [4] I. Ivanenko, A. Voronova, I. Astrelin, and Y. Romanenko, "Structural and catalytic properties of Ni-Co spinel and its composites", *Bulletin of Materials Science*, vol. 42, no. 4, May, pp. 172-179, 2019.
- [5] J. Yao, Z. Wu, H. Wang, F. Yang, J. Ren, and Z. Zhang, "Application-oriented hydrolysis reaction system of solid-state hydrogen storage materials for high energy density target: A review", *Journal of Energy Chemistry*, vol. 74, Nov., pp. 218-238, 2022.
- [6] U. B. Demirci, and Ph. Miele, "Reaction mechanisms of the hydrolysis of sodium borohydride: A discussion focusing on cobalt-based catalysts", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 17, no. 7-8, July-Aug., pp. 707-716, 2014.
- [7] D. Xu, Y. Zhang, and Q. Guo, "Research progress on catalysts for hydrogen generation through sodium borohydride alcoholysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 9, Jan., pp. 5929-5946, 2022.
- [8] U. B. Demirci, O. Akdim, J. Andrieux, J. Hannauer, R. Chamoun, and P. Miele, "Sodium borohydride hydrolysis as hydrogen generator: Issues, state of the art

- and applicability upstream from a fuel cell", *Fuel Cell*, vol. 10, no. 3, June, pp. 335-350, 2010.
- [9] Y. Shang, and R. Chen, "Hydrogen storage via the hydrolysis of NaBH_4 basic solution: Optimization of NaBH_4 concentration", *Energy Fuels*, vol. 20, no. 5, May, pp. 2142-2148, 2006.
- [10] Rohm and Haas, Eds., *Sodium borohydride digest*. Rohm and Haas Company. Synthesis & Process Applications, Oct. 2003.
- [11] K. N. Mochalov, V. S. Chain, and G. G. Gil'manshin, "Kinetic studies on intermediate steps of BH_4 hydrolysis", *Kinetics and Katalisys*, vol. 6, pp. 541-545, 1965.
- [12] J. A. Gardiner, and J. W. Collat, "Kinetics of the stepwise hydrolysis of tetrahydroborate ion", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 87, pp. 1692-1700, 1965.
- [13] J. A. Gardiner, and J. W. Collat, "Polarography of the tetrahydroborate ion. The effect of hydrolysis on the system", *Inorganic Chemistry*, vol. 4, pp. 1208-1212, 1965.
- [14] F. T. Wang, and W. L. Jolly, "Kinetic study of the intermediates in the hydrolysis of the hydroborate ion", *Inorganic Chemistry*, vol. 11, pp. 1933-1941, 1972.
- [15] L. A. Levine, and M. M. Kreevoy, "Solvent isotope effects on tetrahydridoborate hydrolysis", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 94, pp. 3346-3349, 1972.
- [16] L. M. Abts, J. T. Langland, and M. M. Kreevoy, "Role of water in the hydrolysis of tetrahydroborate(1-) ion", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 97, pp. 3181-3185, 1975.
- [17] K. Kojima et al., "Hydrogen generation using sodium borohydride solution and metal catalyst coated on metal oxide", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 10, Oct., pp. 1029-1034, 2002.
- [18] E. Y. Marrero-Alfonso, J. R. Gray, T. A. Davis, and M. A. Matthews, "Minimizing water utilization in hydrolysis of sodium borohydride: The role of sodium metaborate hydrates", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 18, Oct., pp. 4723-4730, 2007.
- [19] J. Andrieux et al., "Revision of the $\text{NaBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ phase diagram for optimized yield in the H_2 generation through NaBH_4 hydrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 7, Apr, pp. 5798-5810, 2012.
- [20] R. S. Liu et al., "Investigation on mechanism of catalysis by Pt-LiCoO_2 for hydrolysis of sodium borohydride using X-ray absorption", *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 112, pp. 4870-4888, 2008.
- [21] T. F. Hung et al., "An alternative cobalt oxide-supported platinum catalyst for efficient hydrolysis of sodium borohydride", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 32, pp. 11754-11759, 2011.
- [22] J. Andrieux, U. B. Demirci, and P. Miele, "Langmuir-Hinshelwood kinetic model to capture the cobalt nanoparticles-catalyzed hydrolysis of sodium borohydride over a wide temperature range", *Catalysis Today*, vol. 170, no. 1, July, pp. 13-19, 2011.
- [23] G. Guella, C. Zanchetta, B. Patton, and A. Miotello, "New insights on the mechanism of palladium-catalyzed hydrolysis of sodium borohydride from ^{11}B NMR measurements", *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 34, Aug., pp. 17024-1757, 2006.
- [24] R. Pen˜a-Alonso, A. Sicurelli, E. Callone, G. Carturan, and R. Raj, "A picoscale catalyst for hydrogen generation from NaBH_4 for fuel cells", *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 1, Feb., pp. 315-323, 2008.
- [25] K. A. Holbrook, and P. J. Twist, "Hydrolysis of the borohydride ion catalysed by metal-boron alloys", *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, vol. 0, pp. 890-894, 1971.
- [26] J. C. Walter, A. Zurawski, D. Montgomery, M. Thornburg, and S. Revankar, "Sodium borohydride hydrolysis kinetics comparison for nickel, cobalt, and ruthenium boride catalysts", *Journal of Power Sources*, vol. 179, no. 1, Apr., pp. 335-339, 2008.

I. M. Ivanenko, Ph. D., Associate Professor
e-mail: i.ivanenko@kpi.ua
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

HYDROGEN GENERATION BY HYDROLYSIS OF BOROHYDRIDS

The search for clean energy to replace fossil fuel energy is an urgent problem of our time. Hydrogen is considered a suitable candidate for the production of pure and stable fuel due to its availability, high energy density and lack of contamination. The hydrolysis of borohydrides is a relatively safe and inexpensive way to obtain a sufficient amount of hydrogen. So, for example, sodium borohydride has a high gravimetric energy density of 9300 Wh/kg; contains ~10.6 wt.% of hydrogen, and its solution can release 90% or more of the stoichiometric amount of hydrogen through a hydrolysis reaction that can be carried out under ambient conditions. When using the appropriate catalyst, it is possible not only to accelerate the NaBH_4 hydrolysis reaction, but also to regulate the amount of hydrogen released and the rate of its formation.

A lot of scientific research has been devoted to the development of new catalysts and optimization of traditional ones for the hydrolysis and/or decomposition of borohydrides, which have resulted in the publication of nearly seventy-five thousand articles on ScienceDirect alone. However, most of them are focused on the characterization of the obtained catalytically active materials, as well as on the study of the kinetics of the process of hydrogen release from borohydrides. Only individual works studied the significance and prospects of borohydride hydrogen energy; few people focused on the mechanism of this chemical process, and, most interestingly, the study of the influence of pH on the kinetics of the target catalytic process took place while completely ignoring the phenomenon of self-hydrolysis and self-decomposition of borohydrides.

In this regard, the purpose of the presented review article hasn't been to highlight the main traditional aspects of the known catalytic process of hydrolysis and/or decomposition of borohydrides, but to focus on those important nuances, which are almost not paid attention to in published scientific works. For this, the following research tasks have been solved: to characterize the prospects of aqueous alkaline solutions of sodium borohydride for liquid-phase chemical storage of hydrogen, especially in low-temperature fuel cells, as well as its place in the general chain of hydrogen energy; to present the methods of measuring the volume of hydrogen during the hydrolysis of sodium borohydride; to analyze the pH of sodium borohydride solutions and its effect on the rate of hydrolysis; to highlight the mechanisms of reaction of sodium borohydride hydrolysis.

Keywords: renewable energy, hydrogen energy, sodium borohydride, half-decomposition, reaction mechanism.