

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2023-23

Збірник наукових праць

Випуск 23
(грудень, 2023)

Луцьк 2023

УДК 004, 006, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку науково-технічною радою Луцького національного технічного університету, протокол № 4 від 20 грудня 2023р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №18466-7266Р від 15.12.2011р.

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк, грудень 2023р. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 90 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, інформаційно-вимірювальних технологій та телекомунікацій, електроніки; вимірювальної та радіотехніки, особливості експлуатації та перевірки засобів вимірювань, медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Адреса організаційного комітету:

Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, факультет комп'ютерних та інформаційних технологій, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Телефон: (050) 378-82-31

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ Марчук Віктор Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА Четвержук Тарас Іванович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР: Пташенчук Віталій Віталійович , кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна. Валецький Богдан Петрович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	
1	Заболотний Олег Васильович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
2	Захаров Ігор Петрович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
3	Антонюк Віктор Степанович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
4	Гераймчук Михайло Дем'янович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
5	Гайдук Мікулас (Hajduk Mikuláš) , доктор технічних наук, професор, професор кафедри робототехніки, Технічний університет Кошице, Slovakia.
6	Редько Ростислав Григорович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
7	Повстаной Олександр Юрійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
8	Ларшин Василь Петрович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в інжинірингу, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
9	Антоній Свіць (Antoni Shwic) , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатизації та роботизації продукції, Люблінська політехніка, Poland.
10	Богущ Вісніцкі (Bogusz Wisnicki) , PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
11	Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek) , PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецинська морська академія, Poland.
12	Станіслав Іван (Stanislaw Iwan) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
13	Збігнев Матушак (Zbigniew Matuszak) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
14	Андрушак Ігор Євгенович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Луцький національний технічний університет, Україна.
15	Ткачук Анатолій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
16	Гулай Любомир Дмитрович , доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
17	Денисюк Віктор Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
18	Коломісць Леонід Володимирович , доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна.
19	Куц Юрій Васильович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
20	Лапченко Юрій Сергійович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
21	Луців Ігор Володимирович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
22	Марек Опеляк (Marek Opielak) , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчового машинобудування, Люблінська політехніка, Poland.
23	Мірослав Пайор (Miroslaw Pajor) , доктор технічних наук, професор, декан факультету механічної інженерії та мехатроніки, Західнопоморський технічний університет, Poland.

24	Пристапа Станіслав Олексійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
25	Пермяков Олександр Анатолійович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізучі верстати, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут», Україна.
26	Середюк Орест Євгенович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.
27	Тимчик Григорій Семенович , доктор технічних наук, професор, декан приладобудівного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
28	Ткачук Роман Андрійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
29	Тонконогий Володимир Михайлович , доктор технічних наук, професор, директор Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
30	Федосов Сергій Анатолійович , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики Луцький національний технічний університет, Україна.
31	Шваб'юк Василь Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна.
32	Яворський Богдан Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
33	Ярошевич Микола Павлович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
34	Григор'єва Наталія Сергіївна , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
35	Тулашвілі Юрій Йосипович , доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук, Луцький національний технічний університет, Україна.
36	Шабайкович Віктор Антонович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
37	Пальчевський Богдан Олексійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
38	Решетило Олександр Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
39	Гуменюк Лариса Олександрівна , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
40	Кайдик Олег Леонтійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
41	Симонюк Володимир Павлович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
42	Дагмар Цаганова (Dagmar Caganova) , Prof. M.A., Ph.D., Institute of Industrial Engineering and Management, Faculty of Materials Science and Technology STU, Slovakia
43	Євсюк Микола Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
44	Хвишун Микола В'ячеславович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
45	Заблоцький Валентин Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
46	Селепина Йосип Романович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
47	Мороз Сергій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
48	Лишук Віктор Васильович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
49	Луньов Сергій Валентинович , доктор фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та вищої математики, Луцький національний технічний університет, Україна.
50	Павло Комада (Paweł Komada) , dr hab. inż., katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Lubelska, Poland

ЗМІСТ	
Shvets S., Astakhov V., Kolesnyk V. PROFILING OF CUTTING TEETH OF A GEAR SHAPING HEAD	6
Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Вэтох О.М. КОНТРОЛЬ ПІДКЛЮЧЕННЯ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ – ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖІ	12
Гальчук Т.Н. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ТОЧНОСТІ БАЗУВАННЯ БАГАТОСТУПІНЧАТИХ ВАЛІВ	17
Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В. МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ	23
Кепешук Т.В., Пастущин Л.Б., Пташенчук В.В. ТИПОВА МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ШТАНГЕНІНСТРУМЕНТУ	30
Кріль Б.А., Матіко Ф.Д., Шалева В.В, Бугайчук М.І. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЮЮЧИХ ОРГАНІВ ТА ВАГОВИХ КОМІРОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ ІНФУЗІЙНИХ РОЗЧИНІВ	38
Лапшуда В.А., Коваль В.М. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРІВ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ	48
Матіко Ф.Д., Чабан В.Я., Масняк О.Я. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОНОСІЇВ	57
Никируй Л.І., Ільницький Р.В., Павлюк М.Ф., Федосов С.А., Пташенчук В.В. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИГЕРІВ НА ЛОГІЧНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СИСТЕМАХ ПТШ З ЄМКІСНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МІКРОСИСТЕМ	67
Полярус О.В., Поляков Є.О., Ібрагімов Ш. Г. , Хоменко Ю.С. МОДЕЛЬ КОЛЬОРОВОСТІ ОБ'ЄКТІВ НА ФОНІ ДОВІЛЬНОЇ МІСЦЕВОСТІ	72
Симонюк В.П., Божко К. М., Пташенчук В.В. СПОСІБ ЗАМІРУ ОСВІТЛЕНOSTІ ІЗ АВТОНОМНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ ВІД СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	82

UDK 621.9.02 (07)

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-01

Shvets S.¹, Astakhov V.², Kolesnyk V.¹¹ Sumy State University, 2, Rymskogo-Korsakova, 40007, Sumy, Ukraine;² EWIE Group of Companies, 1250 Beach Cr., 48176, Saline, MI, USA

PROFILING OF CUTTING TEETH OF A GEAR SHAPING HEAD

This paper investigates a possibility of the use of the mathematical model of the cutting edge profile developed for turning form cutter in the profiling the cutting edge of the tooth of a gear gushing head. The corresponding cutting tooth of the gashing head was carried out with Mathcad commercial software package accounting for the rake and clearance angles. The use of the same mathematical model increases the degree of automation of the design of various types of form cutting tools, which is the goal of many research work in the field of tool design and its manufacturing. In order to apply the mathematical model of the tuning form tool during the profiling of cutting teeth of a gear gashing head, arrays of coordinates of the points of the involute profile of the tooth are formed accordingly. This was carried out accounting on the difference in the motions of cutting edge of the tuning form tool and that of a gear gushing head. Moreover, the obtained results allow to conclude that the developed generalized mode can be used not only for great gushing tools but also for gear generating tools as gear shaper cutters.

Keywords: turning form cutting, gear gushing head, mathematical model, involute profile, coordinates of the gear and tool tooth profile.

Introduction. There are various effective methods of cutting gears [1]. The gear shaping head implements the gear gushing method. The use of this method implies that the profile of the cutting tooth of the tool in the normal cross-section is the same as that of the machined gear. However, the application of the rake and clearance angles on the tool tooth leads to the condition where the profile of the cutting tool should be made tool geometry specific. As a result, this profile can be not the same as that of the gear. Therefore, special calculation is used to achieve the required profile of the cutting tooth.

The major objective of modern manufacturing is achieving fast productivity. This objective is achieved through the use of high productive modern machines as well as implementation of Computer Aided Manufacturing (CAM) [2]. The latter requires accurate geometrical models of the cutting tools especially of complicated profiles. As such, the profiling procedure can be considered as innovative technology [3].

When one designs a gear gushing head, he or she can use the mathematical model of the geometry of form turning cutter with a zero inclinational angle. The unification of models allows to design various cutting tools efficiently [4 – 8].

Literature Review. It is known that the involute profile of a tooth is generated using the fundamentals of gear meshing [9, 10] so that an array of the coordinates of such a profile can be generated.

The coordinates of any point M of the involute tooth profile in the polar coordinate system (Fig. 1), the origin of which is placed in the center of the gear, are determined by the angle θ_M and the radius r_M [11 – 14] related as

$$\theta_M = \tan \left(\cos^{-1} \left(\frac{r_o}{r_M} \right) \right) - \cos^{-1} \left(\frac{r_o}{r_M} \right), \quad (1)$$

where $r_o = d_o/2$ is the radius of the base circle;

r_M is polar radius of point M.

The diameter of the base circle is correlated with the pitch diameter, d as $d_o = d \cdot \cos \alpha$. The pitch diameter is calculated as $d = mz$ (m is the module, z is the number of teeth), and α is the pressure angle. Normally, $\alpha = 20^\circ$.

Due to the fact that the involute cannot be inside the base circle, the tooth profile is involute only outside this circle, and the part of the profile inside the base circle receives the necessary shape during the manufacturing process. The outer diameter of the gear $d_e = d + 2m$. Hence,

$$\frac{d_o}{2} \leq r_M \leq \frac{d_e}{2}. \quad (2)$$

By changing the value of r_M within the specified limits, the angle θ_M is determined using Eq. (1). This allows one to switch from the considered polar to a new Cartesian coordinate system, the origin of which is in the center of the gear (Fig. 1):

$$\begin{aligned} y &= r_M \cdot \cos \theta_M, \\ x &= r_M \cdot \sin \theta_M. \end{aligned} \quad (3)$$

The objective of the work is to establish conditions for the use the geometrical model of a tuning form cutter in the profiling of a gear shaping head.

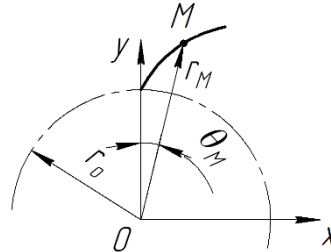


Figure 1– Coordinates of involute points in the polar coordinate system

Research Methodology. The current paper discusses the use of the mathematical model for turning form cutters of various types, proposed by S. V. Shvets [15], to calculate the profile of cutting teeth of a gear gashing head. Based on the theory of gear meshing, an array of coordinates of points of the involute profile of the gear tooth was generated. Using these generated data, the profiling of the corresponding cutting tooth of the gashing head was carried out with Mathcad commercial software package.

Results and Discussion. In order to use the mathematical model of a profiling cutter tooth, it is necessary to generate the output data accordingly.

For this purpose, the involute is moved over a circle so that it intersects with the arc of the base circle at a point located at the distance of a quarter of the pitch from the ordinate axis. The angle corresponding to one quarter of the gear pitch is calculated as

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi}{4 \cdot z} = \frac{\pi}{2 \cdot z}. \quad (4)$$

The involute angle on the pitch circle is calculated as

$$\theta_d = \tan \left(\cos^{-1} \left(\frac{r_o}{d/2} \right) \right) - \cos^{-1} \left(\frac{r_o}{d/2} \right), \quad (5)$$

The difference between them is

$$\mu = \theta_d - \delta. \quad (6)$$

The coordinates of the points of the involute profile R (Fig. 2) of the tooth placed at a distance of a quarter of an angular pitch from the y axis in the Cartesian coordinate system are determined as

$$\begin{aligned} x &= r_M \cdot \sin(\theta_M + \mu), \\ y &= r_M \cdot \cos(\theta_M + \mu). \end{aligned} \quad (7)$$

Accordingly, the coordinates of the profile L of the opposite tooth (see Fig. 2) are determined as

$$\begin{aligned} -x &= -r_M \cdot \sin(\theta_M + \mu), \\ y &= r_M \cdot \cos(\theta_M + \mu). \end{aligned} \quad (8)$$

The starting data for the calculation of the profile of the gear to be machined are arrays of coordinates of the points. Setting the value n , the number of points on the involute profile, one can determine the pitch between them as

$$\Delta = \frac{d_e - d_o}{2 \cdot n}. \quad (9)$$

Array r_M is generated as

$$r_M = \left(\frac{d_e}{2} + \Delta, \frac{d_e}{2} + 2\Delta, \dots, \frac{d_e}{2} + n\Delta \right). \quad (10)$$

The coordinate arrays of the points of the involute R in the xOy coordinate system are determined according to Eqs. (7), (1) and (10). Then, the transition into the x_a, O_a, y_a coordinate system (Fig 2) is made as follows

$$\begin{aligned} XR &= (x_1 + x_n, x_2 + x_n, \dots, x_n + x_n), \\ YR &= (y_1 - y_n, y_2 - y_n, \dots, y_n - y_n). \end{aligned} \quad (11)$$

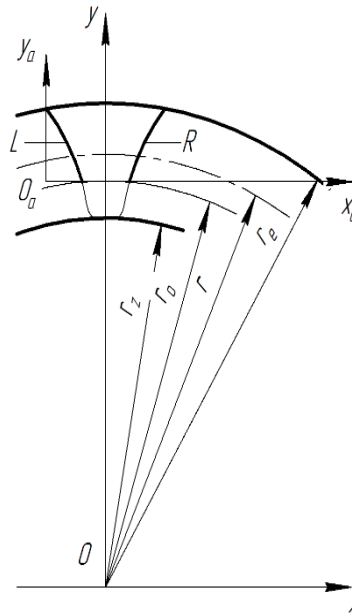


Figure 2– Coordinates of the involute profile of adjacent wheel teeth in the Cartesian coordinate system Fig. 1. Coordinates of involute points in the polar coordinate

Equations (8), (1) and (10) determine the arrays of coordinates of the points of the involute L in this system (Fig. 2)

$$\begin{aligned} XL &= (-x_1 + x_n, -x_2 + x_n, \dots, -x_n + x_n), \\ YL &= (y_1 - y_n, y_2 - y_n, \dots, y_n - y_n). \end{aligned} \quad (12)$$

Coordinates of $2n$ points of the involute profile of gear teeth in the x_a, O_a, y_a coordinate system (Fig. 2) are:

$$\begin{aligned} XH &= (XL_n, XL_{n-1}, \dots, XL_1, XR_1, \dots, XR_n), \\ YH &= (YL_n, YL_{n-1}, \dots, YL_1, YR_1, \dots, YR_n). \end{aligned} \quad (13)$$

In addition to the specified arrays of coordinates, the initial data for calculations are the rake angle $\gamma = 5^\circ$ and the clearance angle $\alpha = 8^\circ$. However, depending on the work material, the rake angle can be as high as 25° , and the clearance angle can be up to 12° . The number of points on the profile is $i = 1 \dots 2n$. The number of the point with the smallest YH value is n , and the number of the second point is $n+1$.

The difference between the motions of the tuning form tool and the cutting tooth of a gear gashing head is that the cutting edge of turning form cutter moves in a circle relative to the surface of the workpiece, whereas that of gear gushing head moves along a straight line relative to the workpiece. It is possible to convert a circle into a straight line by setting its radius to infinity. For engineering calculations, however, it is enough to increase each value of the YH array by 10^8 . To achieve this, the outer radius of the round turning form cutter is set to be equal to 10^8 , which allows us to consider this cutter as prismatic.

As a result of such a transformation, the mathematical model of the tooth profile of the gear gashing head, according to the profile of the prismatic turning form cutter with zero inclination angle [6], takes the form

$$\begin{aligned} F_i &= -10^8 \tan \gamma, \\ y_i &= \cos \gamma \left(\sqrt{YH_i^2 - (F_i \cos \gamma)^2} - \sin \gamma F_i \right), \\ z_i &= -y_i \tan \gamma - F_i, \\ YP_i &= 10^8 - \sqrt{(z_i - 10^8 \sin \alpha)^2 + (y_i - YH_n - 10^8 \cos \alpha)^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Using the coordinates of the points of the involute profiles of the gear teeth (13), arrays XH and YH , one can determine the coordinates of the profile of a cutting tooth of a gear gashing head (XH , YP) using Eq. (14).

The mathematical model established by Eq. (14) can be used when profiling a gear cutter tooth. To form an array of coordinates of the points of the projection of the cutting edge of the tooth onto the reference plane of the gear cutter, the coordinate system $x_b O y_b$ is used, the ordinate axis of which coincides with the axis of symmetry of the tooth and is rotated relative to the $x O y$ coordinate system by the angle $\beta = \theta d + \pi/2_z$ (Fig. 3). In this coordinate system, the coordinates of the points of the involute I are calculated as

$$\begin{cases} x_b = x \cos \beta - y \sin \beta \\ y_b = x \sin \beta + y \cos \beta \end{cases} \quad (15)$$

The coordinates along the abscissa axis of the opposite profile of the projection of the cutting edge J are defined as $-x_b$.

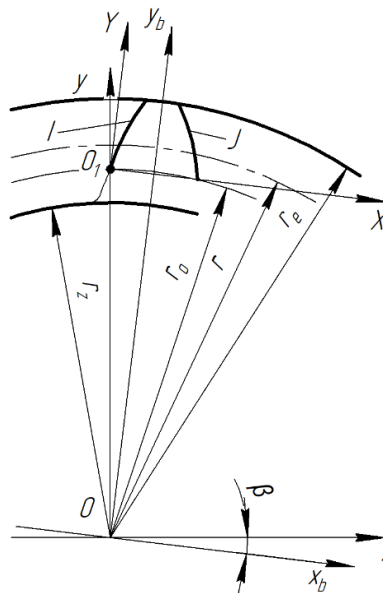


Figure 3— Determination of the coordinates of the projection points of the cutting edge on gear cutter face

Arrays of coordinates of projection points I in the XO_1Y coordinate system are:

$$\begin{aligned} XI &= (x_1 - x_1, x_2 - x_1, \dots, x_n - x_1), \\ YI &= (y_1 - y_1, y_2 - y_1, \dots, y_n - y_1). \end{aligned} \quad (16)$$

Arrays of coordinates of projection points J in the XO_1Y coordinate system are:

$$XJ = (-x_1 - x_1, -x_2 - x_1, \dots -x_n - x_1), \quad (17)$$

$$YJ = (y_1 - y_1, y_2 - y_1, \dots y_n - y_1).$$

Coordinate arrays of points of the entire projection of the cutting edge in the XO_1Y system:

$$XK = (XI_1, XI_2, \dots XI_n, XJ_n, XJ_{n-1}, \dots XJ_1), \quad (18)$$

$$YK = (YI_1, YI_2, \dots YI_n, YJ_n, YJ_{n-1}, \dots YJ_1).$$

In addition to the specified arrays of coordinates, the rake angle $\gamma = 5^\circ$ and the clearance angle $\alpha = 6^\circ$ are assigned. The number of points on the projection of the cutting edge $i = 1 \dots 2n$. The number

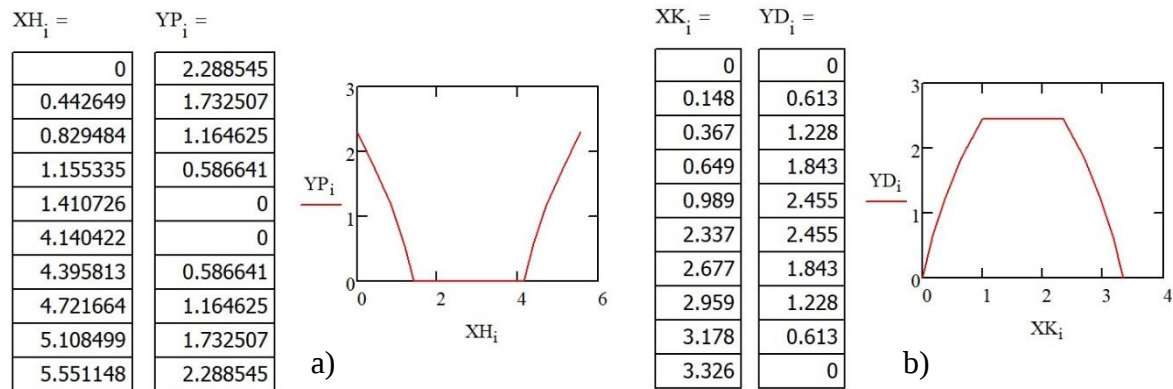


Figure 4— Calculation of the coordinates of the points of the profile:

a) tooth of a gear gashing head, $z = 19$, $m = 2$, $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 10^\circ$,

b) gear cutter tooth, $z = 17$, $m = 2$, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 6^\circ$

of the point with the smallest YK value is $i = 1$, and the number of the second point is $2n$. Using the arrays (18) as initial data, according to the Eqs (14), the coordinates of the profile of the gear shaper tooth, the YD array. The XK array remains unchanged.

The coordinates of the points of the profile of a tooth of a gear gashing head and the tooth of the gear shaper are shown in Fig. 4.

Conclusions. On the basis of the theory of gears, arrays of coordinates of points of involute profiles of gear teeth were generated: XH – along the abscissa axis, YH – along the ordinate axis. The accuracy of the profile reproduction depends on the number of selected points n . The mathematical model of turning form tools was found to be suitable for profiling cutting tooth of a gear gashing head. This model can also be used when profiling the tooth of a gear shaper, during which the gear generating method is used. Thus, cutting edge profiles of various types of cutting tools are covered by one mathematical model, which increases the degree of automation of the tool design.

Information sources

1. Egorov, S., Kapitonov, A., Loktev, D. (2016). Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods, *CIRP Annals*, Volume 870, pp. 331-342, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397>.
2. Bouzakis, K.-D., Lili, E., Michailidis, N., Friderikos, O. (2008). Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods, *CIRP Annals*, Volume 57, Issue 2, pp. 676-696, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.001>.
3. Ziyong Ma, Yuanxin Luo, Yongqin Wang, Lian Mao (2018). Geometric design of the rolling tool for gear roll-forming process with axial-infeed, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 258, pp. 67-79, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.006>.
4. Rodin, P. R. (1977). *Fundamentals of shaping surfaces by cutting*, Vyscha schkola, Kyiv, Ukraine.
5. Radzevich, S. P. (2001). *Shaping of surfaces of details. Fundamentals of the theory*, Rastan, Kyiv, Ukraine.

6. Matuszak, J., Barszcz, M. (2015). Computer aided design of cutting tools, *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 9(28), pp.107-111, <https://doi.org/10.12913/22998624/60796>.
7. Bailey, J., Roy, R., Harris, R., Tanner, A. (2001). Cutting tool design knowledge capture, *Industrial knowledge management*, pp. 393-411, https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0351-6_25.
8. Chung-Biau Tsay, Wen-Yao Liu, Yi-Cheng Chen (2000). Spur gear generation by shaper cutters, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 104, Issue 3, pp. 271-279, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00570-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00570-7).
9. Michalski, J., Skoczylas, L. (2008). A comparative analysis of the geometrical surface texture of a real and virtual model of a tooth flank of a cylindrical gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 204, Issue 1-3, pp. 331-342, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.038>.
10. Zablonkii, K. I., Belokonev I. M., Shchekin B. M. (1989). *Theory of mechanisms and machines*, Vyscha shkola, Kyiv, Ukraine.
11. Härtig, F., Stein, M. (2019). 3D involute gear evaluation – Part 1: Workpiece coordinates, *Measurement*, 134, pp.569-573, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.088>.
12. Moath Zaareer (2021). A Novel approach for designing Gear tooth Profile by Mathematical equations for three different gear types Spur, Internal, and Helical Gear and creating models using SolidWorks and CATIA, *International Journal of Modern Science and Technology*, 6(2-3), pp. 31-42.
13. Suresh Babu, V., Majumder, M. C., Ramprasad, A. (2018). Involute Tooth Spacing, Gear Profile and 3D Gear development with MATLAB® Graphical User Interface and Solidworks, *International Journal of Industrial Engineering*, 2(3), pp. 67-75.
14. Shvets, S. V. (2019). *Metal cutting tools*, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

Швець С.В.¹, Астахов В.П.², Колесник В.О.¹

¹ Сумський державний університет, 2, Римського-Корсакова, 40007, Суми, Україна;

² EWIE Group of Companies, 1250 Beach Cr., 48176, Saline, MI, USA

ПРОФІЛЮВАННЯ РІЗЦІВ ЗУБОДОВБАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ

У даній роботі досліджено можливість використання математичної моделі профілювання, розробленої для фасонних різців, при профілюванні різців зубодовбальної головки. Відповідне профілювання різця зубодовбальної головки було виконане за допомогою комерційного програмного пакету Mathcad з урахуванням переднього і заднього кутів. Використання однієї і тієї ж математичної моделі підвищує ступінь автоматизації проектування різних типів різальних інструментів, що є метою багатьох наукових робіт у галузі проектування та виготовлення інструменту. Для застосування математичної моделі профілювання фасонних різців під час профілювання різців зубодовбальної головки відповідно формують масиви координат точок евольвентного профілю зуба колеса. Це виконується з урахуванням відмінності рухів різальних кромок фасонного різця і різця зубодовбальної головки. Крім того, отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що розроблений узагальнений метод може бути використаний не тільки для профілювання різців зубодовбальної головки, а й для зубоутворювальних інструментів, які використовують метод обкочування.

Ключові слова: токарна обробка, зубодовбальна головка, математична модель, евольвентний профіль, координати профілю шестерні і зуба інструмента.

УДК 658.328.3(075)

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-02

Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Вэтох О.М.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

КОНТРОЛЬ ПІДКЛЮЧЕННЯ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ – ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖІ

Проведений аналіз аварійної роботи електромереж в старих будівлях, в яких дуже збільшилась насиченість приміщень технічними системами життєзабезпечення, в результаті чого збільшилось навантаження електричних мереж, яке перевищує розрахункові значення та викликає часте аварійне відключення електромережі установленими раніше автоматичними вимикачами. Крім того, експлуатація автоматичних вимикачів в агресивних умовах може порушити допустимий рівень величин сили струму встановлених для відключення споживачів. В даному випадку необхідно замінювати застарілу електричну мережу на нову, замінювати несправні автоматичні вимикачі на нові. Така робота потребує матеріальних затрат, тому деякі електрики використовують небезпечний метод паралельного підключення до основної групи контактів автоматичного вимикача додаткову групу контактів. Щоб цього уникнути необхідно встановити нормативні терміни технічного обслуговування автоматичних вимикачів, заборонити з'єднування контактних клем автоматичних вимикачів зовнішніми та внутрішніми провідниками для зміни величини максимального струму розмикання електромережі.

Ключові слова: *пожежа, пожежна безпека, автоматичні вимикачі, вхідні та вихідні контактні групи, струмові перевантаження.*

Постановка проблеми. В наш час електрична енергія стала настільки звичною, що ми забуваємо про правила безпеки, аби уникнути небезпеки ураження електричним струмом та виникнення пожежі. Згідно офіційних даних серед пожеж в житловому секторі 43,4% стається через порушення правил улаштування і експлуатації електромережі. Внаслідок пожеж гине 3-4 тис. осіб, з яких 90 % у житловому секторі. Статистика підтверджує, що кількість пожеж особливо в житловому секторі продовжує збільшуватись. Відповідно «Оперативної інформації про надзвичайні ситуації техногенного, природного та іншого характеру» на території України станом на 04 квітня 2023 року відбулося (за добу/з початку року): 95/14086 пожеж, з них: - в житловому секторі 62/6751, - виробничій 2/455, - транспорті 6/584, - інших 25/6296, загинуло 4/555 людини, постраждалих 8/437 людей. [1]. Переважна більшість таких пожеж виникає в процесі експлуатації кабелів, проводів та інших електротехнічних виробів.

По статистиці у 20 – 25 % випадках причинами пожеж є порушення правил монтажу та експлуатації електроустаткування та побутових електроприладів. Тобто кожна п'ята пожежа виникає внаслідок аварійних режимів в електромережах будівель, електричних провідників, загоряння електричних виробів та електроустановок [2].

Горючими речовинами в електроустановках є ізоляція проводів, горючі деталі корпусів апаратів, горюче та вибухонебезпечне середовище навколо електроустановок. Окислювачем є кисень повітря. Джерелами запалювання є аварійні режими роботи електроустановок, а саме коротке замикання, струмові перевантаження, утворення великих перехідних опорів та вихрових струмів, винесення потенціалу, іскріння та електричні дуги. [3].

Аналіз літературних даних. Основною причиною виникнення пожеж є висока ступінь зношеності будівель їх конструктивних елементів та інженерних мереж особливо в будівлях історичної забудови та порушення правил пожежної безпеки при експлуатації електроустановок за рахунок перевантаження мережі, коротких замикань та великих перехідних опорів, що пов'язано з наявністю великої кількості старих електромереж, не розрахованих на значну кількість електрообладнання з великою споживаною потужністю. До середини 90-х років в будівлях громадського і житлового призначення використовувалися алюмінієві провідники, а потужності електрообладнання були незначними. Основною причиною виникнення пожеж саме у житловому секторі є порушення пожежної безпеки при експлуатації електроустановок. У сучасних приміщеннях використовується значно більше споживачів з підвищеною потужністю (рис.1) [4].



Рисунок 1– Наслідки аварійного режиму роботи електричного подовжувача:

- а) джерело запалювання - аварійний подовжувач зі слідами перенавантаження електромережі;
 б) під стелею спостерігаються провідники аварійної електричної мережі; в) на сходовій клітині спостерігається інтенсивне горіння від термічної дії електричної енергії перенавантаженої електромережі провідників

Джерелом запалювання при порушенні правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок є перевантаження, коротке замикання, великі перехідні опори тощо. Серед причин виникнення пожеж, які пов'язані з електромережами, найбільш розповсюдженим є коротке замикання. Воно виникає при надмірних чи тривалих перевантаженнях або через механічне пошкодження ізоляції між дротами. При цьому різко збільшується сила струму і кількість теплоти, що призводить до плавлення та загоряння ізоляції і горючих предметів, що знаходяться поруч від розплавлених частинок металу дроту, які розлітаються довкола. Режим однофазного короткого замикання створюється, якщо порушується ізоляція між будь-якою фазою і землею або нульовим проводом. У мережі з глухим заземленням нейтралі можливі ще інші види короткого замикання, а саме двофазне коротке замикання на землю та трифазні замикання. Трифазні КЗ є симетричні, а всі інші види короткого замикання – несиметричні [5].

Місця з'єднання жил проводів і кабелів, а також з'єднувальні та відгалужувальні затискачі повинні мати мінімальний перехідний опір та виконуватись за допомогою опресування, зварювання, паяння або затискачів, щоб уникнути їх перегрівання і пошкодження ізоляції стиків. Втрати опору ізоляції на стиках повинні бути не більше втрат опору ізоляції на цілих жилах цих проводів і кабелів. Попри заборони нормативних документів на теперішній час найпоширенішим способом з'єднання провідників є скручування, яке не являється безпечним, і потребує заміни альтернативними безпечними варіантами з'єднань, наприклад, зварювання, паяння, опресування, клемні колодки. Проте є випадки, коли ми не можемо використати зварювання контактів у пожежо- та вибухонебезпечних зонах, при працюючих агрегатах. Тому підхід до вирішення проблеми повинен бути комплексним і враховувати усі особливості процесу [6]:

- Перевантаження мережі, коли в неї підключають електроприлади з більшою загальною потужністю, ніж та, на яку розраховано мережу. Тривалі перевантаження призводять до руйнування ізоляції, виникненню короткого замикання та пожежі.

- Поганий контакт, який виникає через послаблення або окиснення контакту і призводить до ослаблення сили струму. Запобіжники в такому випадку не спрацьовують. Через це виникає місцевий перегрів, який може призвести до пожежі.

В роботі [7] проаналізований стандартизований метод оцінки пожежної небезпеки електроустановок та досліджено його застосування для розрахунку імовірності виникнення пожежі внаслідок зростання перехідного опору контактних з'єднань. На підставі цього розроблені методологічні засади та технічні засоби контролю стану електричних мереж житлових та громадських будівель. У європейських гармонізованих нормативних документах [8-10] встановлено вимоги щодо використання в системах електропроводки (кабельних лініях) будинків і споруд: а) вогнестійких кабелів з мінеральною ізоляцією згідно з EN 60702-1 [11] (ідентичний до ІЕС 60702-1) та інших типів і класів кабелів, випробуваних за EN 50200 [12]. Причому відзначається, що національними нормами Німеччини та Австрії вимагається використання електричних кабелів, випробуваних в умовах стандартного температурного режиму згідно з DIN 4102-12 [13]; б) систем кабельних трубопроводів згідно з ІЕС 61386-1, який прийнято як європейський стандарт EN 61386-1 та впроваджено в національний стандарт

України ДСТУ 4549-1 [14]; в) систем кабельних коробів згідно з ІЕС 61084-1, який впроваджено в національний стандарт України ДСТУ 4499-1 [15], хоча є чинним EN 50085-1 [16], який містить більш актуальні вимоги пожежної безпеки, порівняно із зазначеним міжнародним стандартом.

Визначення протипожежної надійності електромережі виконується різними методами та засобами, а саме: вимірювання опору ізоляції провідників відносно нейтралі; вимірювання сумарного опору всієї електромережі та порівняння з еталонним опором, розрахованим математично та інші [7]. Кожна методика має певні переваги та недоліки. Проте жодна з методик, що наведена вище, не дозволяє розрахувати ймовірність виникнення пожежі.

Метою роботи є дослідження запалювання та виникнення пожеж при наявності шунтування входних та вихідних контактних клем автоматичних апаратів для захисту електромереж живлення споживачів, що зменшить ризик виникнення пожеж.

Постановка задачі та її розв'язання. На сьогодні багато питань щодо внутрішніх електричних мереж житлових та громадських будівель, пов'язаних з їх пожежною небезпекою, поки що не врегульовані та потребують вирішення. Адміністративні та житлові будівлі та пам'ятники архітектури, як правило, залишаються часто поза увагою ДПН по контролю за дотриманням правил пожежної безпеки обслуговуваними працівниками, оскільки головна увага робиться на наявність автоматичних систем пожежної сигналізації, планів оповіщення та евакуації, вимірювання опору ізоляції та великих перехідних опорів окремих ділянок електромережі, наявності з'єднань електричних провідників методом «скруток» та ведення експлуатаційних документів тощо. Для захисту електричної мережі від перенавантаження та коротких замикань використовуються автоматичні вимикачі та запобіжники. В процесі довготривалої експлуатації електромережі, особливо в старих будівлях, у зв'язку зі збільшенням потужності та кількості ввімкнутих електричних споживачів використання електричної енергії для обігріву приміщень та навантаження на окрему електромережу може перевищувати розрахункові значення та викликати часте аварійне відключення електромережі установленими раніше автоматичними вимикачами. Крім того, експлуатація автоматичних вимикачів в агресивних умовах може порушити допустимий рівень величин сили струму встановлених для відключення споживачів. Для забезпечення безаварійного функціонування електромережі в даному випадку необхідно замінювати застарілу електричну мережу на нову, розраховану на підвищене навантаження, замінювати несправні автоматичні вимикачі на нові. Така робота потребує матеріальних затрат, тому деякі електрики використовують небезпечний метод паралельного підключення до основної групи контактів автоматичного вимикача додаткову групу контактів. При цьому в трьохфазних автоматичних вимикачах паралельно попарно з'єднують входні та вихідні контактні групи (шунтуванням) існуючого автоматичного вимикача, наприклад, з'єднують між собою входні контакти фаз «А» і «С» та вихідні контакти фаз «А» і «С». При цьому вони не враховують, що таке шунтування входних та вихідних контактних клем (наприклад, фаз «А» та «С») не захищає жилу кабелю електромережі від перенавантаження тому, що вимикання автоматичного вимикача в даному випадку відбувається тільки при силі струму, який в два рази перевищує допустимий для провідника даної мережі.



Рисунок 2 – Фото автоматичного вимикача з шунтовими перемичками входних та вихідних контактних груп по фазам "А" та "С".



Рисунок 3 – Фото автоматичного вимикача з шунтовими перемичками входних та вихідних контактних груп по фазам "А" та "В".

В даному випадку перенавантаження мережі вимикач не спрацьовує, виділяється надлишкова теплова енергія, яка з високою ймовірністю може викликати запалювання та пожежу. Приклади використання такого «методу» загублення автоматичних вимикачів неодинокі. Так, в процесі огляду місця пожежі в пам'ятнику архітектури міста Одеси прибутковому будинку Асвадурова в приміщенні електрощитової та овочевого цеху кухні виявлено два автоматичних вимикача з такими змінами підключення навантаження.

На фото рис.2, 3, виконаних експертами при огляді міста пожежі, яка відбулася 4 грудня 2019 році в будівлі історичної забудови міста Одеса, для «виключення» частого спрацьовування вимикачів при збільшенні навантаження електричної мережі спостерігається типове попарне шунтування вхідних та вихідних контактів трьохфазних автоматичних вимикачів з ціллію використання їх в якості автоматичних вимикачів в однофазній електромережі.

Слід зауважити, що відповідно до закону Ома для відрізка електричного ланцюга в даному випадку величина струму на вхідних контактах вимикача розділяється на двох, і через обидва елементи захисту відповідного вимикача проходить струм в два рази менший, а тому вимикач буде вимикати контакти тільки при струмі, в два рази перевищуючого нормативну допустиму величину, встановлену при улаштуванні даної електромережі:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{вх1}} + I_{\text{вх2}} = I_{\text{вих}},$$

де $I_{\text{вх}}$ – величина струму, протікаючого по вхідній жилі кабелю; $I_{\text{вх1}}$ – величина струму, що протікає по вхідній контактній парі автоматичного вимикача; $I_{\text{вх2}}$ – величина струму, що протікає по другій контактній групі автоматичного вимикача; $I_{\text{вих}}$ – величина струму, що протікає по вихідній контактній парі автоматичного вимикача та мережі споживача.

На жаль, така ситуація спостерігається у багатьох приміщеннях історичної забудови, тому що органи Державного пожежного нагляду (ДПН), як правило, не звертають особливу увагу на таку «раціоналізацію» обслуговуючого персоналу підприємства, та не проводять, як контроль надійності спрацьовування автоматичних вимикачів, так і правильність з'єднання провідників електромережі з їх контактами.

Висновки. З метою попередження виникнення пожежі в наслідок теплової дії електричної енергії, а саме перенавантаження та коротких замикань електричної мережі, вважаємо доцільним у процесі експлуатації впроваджувати підсилення періодичного контролю якості електромереж низької напруги, в першу чергу недопущення наявності шунтування вхідних та вихідних контактних клем автоматичних апаратів захисту електромереж живлення споживачів, що зменшить ризик виникнення пожеж в історичних будівлях та пам'ятниках архітектури України.

Таким чином, для запобігання нагрівання від великих перехідних опорів та запобігання пожежі особливу увагу потрібно приділяти з'єднанню струмоведучих частин між собою, а також підключенню їх до провідників електричної мережі. Вважаємо визначити та встановити нормативні терміни технічного обслуговування автоматичних вимикачів. Заборонити з'єднування контактних клем автоматичних вимикачів зовнішніми та внутрішніми провідниками для зміни величини максимального струму розмикання електромережі, та дотримуватися заходів безпеки при їх експлуатації.

Інформаційні джерела

1. ЗВІТ про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2021 році.
2. НАПБ А.01.001-2014. «Правила пожежної безпеки в Україні».
3. Зобенко О. Модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань. Науковий збірник: Цивільний захист та пожежна безпека. Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, № 1 (15) 2023. С. 141-147.
4. Гудим В. І. та інші. Електротехнічні засоби забезпечення пожежної безпеки об'єкта Техногенна безпека. [Навчальний посібник]. Л.: ЛДУ БЖД, 2020. 414 с.
5. Розроблення розеточного модуля електричної мережі. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: збірник наукових праць Черкаси ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України / О. М. Землянський, О. М. Мирошник, Д. В. Лесечко, О. О. Зобенко. Т. 4. № 20. 2020. С. 20–28.
6. Правила улаштування електроустановок. Х.: «Індустрія», 2015. 424 с.

7. Ю.І. Рудик, П.Г. Столярчук. Оцінка пожежної безпеки зростання перехідного опору контактних з'єднань електроустановок., 2010.
8. HD 60364-4-42:2011 Low voltage electrical installations – Part 4-42: Protection for safety – Protection against thermal effects (IEC 60364-4-42:2010, modified) (Установки електричні низьковольтні. Ч. 4-42. Заходи безпеки. Захист від термічних ефектів).
9. HD 60364-5-52:2011 Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems (IEC 60364-5-52:2009, modified + corrigendum Feb. 2011) (Установки електричні низьковольтні. Ч. 5-52. Видбирання та монтування електричного устаткування. Системи електропроводки).
10. HD 60364-5-56:2010 Low-voltage electrical installations – Part 5-56: Selection and erection of electrical equipment – Safety services (IEC 60364-5-56:2009) (Установки електричні низьковольтні. Ч. 5-56. Видбирання та монтування електричного устаткування. Системи безпеки).
11. EN 60702-1:2002 Mineral insulated cables and their terminations with a rated voltage not exceeding 750 V – Part 1: Cables (Кабелі з мінеральною ізоляцією та їх арматура на номінальну напругу до 750 В включно. Ч. 1. Кабелі).
12. EN 50200:2006 Method of test for resistance to fire of unprotected small cables for use in emergency circuits (Метод випробування на вогнестійкість незахищених кабелів з малим перерізом, призначених для застосування в колах аварійного живлення).
13. DIN 4102-12:1998 Fire behaviour of building materials and elements – Fire resistance of electric cable systems required to maintain circuit integrity – Requirements and testing (Вогнева поведінка будівельних матеріалів та елементів. Вогнестійкість електричних кабельних систем, що забезпечують цілісність кіл. Вимоги та випробування).
14. ДСТУ 4549-1:2006 Системи кабельних трубопроводів. Частина 1. Загальні вимоги та методи випробування (IEC 61386-1:1996, IEC 60423:1993, MOD).
15. ДСТУ 4499-1:2005 Системи кабельних коробів. Частина 1. Загальні вимоги та методи випробування (IEC 61084-1:1991, NEQ).
16. EN 50085-1:2005 Cable trunking systems and cable ducting systems for electrical installations - Part 1: General requirements (Системи кабельних коробів із знімними кришками та системи глухих кабельних коробів. Ч. 1. Загальні вимоги).

Bespalova A., Romanyuk V., Dashkovska O., Knysh O., Vetokh O.
Odesa State Academy of Construction and Architecture

CONNECTION CONTROL OF CIRCUIT BREAKERS – FIRE PREVENTION

An analysis of the emergency operation of electrical networks in old buildings was carried out, in which the saturation of the premises with technical life support systems has increased, as a result of which the load of electrical networks has increased, which exceeds the calculated values and causes frequent emergency shutdowns of the electrical network by previously installed circuit breakers. In addition, the operation of circuit breakers in aggressive conditions may violate the permissible current level established for disconnecting consumers. In this case, it is necessary to replace the outdated electrical network with a new one, replace faulty circuit breakers with new ones. Such work requires material costs, so some electricians use the dangerous method of parallel connecting an additional group of contacts to the main group of contacts. To avoid this, it is necessary to establish standard maintenance periods for circuit breakers, prohibit the connection of the contact terminals of circuit breakers with external and internal conductors to change the value of the maximum trip current of the electrical network.

Key words. Fire, fire safety, circuit breakers, incoming and outgoing contact groups, current overloads.

УДК 621.941

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-03

Гальчук Т.Н.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ТОЧНОСТІ БАЗУВАННЯ БАГАТОСТУПІНЧАТИХ ВАЛІВ

Проведено аналіз конструкцій верстатних пристроїв для встановлення валів на жорстких опорних призмах, в універсальних машинних лецатах та у збірно-розбірному пристрої. Встановлено, що коефіцієнт часової гнучкості, який характеризується часом переналагодження пристрою, величиною партії запуску деталей та часом обробки деталі має найвищі показники часової гнучкості для компонування збірно-розбірного пристрою. Встановлено, що доцільно використовувати такий пристрій для партії запуску заготовок більше 3 штук, якщо основний час обробки 1 хвилина. Проведені аналітичні дослідження точності базування багатоступінчатих валів у призмах для двох варіантів опорних шийок: базові поверхні мають однаковий квалітет точності, базові поверхні мають різні квалітети точності. Дослідження показали, що величина похибки базування для опорних шийок по першому варіанту збільшується зі збільшенням діаметру базових поверхонь заготовок та зменшенням кута призми α . По-другому варіанту - величина похибки базування збільшується в разі збільшення точності обробки шийки та зменшенні величини кута призми α . Отримані результати вказують на доцільність використання конструкції базуючої призми з кутом $\alpha=120^\circ$ для встановлення валів по опорних шийках $\varnothing 50 \dots 80$ мм.

Ключові слова: похибка базування, призми, вал, обробка, часова гнучкість, оптимізація.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій обробки валів обумовлює необхідність подальшого вдосконалення конструкцій верстатних пристроїв з метою скорочення витрат часу, пов'язаних з їх переналагодженням під час переходу до обробки деталей іншого типорозміру. Використовувані для виготовлення валів конструкції верстатних пристроїв повинні враховувати конструктивно-технологічні характеристики їх функціональних елементів, а також умови виробництва [1]. Конструкції функціональних елементів пристроїв для універсальних верстатів повинні мати високий ступінь гнучкості та рівень уніфікації, невеликий період часу для переналагодження та, основне, забезпечувати задану точність обробки деталей [2]. Тому робота спрямована на вирішення проблеми вибору оптимального варіанту компонування пристрою для встановлення валів на фрезерних і свердлильних верстатах за критеріями: похибка установки валу, часова гнучкість пристрою, матеріалоемність та вартість, що дають можливість оцінити функціональні властивості пристрою.

Основне завдання та одержані результати роботи. Мета роботи – оптимізація конструкції технологічного оснащення на основі проведення аналітичних досліджень точності базування багатоступінчатих валів у призмах.

На основі проведеного аналізу верстатних пристроїв встановлено, що з технічної точки зору базування ступінчастого вала найбільш доцільне за зовнішніми циліндричними поверхнями в разі встановлення в універсальному, механізованому або автоматизованому верстатному пристрої. Така схема базування є найбільш поширеною для валів під час їх обробки на свердлильних і фрезерних верстатах. Для реалізації такої схеми базування використовують жорсткі опорні призми. Аналіз технічних характеристик комплексу призм показав, що відстань між віссю встановлюваної заготовки і основою призми для різних типорозмірів відрізняється. Крім того, якщо у призму одного типорозміру встановити заготовки з різними базовими діаметрами то відстань між їх осями буде Δ [2]. Це означає, що в разі встановлення на одній базовій плиті 2-х призм для базування ступінчастого вала, спостерігається непаралельність осі валу відносно площини базової плити. Тому з метою забезпечення співвісності шийок ступінчастого вала під час базування у призмах використовують комплекти підкладок. Сумарна висота підкладок, встановлених під одну з призм, компенсує необхідну величину Δ . Комплект прокладок складається з 80 шт., розміри яких від 1,00 до 4,95 мм з кроком 0,05 мм. До комплексу підкладок входить 7 типорозмірів: 5 мм, 7,5 мм, 10 мм, 12,5 мм, 15 мм, 17,5 мм та 20 мм [3].

При встановленні ступінчастого вала у пристрій на жорсткі опорні призми його базують за зовнішніми циліндричними поверхнями і торцю. Якщо обробляються деталі з іншими діаметрами базових поверхонь то необхідно замінити жорсткі опорні призми і підібрати відповідні набори прокладок та підкладок, що вимагає додаткових витрат підготовчо-заключного часу. Якщо заготовку вала встановлюють в універсальних машинних лещатах то закріплення заготовки здійснюється рухомою губкою зі змінною наладкою за допомогою гвинта. Таким чином забезпечується необхідна жорсткість заготовки під час різання. Затискання і розтискання заготовки виконує робітник. Під час встановлення заготовки у збірно-розбірному пристрої регулювання напівпризм здійснюється гвинтом з лівою і правою різьбами, що дозволяє одночасно регулювати обидві напівпризми на необхідний базовий діаметр заготовки, таким чином забезпечуючи суміщення осей призми та заготовки. У разі переходу до обробки деталей іншого типорозміру необхідно виконати перекомпонування пристрою, яке здійснюється робітником. Перевагою даного пристрою у порівнянні з універсальними машинними лещатами є можливість обробки кількох поверхонь без переустановлення заготовки, а також використання механізованого приводу для закріплення оброблюваних заготовок.

Для розглянутих компонентів верстатних пристосувань проведено порівняльний аналіз за коефіцієнтом часової гнучкості, що визначається такими показниками: час переналагодження пристрою, величина партії запуску деталей та час обробки деталі.

Час переналагодження пристрою для установки деталей іншого типорозміру впливає на підготовчо-заключну складову норми часу, що пов'язана з переналагодженням установочних та затискних елементів та на допоміжну складову норми часу, що залежить від витрат часу на встановлення-зняття та затискання-розтискання деталей у пристрої. Величина партії запуску деталей, що підлягають обробці у заданому компонентуванні пристрою під час розрахунку змінюється у діапазоні 1–10 шт., а обробка однієї деталі здійснюється за 0,5–5 хв. Встановлено, що компонентування з елементів системи збірно-розбірному пристрої має найвищі показники часової гнучкості порівняно з іншими компонентуваннями пристрою. На рис. 1 наведено залежність коефіцієнта часової гнучкості від величини партії запуску деталей для компонентувань пристрою за умови, що час обробки заготовки становить 1 хвилину. Для компонентувань пристрою, призначеного для обробки заготовок з партією запуску 5 штук, залежність коефіцієнта часової гнучкості від часу обробки деталей має характер, показаний на рис. 2.

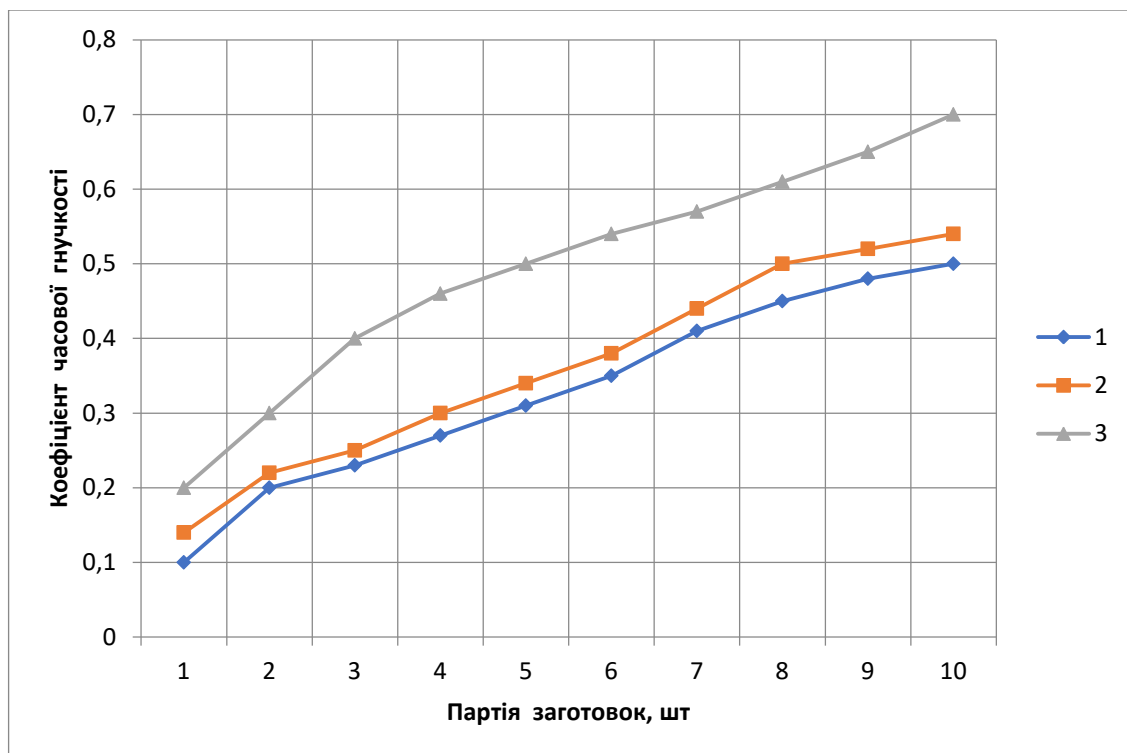


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта часової гнучкості від величини партії запуску деталей у компонентуваннях пристрою: 1 – з комплекту жорстких опорних призм; 2 – машинні лещата; 3 – з комплекту універсально збірно-розбірних пристосувань

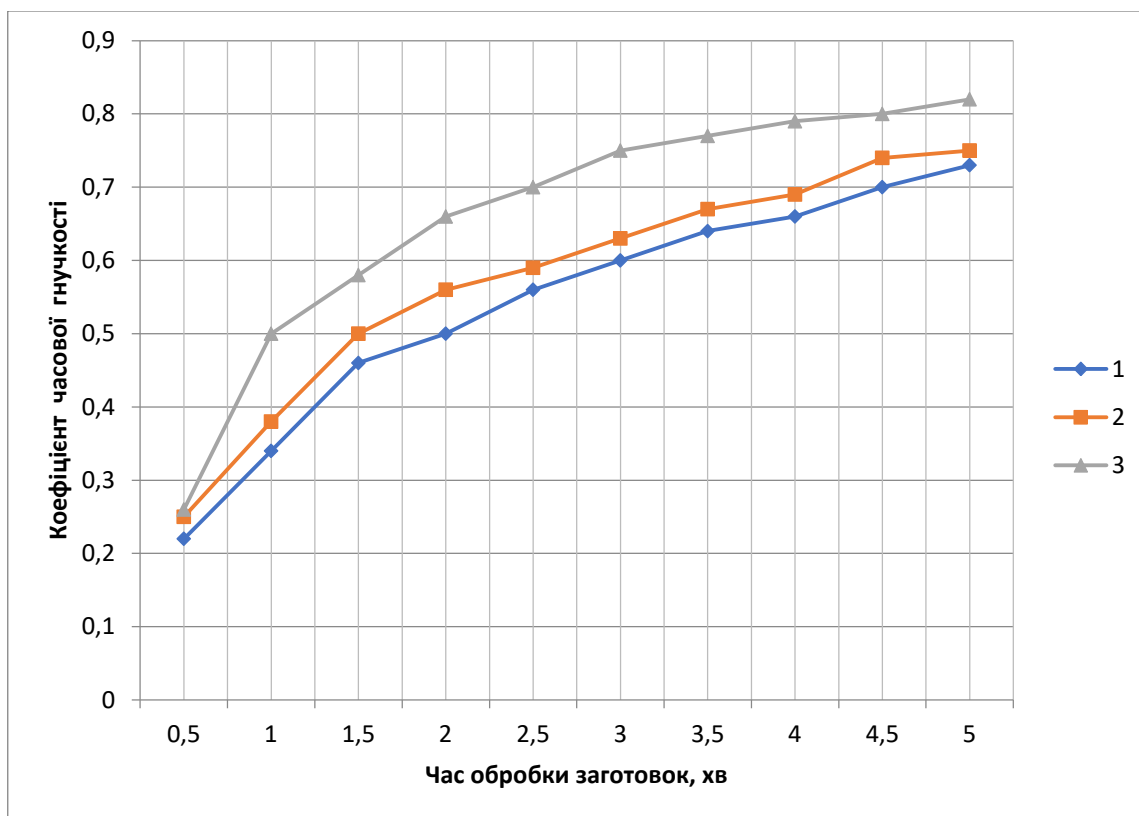


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта часової гнучкості від часу обробки заготовки у компонованнях пристрою: 1 – з комплекту жорстких опорних призм; 2 – машинні лещата; 3 – з комплекту універсально збірно-розбірних пристосувань

Таким чином, запропоноване компонування пристрою з елементів системи універсально збірно-розбірних пристосувань характеризується високим коефіцієнтом часової гнучкості порівняно з іншими компонованнями. Доцільно використовувати розроблене компонування пристрою для обробки заготовок з партією запуску більше 3 штук. Також, як показує графік запропоноване компонування пристрою вигідно використовувати за умови обробки заготовок партією запуску 2...3 штуки, якщо час обробки заготовки перевищуватиме 1 хвилину, а також можливо і для 1 штуки, якщо час обробки заготовки перевищуватиме 2 хвилини.

Базування заготовки у пристроях є одним із найважливіших етапів операції, що істотно впливає на точність обробки. Для реалізації схеми базування деталей типу тіл обертання у пристроях на фрезерних та свердлильних верстатах застосовуються конструкції призм з кутами 60° , 90° та 120° . Перевагою призм перед іншими елементами для встановлення є те, що вісь валу збігається з площиною симетрії призми.

Найчастіше у верстатних пристроях використовуються призми з кутом $\alpha = 90^\circ$. Такі призми мають переваги по забезпеченню кращого стійкого встановлення у порівнянні із призмою з кутом $\alpha=90^\circ$. Також у них можна встановити заготовки із більшим діапазон діаметрів ніж у призми з кутом $\alpha = 60^\circ$. Оскільки діаметр валу має певний допуск на розмір то під час встановлення у призму його вісь симетрії може займати різні положення у площині симетрії призми [4]. Це спричиняє появу похибки базування. Похибка базування визначається за алгоритмом, наведеним [5]. Особливістю базування валів у призмах є те, що вимірювальні бази для розмірів, не збігаються з технологічною базою, що є причиною виникнення похибки базування. В роботі розглядалася одна із найпоширеніших схем базування валів у призмах, що застосовується під час обробки пазів та отворів на фрезерних і свердлильних верстатах (рис. 3).

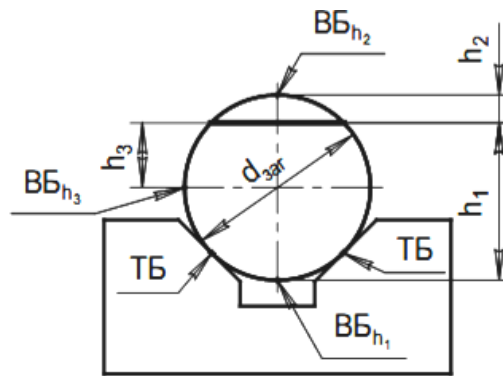
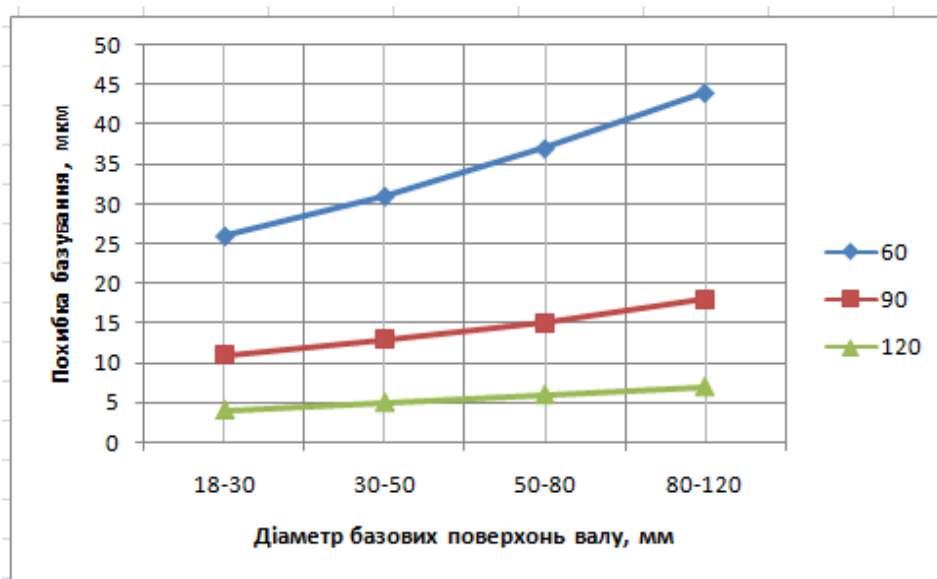


Рисунок 3 – Схема базування валу в призмі

За схемою (рис. 3) технологічна база відповідає точкам дотику заготовки з призмою (точки ТБ), а вимірювальні бази для розмірів h_1 , h_2 , h_3 знаходяться у точках ВБ_{h_1} , ВБ_{h_2} , ВБ_{h_3} відповідно. Величина похибки базування валу ε_6 для різних варіантів призначення розмірів відрізняється за величиною і залежить від допуску на базовий діаметр заготовки T_d та кута призми α [6]. У машинобудуванні найбільш поширені ступінчасті вали у діапазоні діаметрів 30...80 мм, які становлять понад 85% від загальної кількості типорозмірів валів [2]. Тому проводилося дослідження значення похибок базування валу $\varnothing 18...120$ мм у призмах з кутами $\alpha = 60^\circ$; 90° ; 120° для розмірів h_1 , h_2 , h_3 . Воно показало, що найменша похибка базування спостерігається під час дотримання розміру h_1 , найбільша – для розміру h_2 . В результаті проведених розрахунків комп'ютерної обробки даних [7] встановлено, що найменша похибка базування спостерігається для розміру $h_1=52,04$ мм під час встановлення заготовок з діаметрами опорних шийок $\varnothing 55$ мм у призмах із кутом $\alpha = 120^\circ$ (рис. 4).

Рисунок 4 – Залежності похибок базування валу від кута призми α та діаметру базових поверхонь заготовок

В наслідок встановлення у призму заготовок однакового діаметру з базовими поверхнями, виконаними за різними квалітетами точності, спостерігається збільшення величини похибки базування у разі збільшення квалітету та зменшенні величини кута призми α (рис. 5).

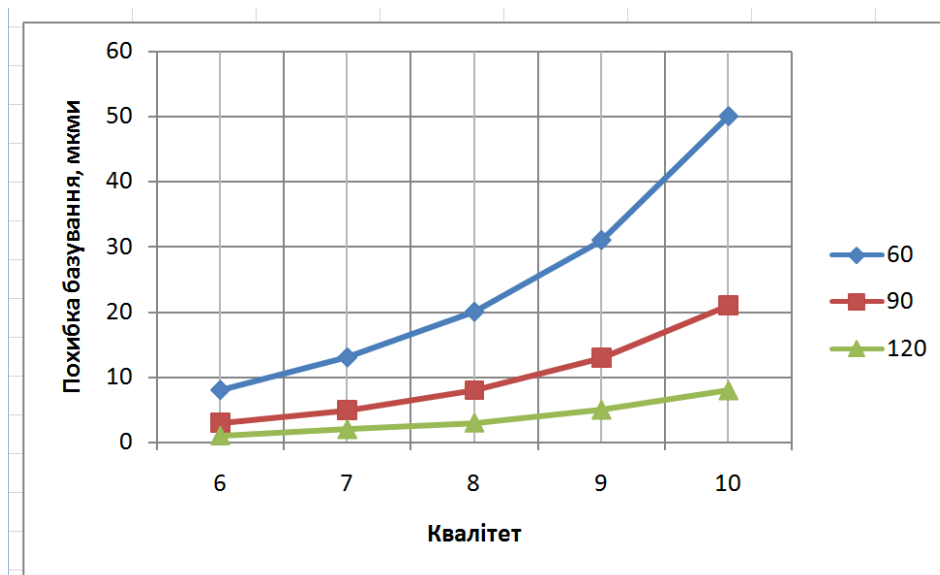


Рисунок 5 – Залежності похибок базування валу від кута призми α та квалітету базових поверхонь заготовок

Висновки. У роботі запропоновано оптимальне компонування збірно-розбірного пристрою для встановлення валів за коефіцієнтом часової гнучкості. Показано, що доцільно використовувати такий пристрій для партії запуску заготовок більше 3 штук, якщо основний час обробки становить 1 хвилину. Проведені аналітичні дослідження точності базування багатоступінчатих валів у призмах показали - величина похибки базування для опорних шийок, з базовими поверхнями однакового квалітету точності, збільшується зі збільшенням діаметру базових поверхонь заготовок та зменшенням кута призми α . Якщо базові поверхні мають різні квалітети точності то величина похибки базування збільшується при збільшенні точності обробки шийки та зменшенні величини кута призми α . Встановлено, що доцільно використовувати конструкції призми з кутом $\alpha=120^\circ$ для встановлення валів по опорних шийках $\varnothing 50...80$ мм, що повністю задовольняє виробничі умови. Також для обробки таких валів доцільно використовувати фрезерувальні верстати з шириною робочих столів 250...400 мм.

Інформаційні джерела

1. Дерібо О.В., Дусанюк Ж.П. Особливості визначення похибки установа як складової припуску для механічної обробки. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 2. С. 107-112. DOI: [10.31649/1997-9266-2021-155-2-107-113](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-107-113)
2. Карпусь В.Є., Котляр О.В., Іванов В.О. Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія. Харків: НТМТ, 2012. 296 с.
3. Пристосування верстатні. Призми опорні. Конструкція: ДСТУ 12195:2008. URL: <http://csm.kiev.ua/>
4. Карпусь В.Є., Іванов В.А. Точність базування валів у призмах. Вісник машинобудування. 2012. №2. С. 40-45.
5. Гальчук Т.Н., Мозоль Б.О. Дослідження точності базування валів у призмах. Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів: збірник наукових праць VI міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2020, м. Луцьк, 2-4 червня 2020 року Луцьк, 2020. С.142-144. URL: <http://t-komplex.net.ua/ua/authors/>
6. Siva Kumar K., Paulraj G. Geometric error control of workpiece during drilling through optimisation of fixture parameter using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research*. 2012. Vol. 50, no. 12. P. 3450-3469. DOI:10.1080/00207543.2011.588616
7. Гальчук Т.Н. Комп'ютерна обробка статичних даних контролю точності виробів машинобудування. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2017. №26. С. 42-47.

Halchuk T.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF THE DEVICE FOR ACHIEVING ACCURACY OF BASEING OF MULTI-STAGE SHAFTS

An analysis of the designs of machine tools for installing shafts on rigid support prisms, in universal machine vices, and in assembly and disassembly devices was carried out. It has been established that the time flexibility factor, which is characterized by the time of device readjustment, the size of the starting batch of parts, and the time of processing the part, has the highest indicators of time flexibility for the layout of the assembly and disassembly device. It has been established that it is advisable to use such a device for starting batches of more than 3 pieces, if the main processing time is 1 minute. Analytical studies of the accuracy of positioning of multi-stage shafts in prisms for two variants of support necks were carried out: the base surfaces have the same accuracy quality; the base surfaces have different accuracy qualities. Studies have shown that the value of the error of basing for support necks according to the first option increases with an increase in the diameter of the base surfaces of the workpieces and a decrease in the angle of the prism α . According to the second option, the value of the basing error increases with increasing the accuracy of processing the neck and reducing the value of the prism angle α . The obtained results indicate the feasibility of using the design of the basing prism with an angle $\alpha=120^\circ$ for installing shafts on support necks $\varnothing 50...80$ mm.

Key words: base error, prisms, shaft, processing, hourly flexibility, optimization.

УДК 621.9.08

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-04

Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

В статті розглядається методика проєктування оптико-електронних приладів, що дозволяють з високою точністю вимірювати поперечні переміщення об'єктів при їх поздовжньому переміщенні від єдиних конструкторських баз. На основі розробленої математичної моделі і застосованих алгоритмів оцінки координат зображень об'єктів сформовані цільові функції проєктування для контролю переміщень, що дозволяють на системотехнічному рівні виконувати проєктні процедури багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації. Запропонована схема оптико-електронних приладів при оптимізованих значеннях параметрів елементів дозволить проводити вимірювання координат об'єктів з середньоквадратичним відхиленням похибки, що не перевищує 1 мкм.

Ключові слова: оптико-електронний прилад, проєктування, похибка, переміщення, контроль, сигнал, вимірювання.

Постановка проблеми. Показники якості виробів у машино- та приладобудуванні, а також при ремонті засобів даних галузей тісно пов'язані з застосуванням методів та засобів розмірного контролю. В даний час більшість підприємств використовує ручні контактні засоби вимірювання геометричних розмірів деталей, що не забезпечують необхідну точність і оперативність вимірювань, підвищують питому вагу ручної праці. Як наслідок виникає необхідність переходу на більш ефективні та точні безконтактні засоби вимірювань.

Використання оптико-електронних приладів (ОЕП) дозволяє виключити з процесу вимірювання суб'єктивний фактор, що важливо при контролі відповідальних деталей, робочі параметри яких значною мірою впливають на безпеку роботи різних машин та приладів.

Перевагою вимірювальних ОЕП є можливість безконтактного контролю лінійних переміщень об'єктів не тільки за одним напрямком, але також за двома і навіть трьома напрямками одночасно, причому цей контроль можна проводити від єдиних конструкторських баз. Щоб повною мірою довести переваги цього приладу необхідно оцінити похибку, яка може бути досягнута при контролі лінійних переміщень. Більш раціональною є інша постановка завдання, яке засновано на можливості досягнення необхідної точності, яка потрібна для вирішення тієї чи іншої практичної задачі. Подібна задача зазвичай формулюється в технічному завданні на проєктування виробу.

Проблема дослідження. Раціональний підхід до проєктування оптико-електронних приладів базується на блочно-ієрархічному поході. З цих позицій функціонального аспекту проєктування включає наступні ієрархічні рівні: функціонально-логічний, системотехнічний, схемотехнічний і компонентний. Зв'язок між рівнями проєктування здійснюється таким чином, що на кожному вищому рівні формулюється технічне завдання (ТЗ) для проєктування складових частин об'єкта проєктування на нижчестоячому рівні. Об'єктом проєктування на функціонально-логічному рівні є комплекс, до складу структурної схеми якого входить, в нашому випадку, вимірювальний ОЕП як складова частина комплексу. На системотехнічному рівні об'єктом проєктування є вимірювальний ОЕП, структурна схема якого відповідає ступеню деталізації функціональної схеми. На схемотехнічному рівні об'єктами проєктування є окремі елементи функціональної схеми (оптична система (ОС), електронний тракт тощо), структурні схеми яких представляються у вигляді принципів схем. На компонентному рівні об'єктами проєктування є елементи принципів схем.

Методологія спадного проєктування полягає у вирішенні завдань, пов'язаних з проєктуванням від верхнього ієрархічного рівня до нижчого. На кожному рівні вибирається основний показник якості і на основі методів математичного моделювання визначається цільова функція проєктування як залежність цього основного показника якості від змінних проєктування – параметрів елементів структурної схеми для кожного ієрархічного рівня. На основі виконання проєктних процедур багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації

визначається поєднання значень змінних проектування, оптимальне в сенсі досягнення екстремуму цільової функції проектування.

Особливості проектування вимірювальних ОЕП в основному пов'язані з проектуванням на функціонально-логічному і системотехнічному рівнях проектування. Щоб вирішувати задачі проектування на функціонально-логічному рівні потрібно вибрати конкретну область застосування вимірювальних ОЕП контролю лінійних переміщень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подальший розвиток ряду напрямків в галузі приладобудування, верстатобудування і машинобудування в значній мірі пов'язаний з вирішенням проблеми забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів [1, 2, 3]. Ця проблема обумовлена наявністю ряду невирішених технічних задач в області розробки вимірювальних засобів, внаслідок чого на ринку відсутні високоточні засоби контролю, що дозволяють безконтактним методом проводити вимірювання похибок лінійних переміщень об'єктів при значному діапазоні цих переміщень і в складних умовах експлуатації, в тому числі при наявності вібрацій [4, 5].

Недосконалість вимірювальних схем, які використовуються в даний час при контролі взаємного положення об'єктів, зокрема, при реалізації методів активного контролю на металорізальних верстатах з ЧПК пов'язана зі складнощами використання єдиних вимірювальних баз при реалізації контролю з використанням існуючої вимірювальної апаратури.

Основними напрямками вирішення задачі розробки методів і створення нових високоточних безконтактних вимірювальних приладів для контролю похибок лінійних переміщень об'єктів, обумовлених відступом від прямолінійності і кутовими зміщеннями об'єктів є розробка нових принципів дії і схем вимірювальних ОЕП, в яких використовується сучасна елементна база, а також засоби цифрової обробки сигналів, в яких реалізуються ефективні алгоритми [6].

Мета роботи полягає у розробці методики проектування високоточних оптико-електронних приладів для безконтактного автоматичного вимірювання поперечних переміщень об'єктів при їх значному поздовжньому переміщенні.

Викладення основного матеріалу. Однією з областей застосування, яка розглядалася вище, є механічна обробка на верстатах з ЧПК, де вимірювальні ОЕП можуть бути використані в системах активного контролю. Тоді на функціонально-логічному рівні об'єктом проектування є комплекс, що представляє собою систему автоматичного управління обробкою на верстаті з ЧПК. Припустимо, що основним показником якості такого комплексу є відсоток браку деталей, що виготовляються на верстатному обладнанні. Щоб визначити оптимальне поєднання параметрів складових частин системи управління, в тому числі вимоги до похибки вимірювального ОЕП контролю лінійних переміщень, потрібно визначити цільову функцію проектування. Але, як зазначено в [2], в даний час відсутній досить повний формалізований опис взаємозв'язків між результатами вимірювання з необхідними корекціями налаштувань технологічного процесу при активному контролі. У зв'язку з цим відсутня можливість розробки математичної моделі і визначенні на її основі цільової функції для проектування такого комплексу на функціонально-логічному рівні. Тому наведено методику проектування тільки для системотехнічного рівня, на якому об'єктом проектування є власне вимірювальний ОЕП для контролю похибок лінійних переміщень об'єктів. Для вимірювального ОЕП основним показником якості, який повинен бути заданий в технічному завданні, є похибки контролю поперечних і кутових переміщень об'єкта при його поздовжньому переміщенні. Так як визначити допустиме значення цих похибок на основі виконання процедур проектування на функціонально-логічному рівні неможливо, то для механічної обробки пропонується визначати значення цього показника для верстата з заданим класом точності. Відомо, що механообробні верстати в залежності від точності роботи поділяються на класи відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1 – Класи точності верстатів

Позначення	Найменування
Н	Верстати нормальної точності
П	Верстати підвищеної точності
В	Верстати високої точності
А	Верстати особливо високої точності
С	Особливо точні верстати

Існують стандарти, які регламентують значення похибки верстатів певних класів для різних показників, наприклад, непрямої лінійності переміщення супорта, биття шпинделя тощо. Норми точності для токарних і токарно-гвинторізних верстатів, що визначають похибку переміщень супорта, та інших робочих органів для верстатів класів А і С не перевищує значень 5 – 6 мкм.

На основі цього можна припустити, що похибка датчиків, призначених для контролю лінійних переміщень не повинна перевищувати 2 – 3 мкм. Це значення похибки для прецизійних верстатів будемо вважати граничним значенням похибки для наших вимірювальних ОЕП.

Процес проектування на системотехнічному рівні включає наступні етапи:

Етап 1. Розробка математичної моделі об'єкта проектування – оптико-електронних приладів вимірювання переміщень, що включає розробку структурної схеми і функціональних моделей елементів цієї схеми.

Етап 2. Рішення задачі аналізу для визначення сигналу і перешкод на виході моделі приладу.

Етап 3. Формулювання цільової функції проектування для обраного алгоритму оцінки параметра сигналу, що містить інформацію про величину переміщення об'єкта.

Етап 4. Визначення оптимального вектора змінних проектування, що визначає значення параметрів елементів структурної (функціональної) схеми приладу.

Головною особливістю оптико-електронних приладів є те, що випромінювання від когерентного джерела – лазера, що підсвічує транспарант з амплітудним коефіцієнтом пропускання, зображення якого проектується репродукційною афокальною ОС в простір предметів, де розташований об'єкт, що переміщається.

При розробці математичної моделі прийняті наступні припущення:

- ОС формування пучка лазерного випромінювання формує плоский хвильовий фронт;
- афокальні репродукційні системи є просторово-інваріантними;
- призма і плоскі дзеркала, що встановлюються на об'єктах контролю, не мають похибок виготовлення (не вносять спотворень);
- приймач випромінювання і електронний тракт телевізійної системи є лінійними;
- відсутній розкид параметрів і взаємний вплив елементів матричного приймача випромінювання (МПВ);
- електронний тракт цифрової телевізійної камери не вносить лінійних спотворень в сигнал.

З урахуванням прийнятих припущень структурна схема вимірювального ОЕП, як об'єкта проектування на системотехнічному рівні, представлена на рисунку 1.

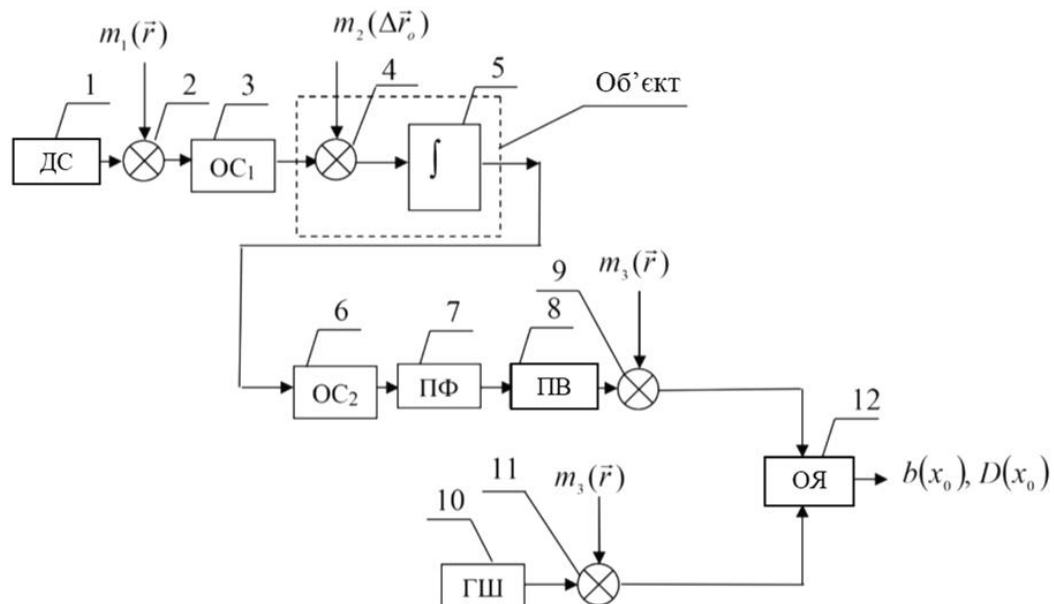


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального ОЕП активного типу, як об'єкта проектування:

- 1 – джерело оптичного сигналу; 2 – модулятор; 3 – оптична система; 4 – модулятор;
5 – інтегратор; 6 – оптична система; 7 – просторовий фільтр; 8 – приймач випромінювання;
9, 11 – модулятори; 10 – генератор шуму; 12 – алгоритм оцінки якості

У даній структурній схемі джерело оптичного сигналу 1 моделює випромінювання лазера, який тут приймається як джерело когерентного випромінювання. У прийнятому модельному описі джерело оптичного сигналу 1 формує плоский хвильовий фронт з амплітудою A_0 на довжині хвилі λ , а саме $A(x, y) = A_0$.

Модулятор поз. 2, що являє собою помножувач, що відображає властивості амплітудного транспаранта, який має коефіцієнт пропускання за інтенсивністю $\tau(x, y)$. Відповідно з цим модулююча функція транспаранта описується як

$$m_1(x, y) = \sqrt{\tau(x, y)}. \quad (1)$$

Структурний елемент ОС₁ – поз. 3, моделює властивості репродукційної афокальної ОС передавальної частини приладу. Особливістю репродукційної афокальної ОС є телецентричний хід променів при проекції зображення транспаранта в простір предметів. Елемент ОС₁ характеризується когерентною функцією розсіювання $h_1(x', y')$, коефіцієнтом пропускання за інтенсивністю τ_1 і коефіцієнтом лінійного збільшення $\beta_1 = 1/\Gamma_1$ (Γ_1 – кутове збільшення афокальної системи).

Структурні елементи 4 і 5 моделюють перетворення оптичного сигналу, які вносить об'єкт. Ці перетворення полягають в переміщенні зображення в напрямках осей X і Y , а також переміщення уздовж осі Z (оптичної осі). Так як об'єкт, в силу прийнятого припущення, не вносить лінійних спотворень, то модулююча функція, яка надходить на модулятор 4, описується як:

$$m_2(\vec{r}, \Delta\vec{r}_0) = \delta\left[\xi - (x' - \Delta x_0), \eta - (y' - \Delta y_0), \xi - (z' - \Delta z_0)\right], \quad (2)$$

де $\Delta\vec{r}_0 = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)^T$ – вектор зміщення об'єкта відносно системи координат $x'y'z'$, зв'язаної із зображенням транспаранта, причому Δx_0 і Δy_0 визначають поперечне переміщення;

Δz_0 – переміщення в напрямку оптичної осі, яке можна розглядати як розфокусування $\Delta F = \Delta z_0$.

Структурний елемент ОС₂ – поз. 6, моделює властивості репродукційної афокальної ОС приймальної частини приладу. Елемент ОС₂ характеризується когерентною функцією розсіювання $h_2(x', y')$, коефіцієнтом пропускання за інтенсивністю τ_2 і коефіцієнтом лінійного збільшення $\beta_2 = 1/\Gamma_2$ (Γ_2 – кутове збільшення).

Структурні елементи 7, 8 і 5 моделюють матричний приймач випромінювання (МПВ), який входить до складу телевізійної камери приймального каналу. Зокрема, просторовий фільтр 7 має імпульсний відгук:

$$H_{III}(x', y') = \frac{1}{a_x a_y} \text{rest}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right), \quad (3)$$

де a_x і a_y – розміри чутливого елемента МПВ.

Структурний елемент 8 – квадратичний приймач, що перетворює інтенсивність оптичного сигналу при заданому часі накопичення в електричний сигнал відповідно зі значенням чутливості $S(\lambda)$.

Структурні елементи 9 і 11 – модулятори, які характеризуються модулюючою функцією виду [1]:

$$m_3(x_1, y_1, t) = \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x}, \frac{y_1}{T_y}, \frac{t}{T_k}\right) \cdot \text{rest}\left(\frac{x_1}{l_x}, \frac{y_1}{l_y}\right) H_{III}(x', y') = \frac{1}{a_x a_y} \text{rest}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right), \quad (4)$$

де T_x і T_y – періоди розташування чутливих елементів МПВ, розташованих в площині з координатами x_1, y_1 ;

T_k – період проходження кадрів при зчитуванні сигналу;

l_x і l_y – розміри чутливого шару МПВ.

Таким чином, модулятори описують процеси просторової і тимчасової дискретизації сигналу, які здійснює МПВ телевізійної камери. Якщо вимірювання переміщення здійснюється

за результатами аналізу зображення в кожному реєструючому кадрі, то модулюючу функцію можна представити, як двомірну:

$$m_3(x_1, y_1) = \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x}, \frac{y_1}{T_y}\right) \cdot \text{rest}\left(\frac{x_1}{l_x}, \frac{y_1}{l_y}\right). \quad (5)$$

Структурні елементи 10 і 11 відображають в модельному описі властивості МПВ, як джерела адитивної перешкоди. Вважається, що «шумове» поле на виході МПВ є однорідним і підпорядковується нормальному закону розподілу. Шумове поле МПВ має вигляд «квазібілого шуму» з кореляційною функцією, що має вигляд:

$$Kr(\Delta x, \Delta y, \tau) = \sigma_N^2 \sin c(\pi v_{xM} \Delta x) \sin c(\pi v_{yM} \Delta y) \sin c(\pi v_M \tau), \quad (6)$$

де $v_{xM} = 1/T_x$, $v_{yM} = 1/T_y$, і $v_M = 1/T_K$ – максимальні значення просторової і тимчасової частот випадкового «шумового» поля.

Структурний елемент 12 – вихідний елемент, що виконує обчислення значень показників якості ОЕП, які характеризують похибки контролю лінійних переміщень при реалізації того чи іншого алгоритму оцінки значень вимірюваних величин. У нашому випадку такими показниками якості є умовні зміщення $b(\hat{x}_0 | x_0)$ і дисперсія $D(\hat{x}_0 | x_0)$ оцінки x_0 поперечного переміщення об'єкта (в напрямку осі X) при його поздовжньому переміщенні в напрямку осі Z . Функціональна модель цього структурного елемента визначається алгоритмом обчислень, який реалізується в ЕОМ при визначенні значень переміщень об'єкта. На виході цього структурного елемента повинні обчислюватися показники похибки оцінки x_0 вимірюваних переміщень у вигляді зміщення $b(\hat{x}_0 | x_0)$ і дисперсії $D(\hat{x}_0 | x_0)$ [4].

На основі даних результатів розроблена методика проектування, яка визначає зміст і послідовність операцій і процедур, що виконуються на системотехнічному рівні проектування ОЕП контролю лінійних переміщень, а також особливості процедур, що виконуються на схемотехнічному рівні проектування цих приладів.

Так як функціональні схеми проектного ОЕП для його різних застосувань визначені, то задача проектування полягає у визначенні оптимального вектора проектування, який включає значення параметрів основних елементів функціональної схеми, в тому числі: джерела когерентного випромінювання; транспаранта, який використовується в якості тест-об'єкта; репродукційної афокальної ОС; телевізійної камери. У запропонованій методиці оптимальне поєднання параметрів цих елементів, які розглядаються як змінні проектування, знаходиться в процесі вирішення задачі на екстремум цільової функції проектування, яка встановлює залежність основного показника якості ОЕП – середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання координат переміщень, від змінних проектування. Як показано вище, вид цільової функції проектування в значній мірі залежить від алгоритму, використовуваного при аналізі зображення для оцінки значень переміщень.

Вихідним документом для проектування є технічне завдання (ТЗ). У ТЗ на проектування ОЕП для контролю лінійних переміщень повинні бути задані наступні показники призначення:

- діапазон поздовжніх переміщень ΔZ , в межах якого потрібно здійснювати контроль поперечних переміщень;
- діапазон поперечних переміщень ΔX і ΔY ;
- похибка вимірювання поперечних переміщень δX і δY .

Крім цих обов'язкових показників, у ТЗ можуть бути задані вимоги, які регламентують, наприклад, швидкість переміщень, напрямок переміщень відносно основного робочого переміщення та інші показники.

Зміст і послідовність проектних операцій і процедур включають в себе:

1. Аналіз технічного завдання і визначення діапазону значень змінних проектування.

На основі вимог ТЗ здійснюється попередній вибір алгоритму обробки зображень, який використовується для вимірювання значень переміщень. Алгоритм оцінки максимальної правдоподібності (ОМП) при інших рівних умовах дозволяє досягти більш високої точності, ніж алгоритм «центру мас». Обмеженням на використання алгоритму ОМП є знання виду функції, що описує розподіл в зображенні транспаранта.

Щоб вирішити задачу визначення оптимального вектора змінних проектування, потрібно спочатку визначити діапазон значень складових вектора проектування. Такими параметрами є:

- вид і параметри функції пропускання транспаранта;
- параметри афокальної репродукційної ОС;
- відношення сигналу до шуму в реєстрованому зображенні.

а) Вид і параметри функції пропускання транспаранта.

Для досягнення великих значень чутливості приладу використовувати транспарант у вигляді штрихової міри. Для забезпечення діапазону поздовжніх переміщень ΔZ , в межах якого потрібно здійснювати контроль поперечних переміщень період штрихів T_x слід визначати відповідно до формули:

$$T_x \geq \sqrt{\lambda \Delta Z_M} / \beta, \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання лазера;

ΔZ_M – максимальне значення поздовжнього переміщення об'єкта;

β – лінійне збільшення афокальної репродукційної ОС.

Розміри транспаранта $b_x \times b_y$ слід вибирати з урахуванням діапазону переміщень ΔX і ΔY об'єкта і лінійних розмірів $l_x \times l_y$ світлочутливого шару МПВ телевізійної камери, а саме:

$$b_x \leq (l_x - \Delta X) / \beta; \quad b_y \leq (l_y - \Delta Y) / \beta. \quad (8)$$

б) Параметри афокальної репродукційної ОС.

Основними параметрами афокальної репродукційної ОС є лінійне збільшення β , фокусні відстані f'_1 і f'_2 , габаритний розмір L_{oc} , а також діаметр α_{AD} апертурної діафрагми. Значення перерахованих параметрів визначаються за такими формулами:

$$f'_2 = f'_1 \beta, \quad (9)$$

$$f'_1 + f'_2 \beta, \quad (10)$$

$$\alpha_{AD} \geq 2\lambda f' / T_x. \quad (11)$$

в) Відношення сигналу до шуму в реєстрованому зображенні.

Відношення μ сигналу до шуму в зображенні транспаранта, що реєструється телевізійною камерою, залежить від максимального значення освітленості E_0 в зображенні транспаранта, який формується афокальною репродукційною ОС при підсвічуванні лазером, і пороговою освітленістю E'_Π в площині МПВ телевізійної камери, а саме, $\mu = E_0 / E'_\Pi$.

Якщо вибраний лазер і відома потужність – потік Φ_0 лазерного випромінювання, то значення освітленості в площині зображення визначається за формулою:

$$E_0 = \tau \Phi_0 / (\beta^2 A_\Pi), \quad (12)$$

де τ – коефіцієнт пропускання всієї оптичної системи ОЕП;

A_Π – площа пучка лазерного випромінювання, після ОС, яка формує пучок підсвічування транспаранта.

Зазвичай порогова чутливість телевізійних камер оцінюється значенням порогової освітленості E_Π в площині об'єкта з коефіцієнтом відображення $\rho \approx 0,7$, при реєстрації камерою з об'єктивом, що має відносний отвір $D/f' = 1/1,4$. При таких значеннях порогова освітленість в площині МПВ телевізійної камери дорівнює $E'_\Pi = 0,1E_\Pi$.

На підставі викладеного формулу для розрахунку відношення сигналу до шуму в зображенні транспаранта можна представити у вигляді

$$\mu = \tau \Phi_0 / (0,1\beta^2 A_\Pi E_\Pi). \quad (13)$$

2. Виконання процедур багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації.

Розраховані за формулами значення параметрів використовуються як початкові наближення при вирішенні задачі визначення оптимального вектора змінних проєктування ОЕП. Зауважимо, що ця задача пошуку екстремуму цільової функції проєктування може бути вирішена в процесі виконання процедури багатоваріантного аналізу, тобто прямим перебором значень параметрів зі значень їх апіорного інтервалу.

3. Вибір комплектуючих елементів ОЕП.

На основі обчислених параметрів елементів функціональної схеми ОЕП можна здійснити вибір готових елементів таких, як лазер і телевізійна камера. При виборі лазера особливу увагу слід звертати на довжину когерентності його випромінювання: вона повинна перевищувати

діапазон позовжніх переміщень контрольованих об'єктів.

4. Проектування оптичної системи на схемотехнічному рівні.

Розрахунок елементів оптичної схеми, пов'язаний з проектуванням на схемотехнічному рівні, можна виконувати з використанням пакетів автоматизованого проектування оптичних систем.

Висновки. Оптико-електронні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати поперечні переміщення об'єктів при їх позовжньому переміщенні від єдиних конструкторських баз. Розроблено методику проектування ОЕП для контролю переміщень на системотехнічному рівні. На основі розробленої математичної моделі ОЕП і застосовних алгоритмів оцінки координат зображень об'єктів сформовані цільові функції проектування ОЕП для контролю переміщень, що дозволяють на системотехнічному рівні виконувати проектні процедури багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації. На основі розробленої математичної моделі афокальної репродукційної ОС показано, що шляхом оптимізації її параметрів можна забезпечити сталість розподілу інтенсивності в зображенні транспаранта при значному переміщенні площини реєстрації уздовж оптичної осі.

Інформаційні джерела

1. Афанасьєва О. В., Курський Ю. С., Одаренко Є. М. Оптичні вимірювання: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1. 180 с.
2. Тимчик Г. С., Скицюк В. І., Клочко Т. Р. Оптичні вимірювання у механічній обробці деталей: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 332 с.
3. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Аналіз методів метрологічного забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. 2022. Вип. 21. С. 20–25.
4. Максимяк П. П., Фесів І. В. Оптична діагностика випадкових об'єктів: посібник. Чернівці: ЧНУ, 2021. 188 с.
5. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. Кн. 2. 336 с.
6. Шахновський О. М., Денисюк В. Ю. Метрологічне забезпечення контролю похибок переміщення об'єктів оптико-електронними приладами. «Інформаційні технології в освіті, техніці і промисловості»: зб. тез доп. Всеукр. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 8 жовт. 2020 р, Івано-Франківськ, 2020. С. 123 – 124.

Denysiuk V., Ptashenchuk V.

Lutsk National Technical University

METHOD FOR DESIGNING HIGH-PRECISION OPTICAL-ELECTRONIC APPLIANCES FOR CONTACTLESS AUTOMATIC VIMING OF LINEAR MOVEMENTS

The article examines the design methodology of optical-electronic devices that allow high-precision measurements of the transverse displacement of objects during their later movement from common design bases. Based on a fragmented mathematical model and state-of-the-art algorithms for estimating coordinates, the image of objects formed by the target design functions for controlling movement, which allows the design to be finalized on a system-technical level and procedures for multivariate analysis and parametric optimization. A diagram of optical-electronic devices has been designed, with optimized values of the parameters of the elements, to allow the alignment of object coordinates with mean-square deviations that do not exceed 1 micron.

Key words: optical-electronic device, design, abduction, displacement, control, signal, extinction.

УДК 681.21.088

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-05

Кепещук Т.В.¹, Пастущин Л.Б.¹, Пташенчук В.В.²¹Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації» м. Івано-Франківськ, Україна²Луцький національний технічний університет

ТИПОВА МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ШТАНГЕНІНСТРУМЕНТУ

Робота присвячена розробленню практичних рекомендацій щодо калібрування штангенінструменту, формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання. Основним завданням калібрувальних лабораторій є забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів вимірювання під час калібрування засобів вимірювальної техніки, що в свою чергу є неможливим без застосування методик калібрування. Відповідно до міжнародних та національних документів, що регламентують вимоги до компетентності та діяльності калібрувальних лабораторій, передбачено можливість лабораторіям розробляти власні методики калібрування. Розроблено типову методику калібрування штангенінструменту, який знаходиться в експлуатації у випробувальних та калібрувальних лабораторіях. Викладений матеріал надає практичні рекомендації щодо калібрування штангенінструменту та розробки власних методик калібрування штангенінструменту, формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Ключові слова: *штангенінструмент, методика калібрування, невизначеність вимірювань, вимірювання, засіб вимірювальної техніки, калібрувальна лабораторія.*

Постановка проблеми. Після підписання Угоди про асоціацію з ЄС виникла потреба у гармонізації українського законодавства з європейським, у тому числі у сфері технічного регулювання. Зокрема, з 1 січня 2016 року набула чинності нова редакція Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність» [1]. Відповідно до вказаного Закону термін калібрувальна лабораторія визначається як: підприємство, організація або їх відокремлений підрозділ, що здійснює калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). У свою чергу термін калібрування визначається як: сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу. Даний термін гармонізований з терміном «калібрування» згідно VIM [2]. Вимоги щодо компетентності калібрувальних та випробувальних лабораторій регламентуються згідно національного стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [3], який ідентичний європейському та міжнародному документу EN ISO/IEC 17025:2107 та ISO/IEC 17025:2107. Окрім цього, акредитовані калібрувальні лабораторії при провадженні своєї діяльності також повинні керуватися наступними міжнародними документами: ЕА-4/02 М, ІЛАС-G8:09, ІЛАС-P10:07, ІЛАС-P14:09 [4, 5, 6, 7,] та документами Національного агентства з акредитації України: ЗД-08.00.09, ЗД-08.00.29, ІН-08.02.05 [8, 9, 10].

Стандарт ДСТУ EN ISO/IEC 17025 встановлює те, що калібрувальна лабораторія має використовувати прийнятні методи та процедури для всієї лабораторної діяльності. Під час калібрування засобів вимірювальної техніки застосовуються міжнародні, регіональні або національні стандарти, але у разі відсутності стандартизованих методик калібрування калібрувальна лабораторія може розробити власну нестандартизовану методику калібрування засобів вимірювальної техніки. На даний час для більшості ЗВТ, еталонів, випробувального та допоміжного обладнання відсутні методики калібрування, що встановлені у національних стандартах, тому питання щодо розроблення таких методик є досить актуальним.

Мета роботи - розроблення типової методики калібрування штангенінструменту, застосування якої дасть можливість забезпечити єдність вимірювання та метрологічну простежуваність від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки.

Основний текст статті. Типова методика калібрування штангенінструменту розроблена відповідно до вимог ЕА-4/02 М (в частині процедури оцінювання невизначеності вимірювань) та має наступну структуру: сфера застосування, компетенція, засоби калібрування, вимоги безпеки, підготовка до калібрування, опис процесу калібрування, обробка результатів вимірювання, складання бюджету та оцінювання невизначеності вимірювання, оформлення результатів калібрування, нормативні посилання, додатки.

Дана методика поширюється на штангенциркулі, штангенрейсмуси, штангенглибиноміри, які можуть бути оснащені цифровим відліковим пристроєм, круговою шкалою або ноніусом. Температура повітря в приміщенні повинна бути $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря від 40% до 85%, атмосферний тиск від 93325 Па до 103991 Па. Зміна температури не повинна перевищувати $0,5 ^\circ\text{C}$ за 1 годину. У приміщенні, де виконують калібрування штангенінструменту, не повинно бути повітряних та теплових потоків, а також вібрацій.

Під час калібрування застосовуються наступні засоби калібрування (еталонне та допоміжне обладнання): набір мір довжини кінцевих плоскопаралельних, калібрувальна/повірочна плита, лекальна лінійка, плоска скляна пластина, мікрометр гладкий, термометр лабораторний, барометр, психрометр аспіраційний.

Перед проведенням калібрування проводиться контроль умов калібрування, всі дані фіксуються в протоколі калібрування. Періодично, у процесі проведення калібрування штангенінструменту перевіряють, чи умови калібрування не виходять за встановлені межі. При проведенні калібрування штангенінструменту повинні бути дотримані загальні правила з безпеки праці. При підготовці до проведення калібрування слід дотримуватися правил пожежної безпеки, при роботі з легкозаймистими рідинами, до яких відноситься спирт, авіаційний бензин, який використовується для промивання поверхонь штангенінструменту. У приміщенні повинна бути протипожежна сигналізація і засоби для гасіння пожежі. Перед проведенням калібрування штангенінструмент, еталонне та допоміжне обладнання для калібрування повинні бути приведені в робочий стан відповідно з експлуатаційними документами і витримані протягом чотирьох годин на робочому місці. При калібруванні штангенінструмент та міри довжини кінцеві плоскопаралельні необхідно брати за допомогою рукавичок або теплоізолюваної серветки. Всі деталі штангенінструменту повинні бути розмагнічені.

При зовнішньому огляді повинно бути встановлено відповідність наступним вимогам:

- відсутність сколів, тріщин і забоїв на вимірювальних поверхнях та інших дефектів, які погіршують експлуатаційні характеристики і перешкоджають відліку показів;
- відсутність перекосу краю ноніуса до штрихів шкали штанги, які перешкоджають відліку показів;

При опробуванні перевіряють:

- відсутність переміщення рамки під дією власної ваги;
- плавність переміщення рамки по штанзі штангенінструменту;
- плавність переміщення рамки по штанзі разом з мікрометричною подачею;
- можливість зажиму рамки в будь-якому положенні в межах діапазону вимірювання;
- відсутність пошкоджень на шкалі штанги при переміщенні по ній рамки.

Для штангенінструменту з цифровим відліковим пристроєм перевіряють:

- якість індикації показів - індикація повинна бути чіткою, не мати розривів і бути рівномірно заповненою;
- відсутність на дисплеї штангенінструменту дефектів, що перешкоджають чи спотворюють покази.

Працездатність кнопок управління і цифрового відлікового пристрою перевіряють відповідно до вказівок, викладених в настанові з експлуатації на штангенінструмент.

Для штангенрейсмусів правильність установки визначають по співпадінню нульових штрихів шкали штанги і ноніуса при контакті ніжки з калібрувальною/повірочною плитою або поверхнею кінцевої міри, встановленої на плиту. За необхідності проводиться повздовжнє регулювання шкали ноніуса або кругової шкали. У випадку, коли штангенрейсмус оснащений цифровим відліковим пристроєм, на індикаторі повинні відображатися нульові покази. Для штангенглибиномірів правильність установки визначають наступним чином: вимірювальну поверхню рамки штангенглибиноміра притискають до плоскої скляної пластини, а вимірювальну поверхню штанги підводять до контакту з площиною скляної пластини, при цьому нульовий штрих ноніуса повинен збігатися з нульовим штрихом шкали штанги. Якщо штангенглибиномір оснащений цифровим відліковим пристроєм, на індикаторі повинні відображатися нульові покази. За необхідності проводиться повздовжнє регулювання шкали ноніуса або кругової шкали. Для штангенциркулів правильність установки нульових показів визначають при зведених вимірювальних губках, при цьому контролюють співпадіння нульових штрихів шкал штанги і ноніуса. Для штангенциркулів з відліком по ноніусу зміщення

нульового штриха не допускається. При необхідності здійснюється налаштування шкали ноніуса або кругової шкали.

Під час калібрування штангенінструменту визначають наступні метрологічні характеристики: відхилення від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, відхилення від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, відхилення показів штангенінструменту, а також формують бюджет та оцінюють невизначеність результатів вимірювання.

Відхилення від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту (вимірювальних губок та торця штанги штангенциркулів, штанги і рамки штангенглибиноміра, ніжки штангенрейсмуса) визначають лекальною лінійкою. Ребро лекальної лінійки встановлюють на вимірювальну поверхню штангенінструменту. Значення зазору визначають візуально - порівнянням його зі зразком (рис. 1). Зазор між ребром лекальної лінійки і контрольованою поверхнею оцінюють візуально, порівнюючи з «зразком зазору». Для отримання «зразка зазору» до робочої поверхні плоскої скляної пластини притирають паралельно один до одного міри довжини кінцеві плоскопаралельні, різниця довжин яких відповідає значенню зазору: від 0,001 мм до 0,009 мм (дві однакові кінцеві міри більшої довжини притирають по краях, а кінцеві міри меншої довжини - між ними). Тоді при накладенні ребра лекальної лінійки на кінцеві міри довжини в напрямку паралельному їх короткому ребру, отримують відповідні «зразки зазору А, Б» (рис. 1).

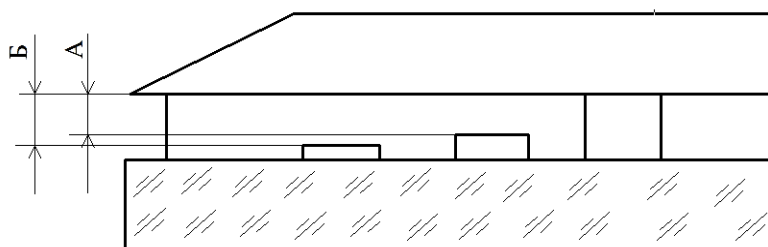


Рисунок 1 – «Зразок зазору» для вимірювання відхилення від площинності робочих поверхонь штангенінструменту

Відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок для вимірювання зовнішніх лінійних розмірів штангенциркулів визначають за допомогою мір довжини кінцевих плоскопаралельних. Вимірювання проводиться при двох положеннях міри довжини кінцевої плоскопаралельної в середині діапазону вимірювання штангенциркуля (рис. 2). Міру довжини кінцеву плоскопаралельну поміщають між вимірювальними поверхнями губок штангенциркуля. Зусилля має забезпечувати нормальне ковзання вимірювальних поверхонь губок по вимірювальній поверхні кінцевих мір довжини при відпущеному стопорному гвинті рамки. Довге ребро вимірювальної поверхні губки повинно бути перпендикулярно до довгого ребра кінцевої міри довжини і перебувати всередині вимірювальної поверхні. За відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок приймають найбільшу різницю вимірюваних відстаней при кожному положенні рухомої губки.

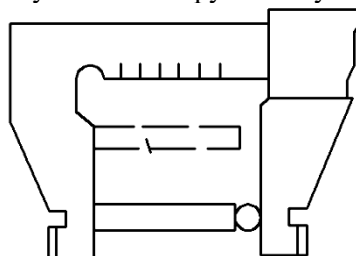


Рисунок 2 – Вимірювання відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок штангенциркулів

Відхилення від паралельності ніжки штангенрейсмуса та вимірювальних поверхонь губок для вимірювання внутрішніх лінійних розмірів штангенциркулем і відстань між ними визначають гладким мікрометром.

Відхилення від паралельності ніжки штангенрейсмусу визначають при вимірюванні мікрометром розміру «g» в трьох перетинах (рис. 3). За відхилення від паралельності приймають різницю між найбільшим і найменшим показами мікрометра.

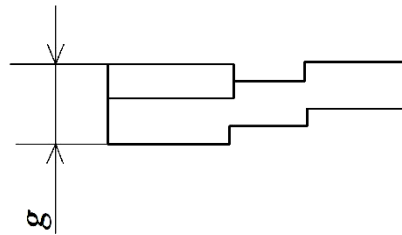


Рисунок 3 – Ніжка штангенрейсмусу

Вимірювання відхилення вимірювальних поверхонь губок для вимірювання внутрішніх лінійних розмірів штангенциркулем і відстань між ними проводять при зафіксованому стопорному гвинті рамки. Штангенциркуль встановлюють на розмір 10 мм по мірі довжини кінцевій плоскопаралельній 10 мм. Мікрометром вимірюють відстань між вимірювальними поверхнями губок в двох або трьох перетинах по довжині губок. Різниця відстаней дорівнює відхиленню від паралельності вимірювальних поверхонь.

Розмір «g» ніжки штангенрейсмусу та розмір вимірювальних губок штангенциркулів типу ШЦ-II та ШЦ-III вимірюють з допомогою гладкого мікрометра. Вимірювання проводять при зафіксованому стопорному гвинті рамки. При визначенні розміру циліндричних вимірювальних поверхонь губок бічні поверхні встановлюють в одній площині.

Визначення відхилення показів штангенінструменту виконують не менше як у трьох точках рівномірно розташованих по шкалі штангенінструменту методом безпосереднього порівняння з мірами довжини кінцевими плоскопаралельними. Для виключення нагрівання мір та штангенінструменту від рук оператора необхідно уникати контакту з незахищеними руками і застосовувати бавовняну тканину чи рукавиці. На початку калібрування установлюють на нульове положення штангенінструмент.

При відліку показів по ноніусу штангенінструменту, шкала ноніусу повинна знаходитися прямо перед очима, щоб уникнути помилки через паралакс. У тому випадку, коли є сумніви в відліку, застосовується лупа.

При визначенні відхилення показів штангенциркулів міру довжини кінцеву плоскопаралельну (блок кінцевих мір) поміщають між губками штангенциркуля. Довге ребро вимірювальної поверхні губки повинно бути перпендикулярно до довгого ребра кінцевої міри довжини і перебувати в середині вимірювальної поверхні. Рухома губка штангенінструменту зміщується за допомогою мікроподачі (або вручну за її відсутності) до контакту з мірами довжини кінцевими плоскопаралельними. При цьому повинно забезпечуватися нормальне ковзання вимірювальних поверхонь губок по вимірювальній поверхні кінцевих мір довжини при відпущеному стопорному гвинті рамки. У такому положенні проводиться відлік показів по відліковому пристрою штангенциркуля (ноніус, кругова шкала, дисплей).

При визначенні відхилення показів штангенрейсмусу міру довжини кінцеву плоскопаралельну (блок кінцевих мір) розташовують на калібрувальній/пovірочній плиті, вимірювальну поверхню ніжки підводять до контакту з кінцевою мірою так, щоб довге ребро кінцевої міри або блоку було перпендикулярно довгому ребру вимірювальної поверхні ніжки штангенрейсмусу і забезпечувалося нормальне ковзання між дотичними поверхнями. У такому положенні проводиться відлік показів по відліковому пристрою штангенрейсмусу (ноніус, кругова шкала, дисплей).

Для визначення відхилення показів штангенглибиноміра (штангенглибиноміра штангенциркуля тип ШЦ-I) беруть дві міри довжини кінцевих плоскопаралельних (2 блоки кінцевих мір) однакового розміру. Дві міри довжини кінцевих плоскопаралельних (блоки кінцевих мір) розміщують на калібрувальній/пovірочній плиті так, щоб довгі ребра кінцевих мір довжини були паралельні. Вимірювальну поверхню рамки штангенглибиноміра встановлюють на дві міри довжини кінцевих плоскопаралельних (блоки кінцевих мір) таким чином, щоб довгі ребра мір і вимірювальна поверхня рамки були взаємно перпендикулярні. Вимірювальну поверхню рамки притискають рукою до кінцевих мір довжини, а вимірювальну поверхню штанги підводять до контакту з калібрувальною/пovірочною плитою. У такому

положенні проводиться відлік показів по відліковому пристрою штангенглибиноміра (ноніус, кругова шкала, дисплей).

Для оцінювання невизначеності вимірювання виконують не менше 10 повторних вимірювань у кожній точці калібрування. Визначення показів штангенінструменту виконується одним і тим же оператором в одних і тих же встановлених умовах калібрування.

За одержаними значеннями вимірної величини обчислюють середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали штангенінструменту, за формулою:

$$\bar{l}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i_0}}{n} \quad (1)$$

де: n – кількість вимірювань;

l_{i_0} – результат i -го вимірювання довжини, зчитане зі шкали штангенінструменту, [мм].

У кожній точці калібрування обчислюється відхилення показів штангенінструменту:

$$\Delta l_{iu} = \bar{l}_0 - l_{MKП} \quad (2)$$

де: $\bar{l}_0$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали штангенінструменту, [мм];

$l_{MKП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною (блоком кінцевих мір), [мм].

За результатами обрахунків одержується статистична оцінка середнього квадратичного відхилення ряду результатів вимірювання:

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{i_0} - \bar{l}_0)^2}{n-1}} \quad (3)$$

де: l_{i_0} – результат i -го вимірювання довжини, яке зчитане зі шкали штангенінструменту, [мм];

$\bar{l}_0$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали штангенінструменту, [мм].

Для побудови модельного рівняння ідентифікуємо основні істотні джерела невизначеності вимірювання. З урахуванням цих джерел модельне рівняння набуде наступного вигляду:

$$\Delta l_{iu} = \bar{l}_0 - l_{MKП} + \delta l_{пл.и} + \delta l_{пр.и} + \delta l_d + \delta l_{MKП} + \delta l_{П MKП} + \delta l_{ДМКП} \quad (4)$$

де: $\bar{l}_0$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали штангенінструменту, [мм];

$l_{MKП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, [мм];

$\delta l_{пл.и}$ – поправка на відхилення від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм];

$\delta l_{пр.и}$ – поправка на відхилення від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм];

δl_d – поправка, що враховує роздільну здатність штангенінструменту, [мм];

$\delta l_{MKП}$ – поправка на відхилення середнього значення довжини міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блок з кінцевих мір), [мм];

$\delta l_{П MKП}$ – поправка на відхилення від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір), [мм];

$\delta l_{ДМКП}$ – поправка на дрейф довжини міри кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір), [мм].

Оцінювання невизначеності вимірювань проводиться відповідно до ЕА-4/02 М.

Розширена невизначеність вимірювання (U , мм) обчислюється за формулою:

$$U = k \cdot u_c \quad (5)$$

де: k – коефіцієнт охоплення ($k=2$ при рівні довіри 95%);

u_c – сумарна стандартна невизначеність, що враховує вплив вхідних величин.

$$u_c = \sqrt{u_{l_0}^2 + u_{MKП}^2 + u_{пл.и}^2 + u_{пр.и}^2 + u_d^2 + u_{ПМКП}^2 + u_{ДМКП}^2} \quad (6)$$

де: $u_{l_0}^-$ – невизначеність, викликана розкидом вимірювання довжини з допомогою штангелі-інструменту, що калібрується, [мм];

u_{IMKP} – стандартна невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блок з кінцевих мір), [мм];

$u_{nl.u}$ – невизначеність, викликана відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм];

$u_{np.u}$ – невизначеність, викликана відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм];

u_d – невизначеність зчитування показів через дискретність штангенінструменту, [мм];

$u_{ПМКП}$ – невизначеність, викликана відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір), [мм];

$u_{ДМКП}$ – невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір), [мм].

Невизначеність результатів вимірювання, викликана розкидом вимірювання довжини з допомогою штангенінструменту, що калібрується, оцінюється за типом А:

$$u_{l_0}^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{i_0} - \bar{l}_0)^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

Невизначеність, типу В, викликана відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, обчислюється за формулою:

$$u_{nl.u} = \frac{l_{nl.u}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

де: $l_{nl.u}$ – відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм].

Невизначеність типу В, викликана відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, обчислюється за формулою:

$$u_{np.u} = \frac{l_{np.u}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

де: $l_{np.u}$ – відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, [мм].

Невизначеність зчитування показів через дискретність штангенінструменту оцінюється за типом В і обчислюється за формулою:

$$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (10)$$

де: d – ціна поділки шкали ноніуса або кругової шкали, [мм].

Якщо штангенінструмент оснащений цифровим відліковим пристроєм, то невизначеність зчитування показів через дискретність штангенінструменту оцінюється за типом В і обчислюється за формулою:

$$u_d = \frac{b}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

де: b – одиниця найменшого розряду цифрового відлікового пристрою штангенінструменту, [мм].

Стандартна невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної обчислюється за формулою:

$$u_{IMKP} = \frac{U_{IMKP}}{2} \quad (12)$$

де: U_{IMKP} – розширена невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блок з кінцевих мір) (з сертифікату калібрування), [мм].

Невизначеність типу В, викликана відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір) обчислюється за формулою:

$$u_{ПМКП} = \frac{l_{ПМКП}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

де: $l_{ПМКП}$ – відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір) (з свідоцтва про калібрування), [мм].

Невизначеність дрейфу довжини міри кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір) з моменту останнього калібрування оцінюється за типом В і обчислюється за формулою:

$$u_{\text{ДМК}} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

де: Δ_1 – відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної на момент останнього калібрування, [мм];

Δ_2 – відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної під час передостаннього калібрування, [мм].

Користуючись модельним рівнянням знайдемо значення коефіцієнтів впливу $\partial t / \partial x_i$. Тут x_i – вхідні величини. Як видно з модельного рівняння, значення всіх коефіцієнтів впливу рівні 1.

Усі джерела невизначеності є незалежними одне від одного, тому значення коефіцієнтів кореляції рівні нулю (кореляція між будь-якою парою вхідних величин відсутня).

Бюджет невизначеності результатів вимірювання при калібруванні штангенінструменту наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності

Назва складової величини	Оцінка x_i	Стандартна невизначеність $u_{(x_i)}$	Закон розподілу	Коефіцієнт чутливості C_i
Невизначеність, викликана розкидом вимірювання довжини з допомогою штангенінструменту, що калібрується, мм;	Значення	u_{l_0}	Нормальний	1
Невизначеність, викликана відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, мм;	Значення	$u_{\text{пл.ш}}$	Прямокутний	1
Невизначеність, викликана відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь штангенінструменту, мм;	Значення	$u_{\text{пр.ш}}$	Прямокутний	1
Невизначеність зчитування показів через дискретність штангенінструменту, мм;	Значення	u_d	Прямокутний	1
Невизначеність, викликана відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку з кінцевих мір), мм;	Значення	$u_{\text{ПМКП}}$	Прямокутний	1
Невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної (блоку кінцевих мір)	Значення	$u_{\text{ДМКП}}$	Прямокутний	1
Стандартна невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної (блоку кінцевих мір), мм;		$u_{\text{МКП}}$	Нормальний	
Сумарна стандартна невизначеність		u_{sum}	Нормальний	
Розширена невизначеність	Значення	U	Нормальний	

Висновки. Виходячи з вище викладеного матеріалу можна зробити наступні висновки:

- відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025 калібрувальні лабораторії можуть розробляти методики калібрування;
- розроблення типової методики калібрування штангенінструменту є невід’ємною частиною забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів калібрування;
- викладений матеріал надає практичні рекомендації щодо розробки калібрувальними лабораторіями власних методик калібрування штангенінструменту;
- основою для розробки методики калібрування є визначення модельного рівняння вимірювання, формування бюджету та оцінювання невизначеності вимірювання. Однак, на сьогоднішній день розроблено лише концепцію оцінювання невизначеності вимірювань, існуючі методики калібрування представлені на рівні рекомендацій. Тому важливим завданням є вдосконалення методології калібрування в частині її регламентування у відповідних стандартизованих методиках калібрування засобів вимірювальної техніки.

Інформаційні джерела

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 05.06.2014р.
2. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT)
3. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (Міжнародний словник з метрології - Основні і загальні поняття і відповідні терміни (VIM)).
4. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. (Виразення невизначеності вимірювання при калібруванні).
5. ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Керівництво з правил ухвалення рішення та декларацій відповідності)
6. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Політика ILAC щодо метрологічної простежуваності результатів вимірювання)
7. ILAC P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні)
8. ЗД-08.00.09 Політика НААУ щодо метрологічної простежуваності вимірювання, що проводять органи з оцінки відповідності відповідно до заявленої сфери акредитації
9. ЗД-08.00.29 Політика НААУ щодо участі органів з оцінки відповідності у перевітках професійного рівня та міжлабораторних порівняннях, відмінних від перевірок професійного рівня
10. ІН-08.02.05 Інструкція «Формування сфери акредитації калібрувальної лабораторії»

¹T. Kepeshchuk, ¹L. Pastushchin, ²V. Ptashenchuk

¹State enterprise "Ivano-Frankivsk Scientific and Production Center of Standardization, Metrology and Certification" Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Lutsk National Technical University

TYPICAL METHOD OF CALIBRATION OF A BAR TOOL

The work is devoted to the development of practical recommendations for the calibration of the rod instrument, the formation of the budget and the assessment of the uncertainty of the measurement results. The main task of calibration laboratories is to ensure the unity of measurement and metrological traceability of measurement results during the calibration of measuring equipment, which in turn is impossible without the use of calibration methods. In accordance with international and national documents regulating the requirements for the competence and activity of calibration laboratories, it is possible for laboratories to develop their own calibration methods. A typical method of calibrating a rod instrument, which is in use in testing and calibration laboratories, has been developed. The presented material provides practical recommendations for calibrating a rod instrument and developing own methods for calibrating a rod instrument, forming a budget, and evaluating the uncertainty of measurement results.

Keywords: rod instrument, method of calibration, measurement uncertainty, measurement, measuring instrument, calibration laboratory.

УДК 681.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-06

Кріль Б.А., Матіко Ф.Д., Шалева В.В., Бугайчук М.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЮЮЧИХ ОРГАНІВ ТА ВАГОВИХ КОМІРОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ ІНФУЗІЙНИХ РОЗЧИНІВ

У статті обґрунтовано доцільність розроблення та застосування експериментальної установки для дослідження приводів перетискних регулюючих органів та вагових комірок, під час проведення робіт з реконструкції технологічних ліній для дозування інфузійних розчинів. Представлено результати розроблення такої установки. Також представлено результати удосконалення приводу перетискного регулюючого органу та виконано його дослідження на розробленій установці. За результатами досліджень підтверджено, що виконані удосконалення дали можливість зменшити час повного відкриття регулюючого органу до значення меншого 1,0 секунди. Таким чином підтверджено придатність удосконаленого регулюючого органу для модернізації технологічної лінії WDM 8002. Виконано дослідження удосконаленої вагової комірки з пропонованим давачем ваги SP8C3. Визначено, що середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання цією коміркою ваги у статичному режимі не перевищує 0,13 %, у динамічному режимі під час наповнення флаконів – не перевищує 0,54 %. Застосування розробленої установки дає можливість обрати оптимальні технічні засоби за співвідношенням ціна – якість та ефективно з короткою зупинкою виробництва провести модернізацію технологічних ліній дозування інфузійних розчинів у виробництві лікарських засобів.

Ключові слова: дозування інфузійних розчинів, вагова комірка, перетискний регулюючий орган, кроковий двигун, експериментальна установка

Постановка проблеми. Науково-пошукові роботи по розробленню та модернізації технологічних ліній для дозування інфузійних розчинів передбачають великі обсяги експериментальних досліджень всіх складових таких ліній, зокрема вагових комірок та регулюючих органів подавання розчину. Однак проведення цих досліджень на діючій технологічній лінії вимагає зупинки технологічного процесу та відповідних виробничих втрат. З метою скорочення термінів розробки та модернізації такі дослідження доцільно провести на спеціально реалізованій експериментальній установці. На такій установці можна підібрати та дослідити швидкодію крокових двигунів та їхніх драйверів, які застосовують як привід в перетискних регулюючих органах, є можливість вибрати та дослідити за критеріями точності зважування та швидкодії сучасні давачі ваги для зважування наповненої тари. В роботі представлено розроблену установку для експериментальних досліджень вагових комірок та регулюючих органів для дозування розчинів а також результати експериментальних досліджень виконаних під час модернізації технологічної лінії типу WDM 8002 для дозування інфузійних розчинів у виробництві лікарських засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво інфузійних розчинів належить до фармацевтичної галузі. Це розчини, які призначені для парентерального застосування, вони можуть мати дуже різні фізико-механічні властивості: різну в'язкість, питому вагу, різну здатність піноутворення, можуть кристалізуватись та окислюватись. Основні вимоги при їхньому виробництві – це збереження високої стерильності та точне дозування їхньої кількості в флакон. Остання вимога зумовлена тим, що до інфузійних розчинів додають ще інші медичні препарати.

Як відомо [1], дозування - процес відмірювання певної кількості речовини шляхом визначення її маси, об'єму або числа однакових штучних об'єктів

За видом робочого циклу дозування може бути безперервним або порційним, а по принципу дії – об'ємним або ваговим. При безперервному дозуванні потік продукту який виходить із дозатора, безперервно зважується і в залежності від результатів зважування продуктивність дозатора постійно коректується. При фасуванні продукції, як правило, застосовується порційне дозування, яке полягає в періодичному повторенні циклів вимірювання дози продукту і подачі її на упаковування. Для порційного дозування

застосовуються об'ємні і вагові дозатори, вимірювачі об'єму і маси продукції, а також дозатори однакових штучних виробів. Обладнання дозування фармацевтичної продукції включає об'ємні і вагові дозатори спеціально призначені для вимірювання кількості речовини, яка подається в окрему споживчу тару. Розглянемо три принципово відмінні системи дозування:

- системи дозування базовані на методі шприцевого наповнення;
- системи автоматичного дозування на основі витратомірів;
- системи дозування базовані на методі вагового наповнення.

Поширеним об'ємним методом дозування є метод шприцевого наповнення. Шприцевий спосіб наповнення ампул набув широкого поширення за кордоном і здійснюється за допомогою установок зі спеціальними дозаторами (поршневыми, мембранними та ін.). Метод має більш складне апаратне оформлення, ніж вакуумний і жорсткіші вимоги до розмірів і формі капілярів ампул, але завдяки ряду переваг він є кращим для застосування в технології ампулювання. Особливо ці переваги позначаються при проведенні операцій наповнення та запаювання в одному автоматі.

До суттєвих переваг шприцевого способу наповнення слід також віднести можливість точного дозування розчину ($\pm 2\%$) та невеликий проміжок часу наповнення та запаювання (5-10 с), що дозволяє ефективно використовувати наповнення їх вільного обсягу інертним газом та значно подовжує термін придатності препарату. При наповненні в ампулу вводиться лише необхідна кількість розчину, при цьому капіляр ампули не змочується розчином, залишається чистим, завдяки чому покращуються умови запаювання ампул. Особливо це важливо для густих та в'язких розчинів. [2].

Недоліками шприцевого методу є:

- мала продуктивність, хоча вона варіюється в залежності від об'єму тари яку наповнюємо розчином; даний метод є ефективним для дозування малих об'ємів; також окрім дозування продукції у ампули даний метод широко застосовується для дозування у флакони, хоч як і було описано вище при цьому значно втрачається продуктивність обладнання;
- технічна та апаратна складність реалізації цього методу.

Перевагами шприцевого методу є:

- висока точність дозування, похибка дозування становить $\pm 2\%$ від заданого об'єму;
- під час наповнення в тару вводиться лише необхідна кількість розчину, при цьому стінки тари не змочуються розчином, залишаються чистими, що позитивно впливає на чистоту розчину, та відсутність додаткового контакту розчинів із зовнішніми стінками.

Іншим методом об'ємного дозування є системи автоматичного дозування реалізовані на основі витратомірів. Принципи побудови таких систем є аналогічними до принципів побудови систем, реалізованих на основі методу шприцевого наповнення. Проте в такій системі замість шприца дозатора на матеріальній лінії дозування встановлено витратомір а також керований відсічний клапан, вмикання якого здійснюється по сигналу наявності пустої тари та вимикання якого здійснюється при досягненні заданого значення витрати. Зазвичай у фармацевтичному виробництві використовують витратоміри Коріоліса. Витратомір Коріоліса — витратомір, у якому вимірювання масової витрати здійснюється на основі прояву сили Коріоліса. Витратоміри цього типу визначають масову витрату безпосередньо, а не через вимірювання швидкості чи об'єму. Робота витратоміра Коріоліса не залежить ні від тиску рідини, ні від її температури, ні від її в'язкості і густини. Тому такі витратоміри є універсальними і не вимагають проведення повторних калібрувань і переналадження для кожного конкретного типу розчину [3].

До переваг системи автоматичного дозування реалізованої на основі витратомірів належать:

- технічна простота реалізації системи керування;
- надійність роботи системи;
- універсальність використання незалежно від типу дозованих рідин.

До недоліків вказаних витратомірів та методу дозування на їх основі можна віднести:

- високу вартість реалізації;
- невисоку точність дозування та відтворюваність результатів; хоча витратоміри Коріоліса мають високу точність ($\pm 0,05\%$) та повторюваність ($\pm 0,02\%$) результатів вимірювання, проте в даному випадку слід розглядати систему керування в цілому, у якій точність дозування буде залежати від технічних характеристик вузлів системи керування, а саме їх швидкодії та надійності.

Вагове дозування - один з найточніших і найпопулярніших на даний час методів дозування. Дозування є дуже важливою частиною виробництва, оскільки від точності дозування компонентів часто залежить якість майбутньої продукції. Вручну дозувати матеріали дуже непрактично, тому на виробництвах використовуються спеціальні машини – дозатори. Дозатори надають можливість видачі точно заданої порції тієї чи іншої речовини.

Найбільш поширеним і точним методом дозування інфузійних розчинів є зважування ємностей в процесі дозування і фіксація ваги розчину після завершення дозування. На цьому методі побудовано ряд технологічних ліній і одна з них WDM 8002. Ця технологічна лінія має добре розроблену механічну частину і її часто модернізують з метою удосконалення системи керування. В технологічних лініях з ваговим дозуванням найчастіше застосовують розміщення дозуючих станцій на прямій лінії. В ці лінійки дозування періодично шнековим або боковим стрічковим транспортером переміщують флакони в кількості, яка відповідає числу станцій дозування. Для технологічної лінії WDM 8002 кількість станцій дозування рівна восьми. Спрощена принципова схема цієї технологічної лінії зображена на рис. 1.

В технологічній лінії, що побудована за такою схемою, стрічковий транспортер 3 подає флакони 2 в зону дозування, де шнековий транспортер з шнеків 6 і 7 рівномірно розподіляє флакони 2 по вагових комірках з платформами 1. Змінні шнеки 6 і 7 мають канавки під кожен розмір флаконів, який залежить від значення ваги інфузійного розчину, котрий в них має дозуватись. Процес наповнення флаконів виконують в такій послідовності. Перед початком процесу дозування шнеки 6 і 7 розводять на боки для того, щоб не торкатись флаконів і не впливати на результат зважування. Потім опускають траверсу з дозуючими голками так, щоб вони ввійшли в верхню частину флаконів, і розпочинають процес дозування. Траверса з дозуючими голками може переміщатися так, щоб голки наблизилися до дна флаконів, а потім поступово по мірі наповнення піднімалися. Таке переміщення траверси з голками застосовують для дозування інфузійних розчинів, які піняться.

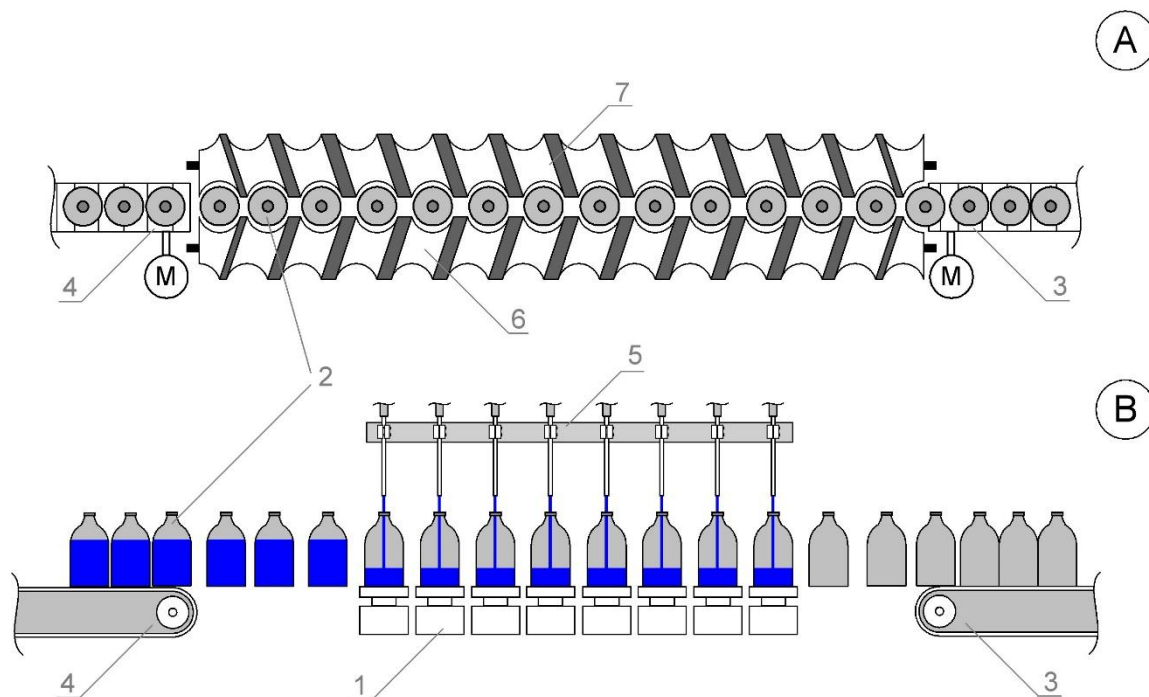


Рисунок 1 – Спрощена принципова схема ділянки дозування інфузійних розчинів технологічної лінії WDM 8002 (А – вигляд зверху, В – вигляд збоку): 1 – вагові комірки з платформами, на які шнековим транспортером подають флакони; 2 – флакони; 3 – стрічковий транспортер для подавання флаконів на ділянку дозування; 4 – стрічковий транспортер для приймання флаконів з ділянки дозування; 5 – траверса з дозуючими голками; 6,7 – шнеки транспортера для переміщення флаконів

Процеси динамічного зважування описані в “Dynamic Load Cell Technology” (METTLER TOLEDO) [4]. Для цього застосовують вагові давачі з магнітоелектричною компенсацією. Такі

давачі менш чутливі до механічних збурень від роботи приводів технологічної лінії та ударного збурення від струменя інфузійної рідини, але їхні великі розміри непомірно збільшують розміри ділянки дозування. Тому їх використовують в лініях, які мають одну лінійку для дозування або в чеквеерах.

За результатами порівняння описаних методів дозування авторами обрано для подальших досліджень ваговий (масовий) метод дозування рідких речовин як найбільш перспективний метод для дозування інфузійних розчинів у флакони.

Метою цієї статті є розроблення експериментальної установки для дослідження процесу дозування інфузійних розчинів та проведення досліджень основних складових технологічної лінії дозування інфузійних розчинів, які будуть застосовані під час модернізації діючої технологічної лінії. Позитивний результат від модернізації можливий при попередньому ґрунтовному дослідженні вузлів технологічної лінії, які модернізують для заміни технічно застарілих. При цьому ставиться за мету досягнення кращих функціональних можливостей та характеристик цих вузлів. Окремими завданнями під час модернізації технологічної лінії для дозування інфузійних розчинів є вибір крокових двигунів та їхніх драйверів для приводу регулюючого органу, вибір більш сучасних та досконаліших тензорезисторних давачів ваги для вагових комірок. На основі результатів експериментальних досліджень ці завдання було вирішено на основі чого виконано модернізацію технологічної лінії типу WDM 8002 для дозування інфузійних розчинів.

Розроблення експериментальної установки для дослідження вузлів технологічної лінії дозування інфузійних розчинів. Для виконання модернізації технологічної лінії для дозування інфузійних розчинів розроблено спеціальну експериментальну установку, на якій можна провести апробацію всіх вибраних для модернізації пристроїв та вузлів, технічних рішень та алгоритмів дозування, обробки інформації та керування процесом. Така установка має повторювати гідравлічну схему технологічної лінії, яку готують до модернізації, а також до неї має входити система керування процесом дозування інфузійних розчинів. Принципова схема розробленої експериментальної установки зображена на рис. 2.

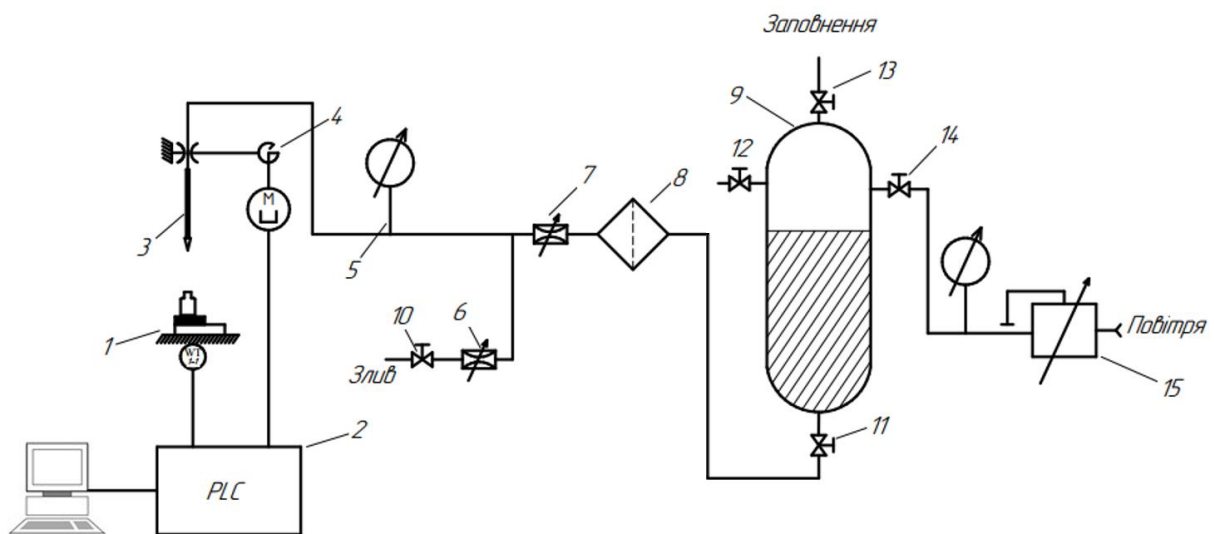


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки для дослідження технологічного процесу дозування інфузійних розчинів: 1 – вагова комірка з платформою, на якій встановлюють флакони; 2 – система керування з комп'ютером для відображення процесу дозування; 3 – голка у вигляді капіляра для подавання розчину в флакон; 4 – перетискний клапан з кроковим двигуном; 5 – манометр для вимірювання тиску інфузійного розчину перед перетискним клапаном; 6, 7 – регулюючі вентилі для імітації збурень по витраті від сусідніх станцій дозування; 8 – фільтр; 9 – ємність з інфузійним розчином; 10, 11, 12, 13, 14 – запірні вентилі; 15 – редуктор з манометром для регулювання тиску повітря в ємності з інфузійним розчином

З наведеної схеми видно, що вона повторює гідравлічну схему технологічної лінії WDM 8002, тобто, подача інфузійного розчину здійснюється шляхом підпору розчину стисненим повітрям з ємності 9. Тиск повітря, яке підпирає розчин в ємності 9 може регулюватись

редуктором 15 в межах 0,5 – 1 бар. З ємності 9 розчин подається до регулюючого органу 4, попередньо проходячи через фільтр 8. Після регулюючого органу 4 розчин через дозуючу голку 3 з капіляра з внутрішнім діаметром 4 мм і довжиною 200 мм струменем виливається в флакон, який встановлений на ваговій комірці 1. Регулюючими вентилями 6 і 7 можна створити збурення в процесі дозування, яке буде імітувати роботу сусідніх станцій дозування.

Така гідравлічна схема технологічної лінії WDM 8002 містить мінімальну кількість елементів і це важливо для забезпечення стерильності процесу, причому кожен з елементів не має застійних зон, що спрощує процес стерилізації лінії. Нижче представлено фотографії складових експериментальної установки.

На рисунку 3 подано фото дозуючого пристрою експериментальної установки для дослідження технологічного процесу дозування інфузійних розчинів. Дозуючий пристрій складається з перетискного регулюючого органу з приводом від крокового двигуна, голки з капілярної трубки для подачі інфузійного розчину в флакон, вагової комірки з платформою, на якій встановлюють флакони. На установці досліджено два типи вагових комірок – оригінальна комірка від технологічної лінії WDM 8002 з наповненням демпферною силіконовою рідиною і модернізована комірка з тензорезисторним давачем ваги типу SP8C3 без застосування демпферної рідини.

На рисунку 4 представлено фото ємності з інфузійним розчином розробленої експериментальної установки. Об'єм ємності 25 л, на рис. 3 видно також інші елементи експериментальної установки: відсічні ventілі на лініях для наповнення ємності, лінія подачі розчину на перетискний регулюючий орган, лінія подачі повітря для підпору розчину, фільтр на виході з ємності, манометр перед регулюючим органом, манометр на лінії підпору.



Рисунок 3 – Загальний вигляд дозуючого пристрою експериментальної установки для дослідження технологічного процесу дозування інфузійних розчинів

Перед початком досліджень ємність 9 заповнюють інфузійним розчином при відкритих ventілях 12 і 13 та закритих ventілях 11 і 14. Після заповнення ventілі 12 і 13 закривають, а ventілі 11 і 14 відкривають. В верхню частину ємності 9 поступає повітря із заданим надлишковим тиском, значення якого встановлюють редуктором 15. Потім на платформу 1 встановлюють флакон і вводять команду в систему керування на виконання циклу дозування. Система керування виконує операцію тарування з встановленим флаконом. Далі система керування формує керуючі імпульси та подає їх до драйвера крокового двигуна. Кроковий двигун починає обертати ексцентрик від початкового положення, яке визначається окремим давачем, до певного відкриття перетискного регулюючого органу. Ступінь відкриття регулюючого органу залежить від стадії дозування. При останній стадії дозування витрату інфузійного розчину плавно зменшують за допомогою зміни ступеня відкриття регулюючого органу і припиняють подавання розчину при наближенні значення ваги розчину в флаконі до заданого. Після завершення циклу дозування система керування архівує результат дозування і може розраховувати значення середньоквадратичного відхилення значень десяти останніх

послідовних дозувань. На основі одержаного числового результату можна зробити висновок про придатність вибраних крокових двигунів, їхніх драйверів, вибраних тензорезисторних давачів для модернізації технологічної лінії дозування інфузійних розчинів.

На розробленій експериментальній установці були проведені такі дослідження:

- 1) дослідження роботи перетискного клапана з вибраним для модернізації кроковим двигуном та його драйвером;
- 2) дослідження оригінальної та модернізованої вагових комірок в статичному режимі зважування, визначення середньоквадратичного відхилення результатів зважування в статичному режимі;
- 3) виконання низки послідовних дозувань, визначення середньоквадратичного відхилення результатів дозування з метою оцінки придатності вибраного нового тензорезисторного давача для модернізації вагових комірок;
- 4) імітація збурень по тиску та витраті від сусідніх станцій дозування для оцінки швидкодії вибраних крокових двигунів в умовах неперервної корекції процесу дозування внаслідок збурень.



Рисунок 4 – Загальний вигляд ємності з інфузійним розчином експериментальної установки для дослідження технологічного процесу дозування інфузійних розчинів (в склад входять: відсічні вентиля на лінії для наповнення ємності, лінії подачі на розчин на перетискний регулюючий орган, лінії подачі повітря для підпору розчину, фільтр на виході з ємності, манометр перед регулюючим органом, манометр на лінії підпору)

Дослідження приводу перетискного регулюючого органу для регулювання витрати інфузійного розчину. Під час модернізації технологічних ліній доводиться досить часто виконувати заміну приводів у зв'язку з тим, що деякі лінійки приводів виробники підтримують протягом досить короткого часу. Це особливо стосується серводвигунів та крокових двигунів. Електронні блоки керування цими двигунами дуже часто оновлюють у зв'язку з появою більш сучасної елементної бази. Ці блоки в більшості випадків не взаємозамінні, не можуть працювати з двигунами інших виробників і це особливо стосується серводвигунів. Більшу взаємозамінність мають крокові двигуни і електронні блоки керування ними, оскільки їх драйвери не прив'язані до одного типу двигуна. В діючій технологічній лінії на ділянці дозування застосовано вісім крокових двигунів для керування перетискними регулюючими органами і один для опускання/піднімання траверси з дозуючими голками. На час модернізації технологічної лінії застосовані двигуни вже не підтримуються виробником тому виникла потреба їх заміни із збереженням основних технічних характеристик. Авторами виконано підбір нових крокових двигунів та драйверів для керування ними за наступними параметрами:

- сумісність конструктивних розмірів для кріплення корпусу двигуна та діаметра і довжини вихідного валу;

- кількість кроків керування на один оберт вихідного валу;
- забезпечення потрібного моменту на вихідному валу двигуна;
- достатня швидкодія двигуна в комплекті з драйвером.

Останній параметр залежить від електричних характеристик крокового двигуна. Для максимальної швидкодії потрібно вибирати двигун з більшим керуючим струмом через навитки і з меншою індуктивністю навиток. Що стосується драйверів до крокових двигунів, то більшість сучасних моделей побудовані з застосуванням мікропроцесорів в електронній схемі. Це розширює їхні функціональні можливості, але зменшує швидкодію.

З врахуванням вищевикладеного для приводів перетискних регулюючих органів технологічної лінії WDM 8002 вибрано крокові двигуни типу EMMS-ST-57-MSE-G2 Festo і драйвери для керування ними типу 2DM860H Microstep Driver. Вони мають такі параметри:

- EMMS-ST-57-MSE-G2 Festo: номінальна напруга живлення - 48 VDC, номінальний струм споживання - 5 A, максимальна кількість обертів - 1940, момент утримання - 1,4 Nm, кут кроку - $1,8^\circ \pm 5\%$ [5];

- 2DM860H Microstep Driver: напруга живлення - AC 30-80V / DC 40-110V, нормальний вихідний струм - 2,1-8,4, струм логічного входу - 10 mA, частота імпульсної характеристики - макс. 250 кГц, час низького рівня пульсу - мін. 2,5 с [6].

Для забезпечення потрібного моменту при високій швидкодії застосовано живлення драйверів напругою 48 В, для чого застосовано два імпульсні блоки живлення типу TRIO-PS-2G/1AC/48DC/10 Phoenix Contact.

На рисунку 5 подано графік залежності ступеня відкриття регулюючого органу від ваги флакону під час його наповнення на установці. Експеримент виконано за таких умов: тиск інфузійного розчину перед регулюючим органом – 100 кПа (1 бар), діаметр внутрішнього отвору капіляра дозуючої голки - 4 мм, довжина – 200 мм. Як видно з графіка, підібрані кроковий двигун та драйвер забезпечують вимоги щодо швидкості та точності позиціонування регулюючого органу і таким чином забезпечують точне досягнення заданої ваги під час наповнення флакону.

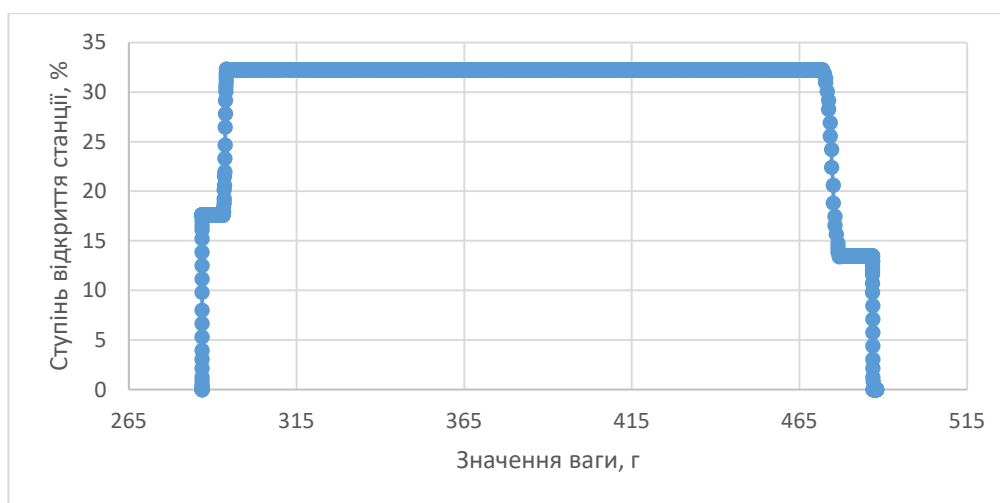


Рисунок 5 – Графік залежності ступеня відкриття регулюючого органу від ваги флакону під час його наповнення на установці

Під час дослідження модернізованого перетискного регулюючого органу визначено також час його повного відкриття, який склав менше однієї секунди. Проведено декілька серій експериментальних досліджень на розробленій установці, які в сукупності з результатами досліджень технологічної лінії підтвердили придатність вибраних крокових двигунів, драйверів для керування ними та блоків живлення драйверів для модернізації технологічної лінії WDM 8002.

Дослідження тензорезисторних давачів ваги для вагових комірок технологічної лінії дозування інфузійних розчинів. В діючій технологічній лінії для дозування інфузійних розчинів застосовані тензорезисторні давачі ваги з діапазоном вимірювання 0 – 2 кг. Це дрібносерійний виріб, технологія виготовлення якого поступається сучасним. Особливістю цих давачів є низька механічна резонансна частота, що робить їх дуже чутливими до ударів

струменя розчину на початку процесу дозування і механічних збурень від механізмів технологічної лінії. Для зменшення впливу перерахованих збурень тензорезисторний давач ваги поміщений в спеціальну вагову комірку, яка являє собою ванну, виготовлену з суцільного куска алюмінієвого сплаву. Ця ванна заповнена в'язкою силіконовою рідиною, яка демпферує механічні коливання тензорезисторного давача. Але таке технічне рішення збільшує час встановлення показів ваги з заданою точністю, що погіршує точність дозування та збільшує час процесу дозування. Ці недоліки були виявлені під час виробничих випробувань лінії і було прийняте рішення модернізувати вагові комірки шляхом застосування в них однієї з останніх розробок фірми НВМ – тензорезисторного давача ваги типу SP8C3. Авторами проаналізовано можливість застосування і інших типів давачів ваги, зокрема з магнітоелектричною компенсацією [4], які широко застосовують для динамічного зважування поряд з тензорезисторними давачами, але конструктивні розміри вагової комірки не дозволяють застосовувати такі давачі через їхні більші розміри. Зовнішній вигляд оригінального та пропонуваного тензорезисторного давача зображено на рисунку 6.

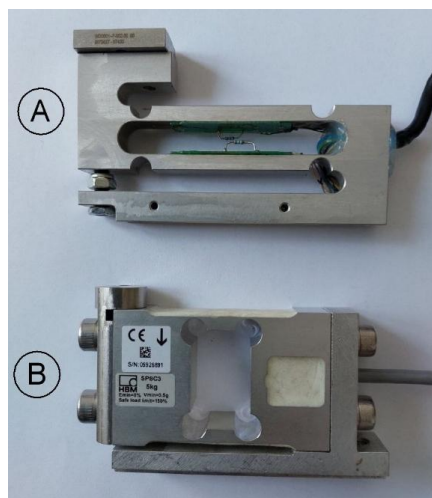


Рисунок 6 – Зовнішній вигляд тензорезисторних давачів ваги:
А – оригінальний давач технологічної лінії, В – пропонуванний давач

Авторами виконано дослідження удосконаленої вагової комірки з пропонуванним давачем ваги SP8C3. В першу чергу виконано зважування зразків ваги в статичному режимі, результати яких представлено у таблиці 1. Визначено, що середньоквадратичне відхилення для вагової комірки за результатами зважування у статичному режимі становить: для ваги 500 г - 0,126 %, для ваги 1000 г - 0,113 %.

Також було виконано дослідження удосконаленої вагової комірки під час динамічного процесу дозування розчину у флакон. Результати вимірювання ваги флакону за допомогою удосконаленої вагової комірки представлено у таблиці 2. Задане значення ваги розчину для дозування – 201 грам. Обчислене за результатами 10-ти експериментів значення відносного середньоквадратичного відхилення вимірюваного значення ваги розчину становить 0,537 %.

Таблиця 1 – Результати зважування в статичному режимі

Номер вимірювання	Результат вимірювання для зразка вагою, г	
	500,0 г	1000,0 г
1	500,2	1000,0
2	500,1	1000,0
3	500,4	1000,2
4	500,0	1000,1
5	500,1	1000,2
6	500,1	1000,1
7	500,0	1000,1
8	500,3	1000,3
9	500,1	1000,0
10	500,0	1000,0

Таблиця 2 – Результати зважування флакона в серії послідовних дозувань

Номер дозування	Виміряне значення ваги, г
1	201,3
2	202,7
3	202,5
4	201,5
5	201,3
6	201,9
7	201,6
8	202,2
9	201,7
10	202,8

Після отримання позитивних результатів дослідження вагової комірки на експериментальній установці було замінено одну вагову комірку в діючій технологічній лінії, та удосконалено систему керування для обчислення та відображення середньоквадратичного відхилення результатів останніх десяти дозувань. Під час роботи технологічної лінії встановлено, що застосування удосконаленої вагової комірки з новим давачем без заповнення силіконовою рідиною забезпечує значення середньоквадратичного відхилення результатів дозування близьке до значення, отриманого на експериментальній установці (близько 0,54 %). Після отримання такого результату поступово замінено всі вагові комірки технологічної лінії.

Висновки. У роботі обґрунтовано, що для проведення робіт з реконструкції ехнологічних ліній для дозування інфузійних розчинів та подібних за функціональними ознаками технологічних ліній доцільно розробити та застосувати експериментальну установку для дослідження приводів перетискних регулюючих органів, вагових комірок для вимірювання ваги посудин під час їх наповнення. Результати розроблення такої установки представлено у цій роботі.

Авторами удосконалено привод перетискного регулюючого органу та виконано його дослідження на розробленій установці. За результатами досліджень підтверджено, що виконані удосконалення дали можливість зменшити час повного відкриття регулюючого органу до значення меншого 1,0 секунди. Таким чином підтверджено придатність удосконаленого регулюючого органу для модернізації технологічної лінії WDM 8002.

Також виконано дослідження удосконаленої вагової комірки з пропонуваним давачем ваги SP8C3. Визначено, що середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання цією коміркою ваги у статичному режимі не перевищує 0,13 %, у динамічному режимі під час наповнення флаконів – не перевищує 0,54 %.

Застосування розробленої установки дає можливість обрати оптимальні технічні засоби за співвідношенням ціна – якість та ефективно з короткою зупинкою виробництва провести модернізацію технологічної лінії типу WDM 8002 для дозування інфузійних розчинів.

Інформаційні джерела

1. Стандарт МОЗ України СТ-Н МОЗУ 42-3.4-2004 «Виробництво лікарських засобів»
2. Промислова технологія лікарських засобів: базовий підручник для студ. вищ. навч. фармац. закладу (фармац. ф-тів) / Є.В. Гладух, О.А. Рубан, І.В. Сайко [та ін.]; за ред. Є.В. Гладуха, В.І. Чуєшова. – Вид. 2-ге, випр.. та допов. Х. : НФаУ : Новий Світ-2000, 2018. 486 с. : іл. (Серія «Національний підручник»).
3. Технологія Коріолісового витратоміра. Smart Measurement. URL: <https://www.smartmeasurement.com/uk/coriolis-flow-meter-technology> (дата звернення: 04.12.2023)
4. Dynamic Load Cell Technology. Professionelle Waagen für Gewerbe & Industrie | METTLER TOLEDO. URL: <https://www.mt.com/us/en/home/library/white-papers/product-inspection/dynamic-load-cell.html> (дата звернення : 06.12.2023).
5. Stepper motors EMMS-ST URL: <https://www.festo.com/media/pim/255/D15000100122255.PDF> (дата звернення : 07.12.2023).
6. 2DM860 Digital Stepper Drive Manual, URL: https://unitech.com.ua/image/catalog/catalogs/Katalog_drajvera_shagovogo_dvigatelya_czifrovoj_JMC_2DM860H.pdf (дата звернення : 08.12.2023).

Kril B., Matiko F., Shaleva V., Bugaichuk M.
Lviv Polytechnic National University

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CONTROL VALVES AND WEIGHING CELLS
FOR TECHNOLOGICAL PROCESS OF INFUSION SOLUTIONS DOSING**

The expediency of developing and using an experimental setup for investigating drives of control pinch valves and weighing cells during the reconstruction of technological lines for dosing infusion solutions was proved. The results of the development of experimental setup are presented. The results of the improvement of the drive of the pinch valve are also presented, and its investigation was carried out on the developed setup. According to the research results, it was confirmed that the improvements the valve made it possible to reduce the time of full opening of the valve to a value less than 1.0 seconds. In this way, the suitability of the improved pinch valves for the modernization of the WDM 8002 technological line was confirmed. The investigation of the improved weighing cell with the proposed SP8C3 weight transmitter was carried out. It was determined that the root mean square deviation of the measurement results with this weight cell in the static mode does not exceed 0.13%, in the dynamic mode during the filling of bottles - does not exceed 0.54%. The use of the developed setup makes it possible to choose the optimal technical means according to the price-quality ratio and effectively modernize the technological lines of dosing infusion solutions in the production of medicines with a short stopping the production.

Key words: dosing of infusion solutions, weighing cell, control pinch valve, stepper motor, experimental setup

УДК 621.38

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-07

Лапшуда В.А., Коваль В.М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРІВ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ

У роботі проведено моделювання впливу конструктивних параметрів (конфігурації електродів та товщини наноцелюлози) на параметри резистивних та ємнісних сенсорів відносної вологості, в яких наноцелюлоза використовується як підкладка та вологочутливий шар одночасно. Визначено, що оптимальна товщина плівки наноцелюлози для обох типів сенсорів складає 50 мкм. Для резистивних сенсорів використано електроди у конфігурації зустрічно-штирьової ґратки (ЗШГ). Встановлено, що оптимальною відстанню між електродами є 0,4 мм, оскільки така відстань дозволяє отримати сенсор, номінальний опір якого помітно менший у порівнянні з 0,7 мм (1 МОм). Для ємнісних сенсорів було використано конфігурацію електродів у вигляді розгорнутого конденсатора. Встановлено, що оптимальною відстанню між електродами є 0,1 мм, оскільки вона забезпечує кращий відгук (близько 7 пФ), а отже і чутливість.

Ключові слова: наноцелюлоза, гнучкі сенсори, сенсори вологості, моделювання.

Постановка проблеми. У сучасному людському житті сенсори відносної вологості повітря відіграють важливу роль і використовуються у великій кількості різноманітних приладів та систем. Серед них можна виділити наступні області використання сенсорів вологості: сільське господарство, у якому сенсори відносної вологості повітря використовують у теплицях та гідропонних установках для утримання найсприятливіших умов для певних рослин; харчова промисловість, де варто контролювати вологість при певних технологічних процесах, а також при зберіганні товарів; системи розумного дому та клімат-контролю, для створення комфортних умов проживання у кімнаті; медицина, для контролю умов у палатах та інкубаторах; автомобільна промисловість, для вимірювання стану оточуючого середовища всередині та назовні автомобіля [1]–[11]. Останнім часом намітився перехід від твердотільних сенсорів вологості до їх гнучких аналогів. Потреба в гнучких сенсорах вологості виникає в біомедичних застосуваннях, де сенсори використовуються для моніторингу дихання спортсменів під час тренувань або пацієнтів під час лікування/реабілітації [12]–[14]. Дані отримані із сенсорів можуть бути використані для діагностики хвороб, які викликають розлади дихання, до яких відносяться: астма, ожиріння, апное сну, пневмонія, хронічна обструктивна легенева хвороба, коронавірусна хвороба (COVID-19), тощо. Також такі сенсори можливо використовувати для моніторингу рівня зволоженості шкіри людини та для детектування спітніння [1]–[4].

Зазвичай, у якості підкладок для гнучких сенсорів вологості використовують штучні полімери [15]–[20], однак такі прилади потребують утилізації після закінчення терміни їх служби. Тому на сьогодні ведуться роботи по розробці біорозкладних гнучких полімерів, серед яких вирізняється наноцелюлоза (НЦ). На сьогодні існує два підходи у створенні таких сенсорів: drop casting approach, коли вологочутливий шар НЦ наноситься поверх електродної системи, нанесеної на синтетичну підкладку (зазвичай із PI, PET, PE, тощо [15]–[20]) та self-standing approach [3], [6], [12], [21], [22], коли механічна підкладка із НЦ або її композиту використовується як механічний шар та вологочутливий шар одночасно. В межах останнього підходу можна отримати повністю біорозкладний сенсор, для створення якого достатньо на поверхню плівки НЦ нанести електроди. На сьогоднішній день існує деяка кількість експериментальних даних щодо сенсорів вологості на основі НЦ, виготовлених в рамках підходу self-standing approach. Однак залишається невирішеним питання впливу конструктивних параметрів (конфігурації електродів та товщини наноцелюлози) сенсорів вологості на основі наноцелюлози на їх робочі характеристики.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є визначити вплив конструктивних параметрів сенсорів вологості на основі наноцелюлози (конфігурація та розміри електродів, а також товщина вологочутливої плівки) на їх робочі параметри. Для

досягнення поставленої мети потрібно було: побудувати 3D модель для конфігурацій ЗШГ та розгорнутого конденсатора; за допомогою COMSOL Multiphysics 6 виконати моделювання опору сенсорів на основі ЗШГ в залежності від конструктивних параметрів та зміни питомої провідності наноцелюлози; провести моделювання ємності сенсорів на основі розгорнутого конденсатора в залежності від зміни конструктивних параметрів та відносної діелектричної проникності наноцелюлози; встановити оптимальні величини конструктивних параметрів сенсорів вологості.

Для проведення моделювання були побудовані 3D моделі електродів, нанесених на поверхню діелектричної плівки у реальних розмірах. Фізичні розміри електродів у конфігурації ЗШГ наступні: ширина електродної системи - 8 мм, довжина електродної системи - 10 мм, ширина електрода - 0,5 мм, відстані між електродами змінювалися від 0,4 мм до 0,7 мм з кроком 0,1 мм. Тобто було створено 4 конфігурації електродів з шириною металізації 0,5 мм і відстанями між електродами 0,4 мм, 0,5 мм, 0,6 мм і 0,7 мм, які зображені на рис. 1, а. Відстань, на якій електроди перекривають один на одного, становить 6 мм. Для конфігурації розгорнутого конденсатора фізичні розміри електродної системи такі: ширина електродної системи - 8 мм, довжина електродної системи - 10 мм, ширина кожного електрода - 4 мм. Відстань між електродами змінювалася від 0,1 до 0,3 мм з кроком 0,1 мм, як показано на рис.1, б.

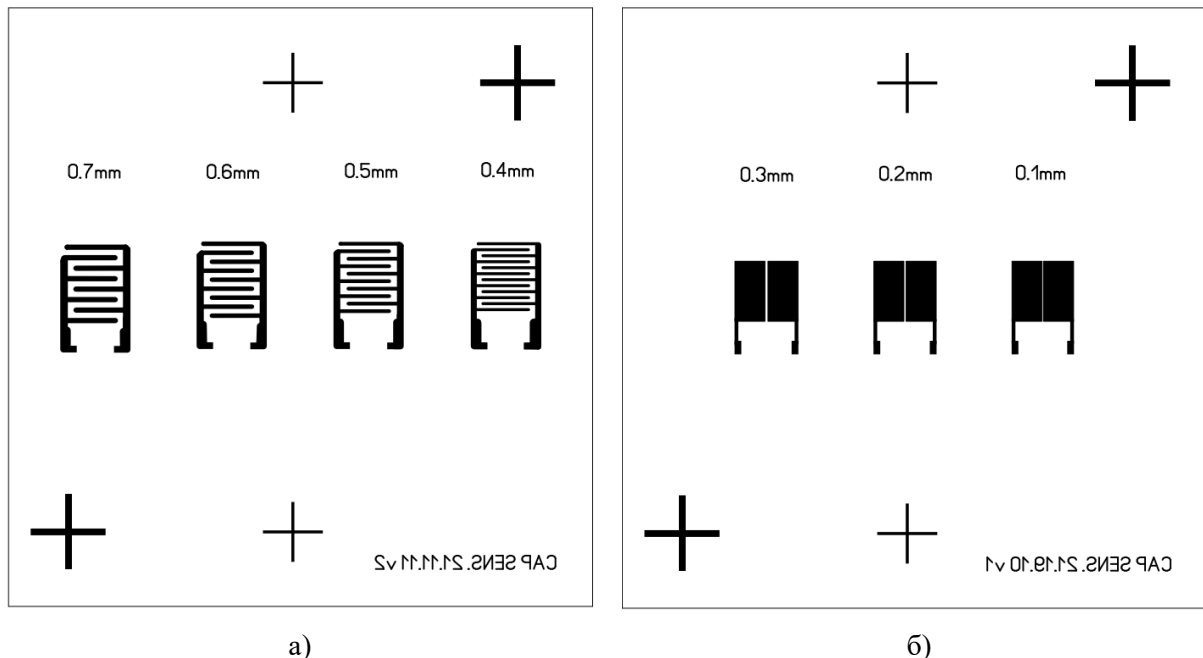


Рисунок 1 – Зображення фотошаблонів тінювих масок для нанесення електродів з конфігураціями ЗШГ (а) та розгорнутий конденсатор (б)

Моделювання впливу конструктивних параметрів ЗШГ та вологочутливої плівки на параметри сенсорів вологості. В даній роботі досліджувався вплив на опір сенсора відстані між електродами, товщини та питомої провідності вологочутливої плівки, яка одночасно слугує підкладкою та вологочутливим шаром. У якості вхідних параметрів для проведення моделювання були використані довідникові відомості про електричну провідність електродів (Ni), інформацію про електропровідність наноцелюлози взято зі статті [23], де стверджується, що провідність абсолютно сухої нанокристалічної целюлози складає $2 \cdot 10^{-7} \text{ См/м}$, а у [24], [25] стверджується, що на проміжку вологості повітря від 11 до 98% відгук резистивних сенсорів на основі НЦ може становити 1000 – 10000. Тому для проведення моделювання візьмемо провідність наноцелюлози на проміжку від $2 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$ до $2 \cdot 10^{-7} \text{ См/м}$. Щодо впливу товщини вологочутливої плівки, то обрано товщини від 10 до 100 мкм з кроком у 10 мкм. Напруга на електродах була обрана 2 В.

На рисунку 2 та 3 показано результати моделювання. Зокрема, на рисунку 2,а та 2,в показано розподіл потенціалу електричного поля для ЗШГ з відстанями між електродами 0,7 і

0,4 мм відповідно. Чітко видно, що потенціал електричного поля поступово змінюється між електродами від напруги 2 В, яка прикладена до електрода ліворуч, до 0 В – потенціалу електрода праворуч. На рисунку 2,б та 2,г показано розподіл напруженості електричного поля між електродами ЗШГ. Так, видно, що електричне поле в основному зосереджено в області у якій електроди перекриваються. Крім того, видно, що напруженість поля між електродами для ЗШГ з міжелектродною відстанню 0,4 мм більша, ніж для ЗШГ з відстанню 0,7 мм. Даний результат узгоджується з виразом для напруженості електричного поля, оскільки напруга, прикладена до обох електродів, однакова, а відстань між ними зменшилася. Також видно, що на кінчиках штирів для обох ґраток спостерігається концентрація напруженості поля. Однак для ґратки з меншою міжелектродною відстанню напруженість поля на кінчиках є меншою.

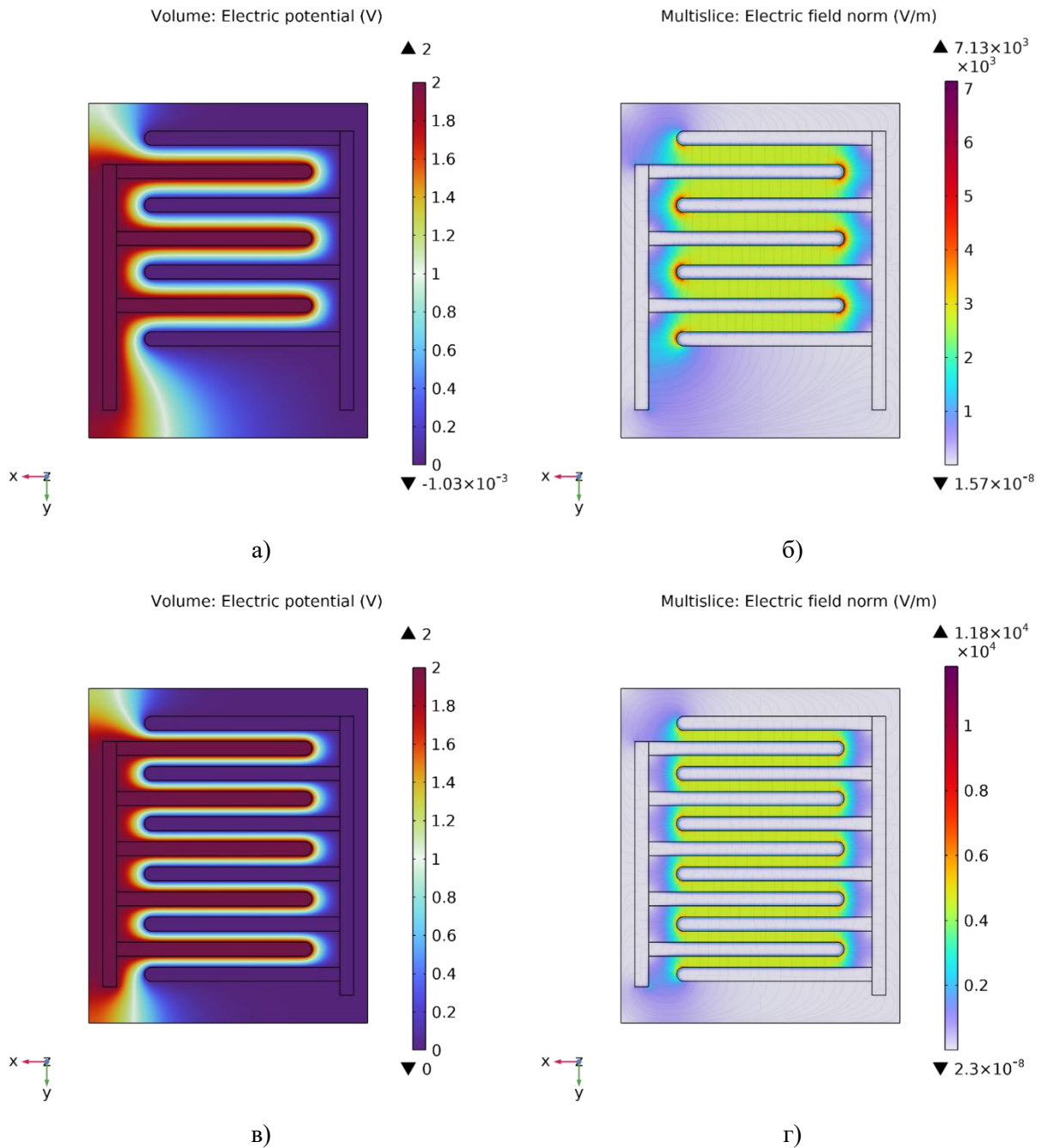


Рисунок 2 – Розподіл потенціалу електричного поля у резистивному сенсорі вологості, виготовленому на основі ЗШГ з відстанню між електродами 0,7 мм (а) та 0,4 мм (в) та розподіл напруженості електричного поля між електродами ЗШГ з відстанню між електродами 0,7 (б) та 0,4 мм (г)

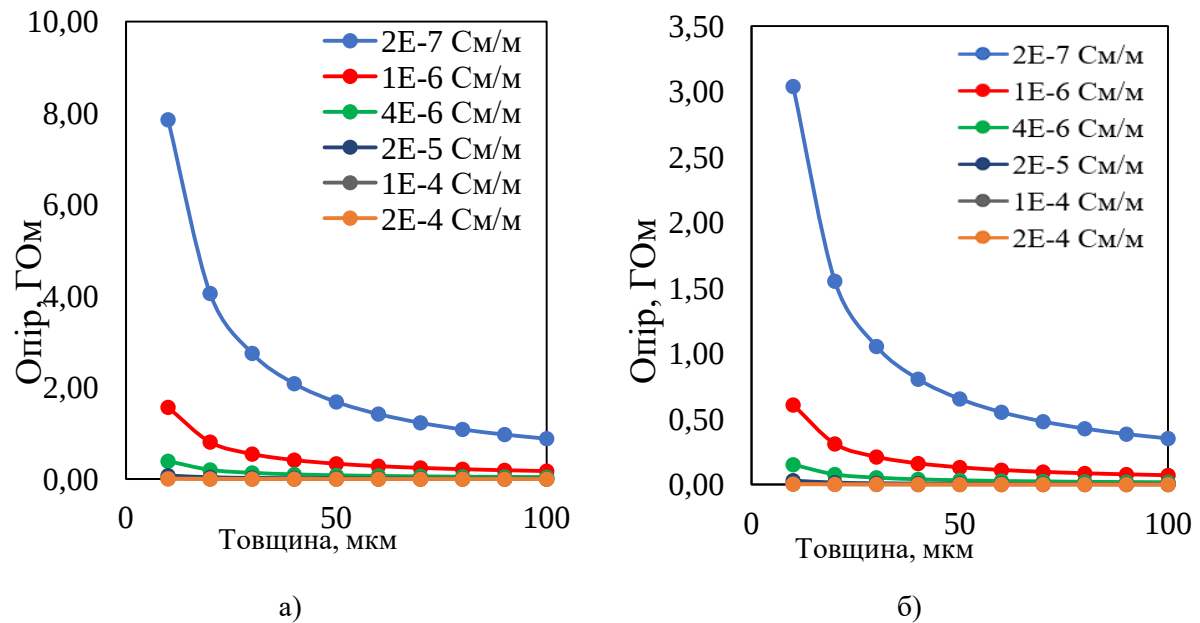


Рисунок 3 – Залежність опору резистивних сенсорів вологості від товщини вологочутливої плівки НЦ за різної її питомої провідності для ЗШГ з відстанню між електродами 0,7 мм (а) та 0,4 мм (б)

На рисунку 3 показано залежність опору сенсорів від товщини вологочутливої плівки (підкладки) НЦ, яка має нелінійний характер, а саме: опір сенсора дуже сильно падає зі зростанням товщини плівки. Якщо порівняти значення опору, наведені на рисунку 3,а для ЗШГ з міжелектродною відстанню 0,7 мм і на рисунку 3,б для ЗШГ з міжелектродною відстанню 0,4 мм, то видно, що зі зменшенням відстані між електродами, опір сенсорів помітно зменшується. Це пов'язано з тим, що при незмінній питомій провідності матеріалу, відстань, яку повинні пройти носії заряду, зменшилася. До того ж, збільшення кількості штирів на ЗШГ призводить до збільшення площі поперечного перерізу звичайного резистора, утвореного цими електродами. Однак, оскільки ці електроди сконструйовані так, що, незалежно від відстані між ними, вони покривають приблизно однакову площу, виникає наступна проблема. У міру наближення електродів збільшується відсоток поверхні, вкритої металом, який, в свою чергу, не пропускає вологу. Таким чином, ЗШГ з меншою відстанню між електродами більше сповільнюватиме процеси адсорбції води, тобто погіршить швидкодію сенсорів.

Також з рисунку 4 видно, що зі зменшенням товщини вологочутливої плівки густина струму в плівці зростає, що може призвести до збільшення виділення джоулевого тепла, що, у свою чергу, призведе до нагрівання плівки. Однак, оскільки опір плівок дуже високий, цей ефект не матиме жодного впливу на плівку через його малі величини. Отже, на основі отриманих результатів можна сказати, що оптимальною відстанню між електродами є 0,4 мм, оскільки такі електроди забезпечують менший номінальний опір сенсорів. З точки зору товщини вологочутливої плівки кращою є товщина в 50 μm , оскільки з подальшим ростом товщини опір спадає не так сильно, але погіршуватиметься швидкодія.

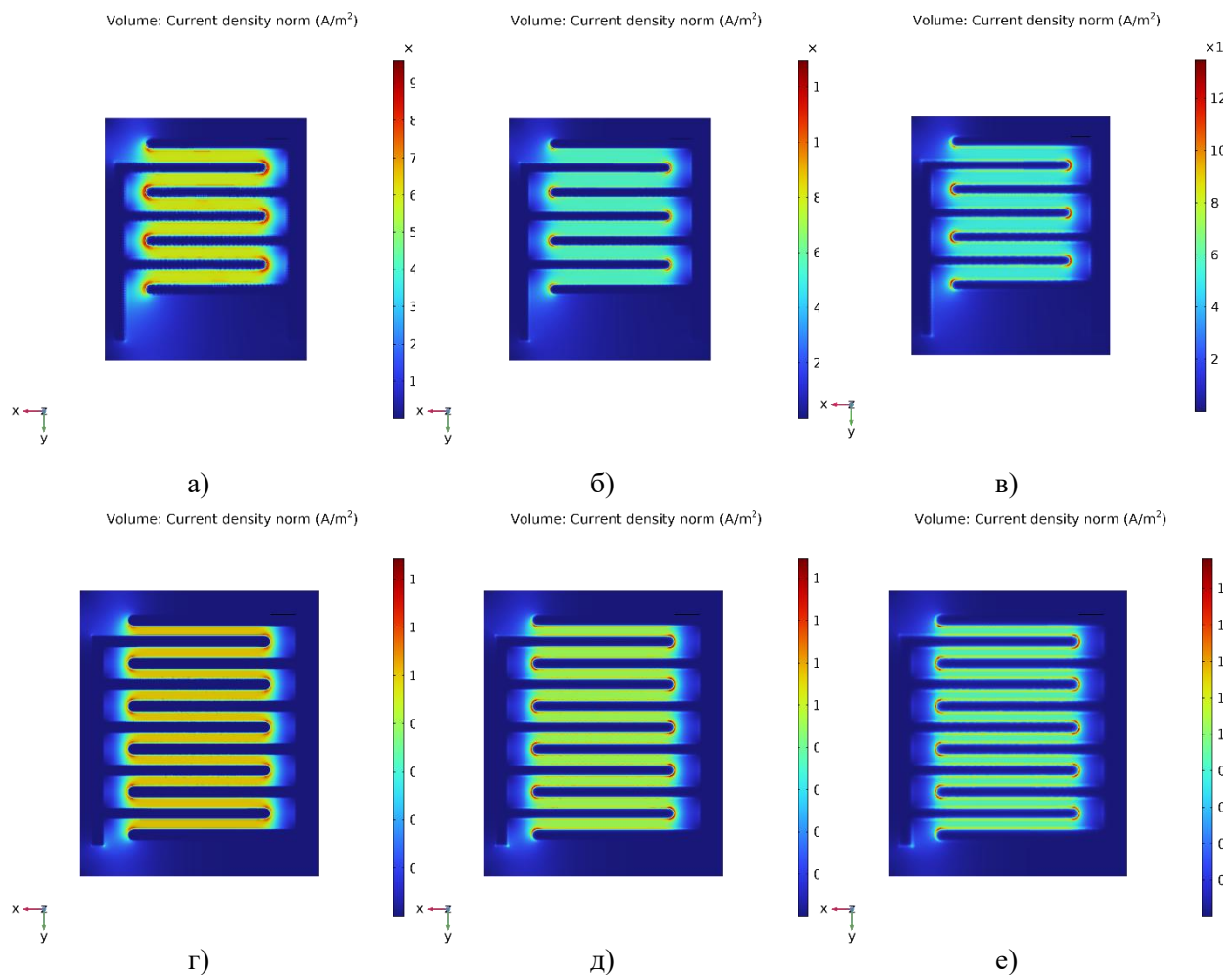


Рисунок 4 – Густина струму у вологочутливій плівці, на яку нанесено ЗШГ з відстанню між електродами 0,7 мм для товщин плівок 10 мкм (а), 50 мкм (б) та 100 мкм (в) та для ЗШГ з відстанню між електродами 0,4 мм для товщин плівок 10 мкм (г), 50 мкм (д) та 100 мкм (е)

Якщо порівняти результати моделювання із експериментальними даними, то побачимо, що порядок величин, отриманий в результаті розрахунків співпадає з результатом експерименту, що наведений в роботах [6], [22].

Моделювання параметрів ємнісних сенсорів вологості на основі електродів з конфігурацією розгорнутий конденсатор. Побудовано 3D модель сенсора на основі електродів з конфігурацією розгорнутого конденсатора. Така конфігурація електродів забезпечує значно меншу активну складову опору в порівнянні з конфігурацією ЗШГ.

Вихідні параметри для моделювання наступні: відносна діелектрична проникність наноцелюлози від 3 до 80, товщина плівки НЦ від 10 до 100 мкм, відстань між електродами від 100 до 300 мкм. У цьому випадку моделювалася лише ємність отриманого конденсатора без урахування впливу провідності на параметри сенсора. Так, на рисунку 5 та 6 показано розподіл потенціалу електричного поля, а також розподіл напруженості електричного поля в об'ємі сенсора. Так, із рисунку 5,б видно, що електричне поле зосереджене лише між електродами сенсора.

На рисунку 6,б показано розріз датчика, перпендикулярний проміжку між електродами, з якого видно, що електричне поле в основному зосереджено між електродами і проникає на певну глибину в підкладку, на якій знаходяться електроди. Отже, зміна діелектричної проникності підкладки вплине на ємність такого конденсатора. Метою цієї моделі є визначення оптимальної товщини діелектричної вологочутливої плівки НЦ та відстані між електродами сенсора. Таким чином, було отримано залежність ємності такого конденсатора від товщини діелектричної плівки та від її діелектричної проникності. Діелектрична проникність була обрана в діапазоні від 3 (еталонне значення діелектричної проникності для сухої НЦ) до 80 (діелектрична проникність води при кімнатній температурі, як значення, вище якого діелектрична проникність плівки бути не може).

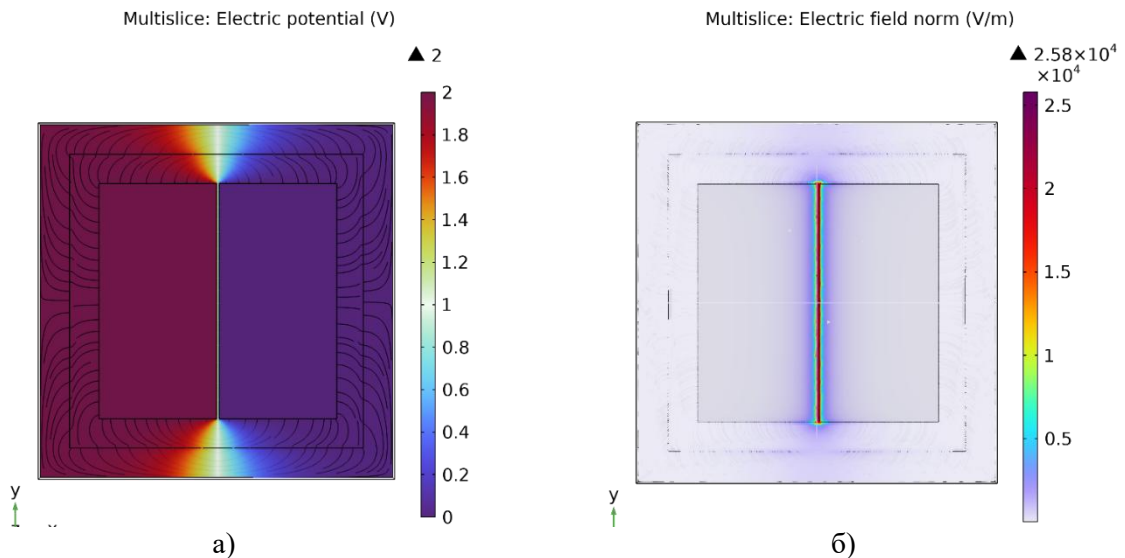


Рисунок 5 – Результати моделювання параметрів ємнісного сенсора вологості: розподіл електричного потенціалу по поверхні сенсора (а) та розподіл напруженості поля по поверхні сенсора (б)

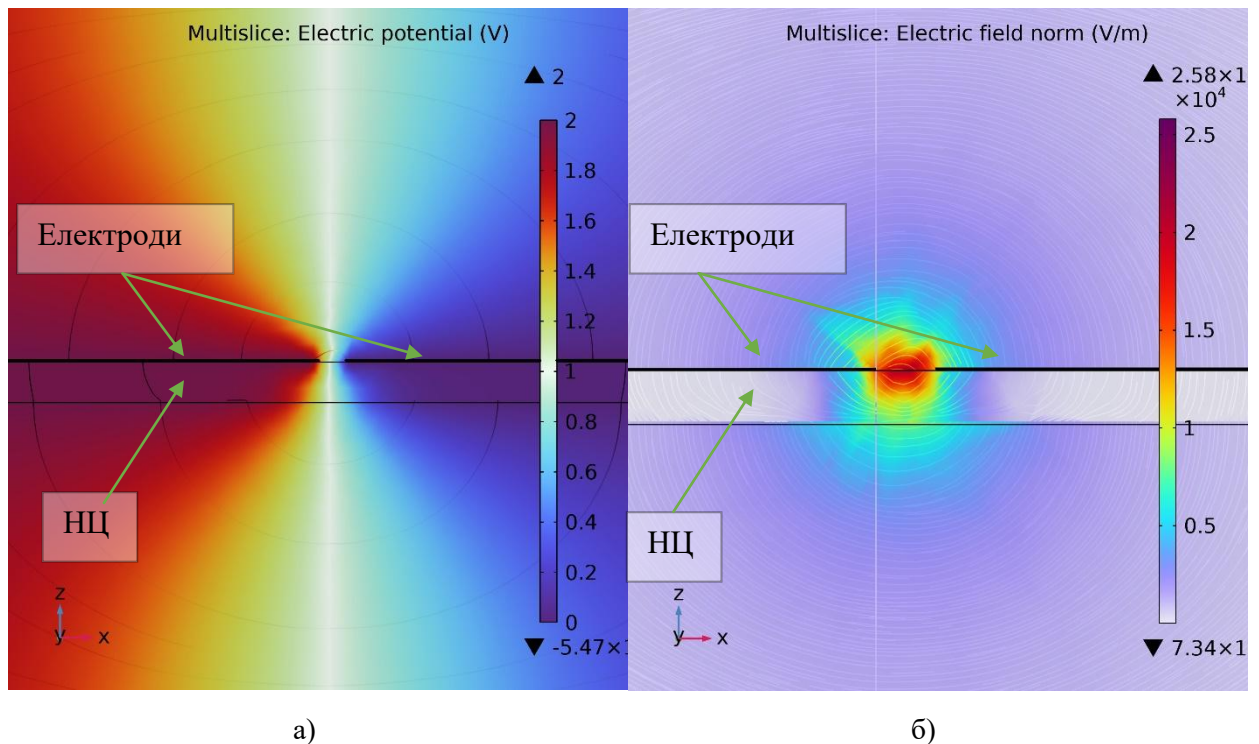


Рисунок 6 – Результати моделювання параметрів ємнісного сенсора вологості: розподіл електричного потенціалу у об'ємі сенсора (а) та розподіл напруженості поля у об'ємі сенсора (б)

В результаті проведення моделювання була отримана площина, зображена на рис.7, яка показує залежність ємності сенсора від товщини діелектричної підкладки та від її діелектричної проникності для двох відстаней між електродами.

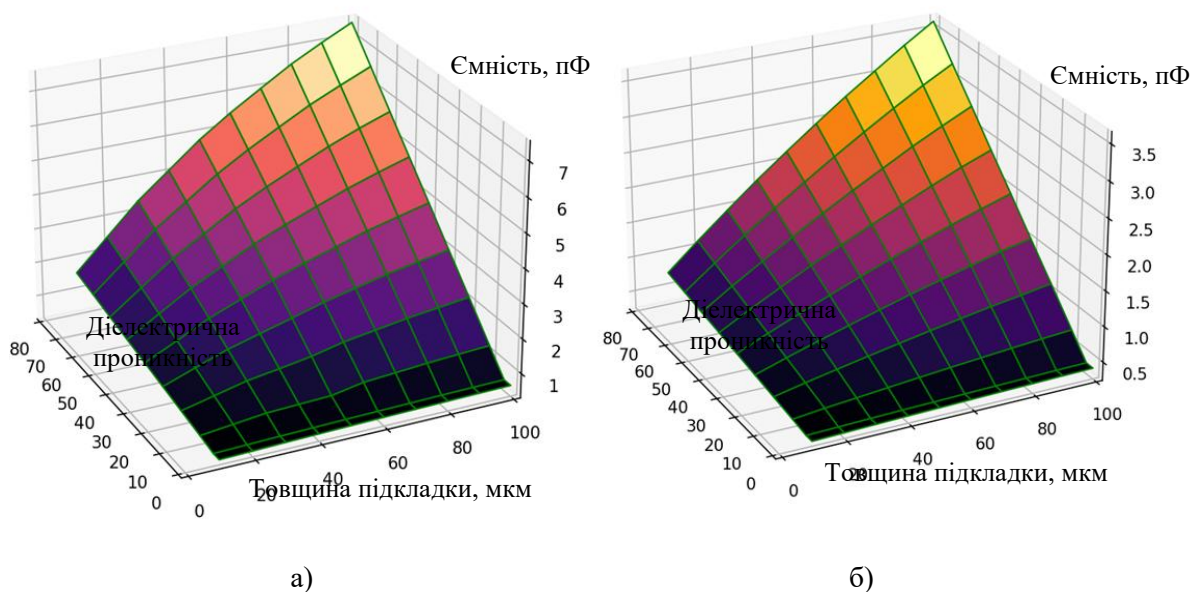


Рисунок 7 – Площина, яка представляє залежність ємності сенсора вологості від товщини діелектричної підкладки та її діелектричної проникності для зразка з відстанню між електродами 0,1 мм (а) та 0,3 мм (б)

Отже, для створення ємнісних сенсорів рекомендовано використовувати електроди у конфігурації розгорнутий конденсатор з мінімальною відстанню між електродами 0,1 мм та товщиною плівки НЦ 50 мкм, що забезпечує більше значення сигналу сенсора. Якщо ж порівняти з експериментальними даними у [3], то побачимо, що на частотах виміру 200–1000 Гц експериментальні сенсори показують значно кращі результати, однак при зростанні частоти вимірювального сигналу відгук сенсорів наближається до розрахованих значень.

Висновки. У роботі проведено моделювання впливу конструктивних параметрів та конфігурації електродів на параметри резистивних та ємнісних сенсорів відносної вологості. При цьому було встановлено, що оптимальна товщина плівки для обох типів сенсорів складає 50 мкм. Для резистивних сенсорів оптимальною відстанню між електродами є 0,4 мм, оскільки така відстань дозволяє отримати сенсор з номінальним опором помітно меншим ніж у 0,7 мм та який дорівнює (1 МОм). Для ємнісних сенсорів кращою є конфігурація розгорнутого конденсатора з відстанню між електродами 0,1 мм, оскільки вона забезпечує кращий відгук (близько 7 пФ), а отже і чутливість сенсора.

Інформаційні джерела

1. V. A. Lapshuda and V. M. Koval, "Flexible and biodegradable sensors: materials, manufacturing technology and devices on its basis," *KPI Science News*, no. 2, Aug. 2021, doi: 10.20535/kpissn.2021.2.229964.
2. H. Zhao, Z. Wang, Y. Li, and M. Yang, "Single-sided and integrated polyaniline/poly(vinylidene fluoride) flexible membrane with micro/nanostructures as breathable, nontoxic and fast response wearable humidity sensor," *J Colloid Interface Sci*, vol. 607, pp. 367–377, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.08.214.
3. V. Lapshuda, V. Koval, V. Barbash, M. Dusheiko, O. Yaschenko, and O. Yakymenko, "Nanocellulose-Based Composites for Flexible and Biodegradable Humidity Sensors for Breath Monitoring," *IEEE Sens Lett*, vol. 7, no. 10, pp. 1–4, Oct. 2023, doi: 10.1109/LESENS.2023.3311669.
4. H. Tai, S. Wang, Z. Duan, and Y. Jiang, "Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges," *Sens Actuators B Chem*, vol. 318, p. 128104, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.snb.2020.128104.
5. R.W. Li and G. Liu, *Flexible and Stretchable Electronics*. Boca-Raton: Jenny Stanford Publishing, 2019. doi: 10.1201/9780429058905.
6. Lapshuda V, Koval V, Barbash V, Dusheiko M, Yashchenko O, and Malyuta S., "Flexible Humidity Sensors Based on Nanocellulose," *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2022)*, 2022.

7. H. Koga and M. Nogi, "Cellulose Paper Composites for Flexible Electronics," in *Lignocellulosics*, Elsevier, 2020, pp. 171–191. doi: 10.1016/B978-0-12-804077-5.00011-7.
8. J. van den Brand *et al.*, "Flexible and stretchable electronics for wearable health devices," *Solid State Electron*, vol. 113, pp. 116–120, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.sse.2015.05.024.
9. Z. Zhang *et al.*, "Printed flexible capacitive humidity sensors for field application," *Sens Actuators B Chem*, vol. 359, p. 131620, May 2022, doi: 10.1016/j.snb.2022.131620.
10. X. Guan *et al.*, "Flexible humidity sensor based on modified cellulose paper," *Sens Actuators B Chem*, vol. 339, p. 129879, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129879.
11. Z. Zhang *et al.*, "Printed flexible capacitive humidity sensors for field application," *Sens Actuators B Chem*, vol. 359, p. 131620, May 2022, doi: 10.1016/j.snb.2022.131620.
12. J. Wu, Y. Chen, W. Shen, Y. Wu, and J.-P. Corriou, "Highly sensitive, flexible and transparent TiO₂/nanocellulose humidity sensor for respiration and skin monitoring," *Ceram Int*, vol. 49, no. 2, pp. 2204–2214, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.09.187.
13. M. U. Khan *et al.*, "Biocompatible humidity sensor using paper cellulose fiber/GO matrix for human health and environment monitoring," *Sens Actuators B Chem*, vol. 393, p. 134188, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.snb.2023.134188.
14. H. Niu *et al.*, "Ultrafast-response/recovery capacitive humidity sensor based on arc-shaped hollow structure with nanocone arrays for human physiological signals monitoring," *Sens Actuators B Chem*, vol. 334, p. 129637, May 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129637.
15. V. Lapshuda, V. Koval, M. Dusheiko, and V. Barbash, "Flexible humidity sensors based on nanocellulose for wearable electronics," *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, no. 64(2), pp. 42–50, Dec. 2022, doi: 10.20535/1970.64(2).2022.269986.
16. H. S. Nishad, V. Sapner, B. M. Patil, B. R. Sathe, and P. S. Walke, "Flexible and wearable electrochemical biosensors based on 2D materials," in *2D Materials-Based Electrochemical Sensors*, Elsevier, 2023, pp. 355–373. doi: 10.1016/B978-0-443-15293-1.00006-9.
17. R. Samal and C. S. Rout, "Wearable and Flexible Sensors Based on 2D and Nanomaterials," in *Fundamentals and Sensing Applications of 2D Materials*, Elsevier, 2019, pp. 437–463. doi: 10.1016/B978-0-08-102577-2.00012-9.
18. J. Zikulnig, S. Lengger, L. Rauter, L. Neumaier, S. Carrara, and J. Kosel, "Sustainable Printed Chitosan-Based Humidity Sensor on Flexible Biocompatible Polymer Substrate," *IEEE Sens Lett*, vol. 6, no. 12, pp. 1–4, Dec. 2022, doi: 10.1109/LSSENS.2022.3224768.
19. X. Li *et al.*, "Facile fabrication of laser-scribed-graphene humidity sensors by a commercial DVD drive," *Sens Actuators B Chem*, vol. 321, p. 128483, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.snb.2020.128483.
20. L. Lan, X. Le, H. Dong, J. Xie, Y. Ying, and J. Ping, "One-step and large-scale fabrication of flexible and wearable humidity sensor based on laser-induced graphene for real-time tracking of plant transpiration at bio-interface," *Biosens Bioelectron*, vol. 165, p. 112360, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.bios.2020.112360.
21. Лапшуда В.А. *et al.*, "Гнучкі сенсори вологості на основі плівок наноцелюлози для біомедичного застосування," *Перспективні технології та прилади*, no. 22, pp. 81–90, Sep. 2023, doi: 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-12.
22. В. А. Лапшуда, В. М. Коваль, М. Г. Душейко, В. А. Барбаш, О. В. Яценко, and С. В. Малюта, "Ємнісні та резистивні сенсори вологості на основі гнучкої плівки наноцелюлози для носимої електроніки," *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*, Jul. 2023, doi: 10.20535/S0021347022120019.
23. J. Tritt-Goc, L. Lindner, M. Bielejewski, E. Markiewicz, and R. Pankiewicz, "Proton conductivity and proton dynamics in nanocrystalline cellulose functionalized with imidazole," *Carbohydr Polym*, vol. 225, p. 115196, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115196.
24. J. R. Ansari, S. M. Hegazy, M. T. Houkan, K. Kannan, A. Aly, and K. K. Sadasivuni, "Nanocellulose-based materials/composites for sensors," in *Nanocellulose Based Composites for Electronics*, Elsevier, 2021, pp. 185–214. doi: 10.1016/B978-0-12-822350-5.00008-4.
25. S. Agate, M. Joyce, L. Lucia, and L. Pal, "Cellulose and nanocellulose-based flexible-hybrid printed electronics and conductive composites – A review," *Carbohydr Polym*, vol. 198, pp. 249–260, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.06.045.

Lapshuda V., Koval V.

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

SIMULATION OF THE DESIGN PARAMETERS INFLUENCE ON THE CHARACTERISTICS OF HUMIDITY SENSORS BASED ON NANOCELLULOSE

In the work the effect of design parameters and electrode configuration on the parameters of resistive and capacitive sensors of relative humidity was simulated. Thus, it has been established that for resistive sensors, the best choice is the use of electrodes in the configuration of interdigital electrode. It was determined that the optimal film thickness for both types of sensors is 50 μm . For resistive sensors, the optimal distance between the electrodes is 0.4 mm, since this distance allows to get a sensor whose working range of resistance is significantly smaller compared to 0.7 mm (1 M Ω). For capacitive sensors, the 0.1mm electrode spacing configuration is preferred, as it provides better response (about 7pF) and therefore sensitivity.

Key words: nanocellulose, flexible sensors, humidity sensors, simulation.

УДК 681.5: 68.004.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-08

Матіко Ф.Д., Чабан В.Я., Масняк О.Я.

Національний університет «Львівська політехніка»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОНОСІЇВ

В статті розглянуто застосування для прогнозування обсягів споживання енергоносіїв статистичних моделей, штучних нейронних мереж, адаптивних нейро-нечітких систем. Показано, що використання штучних нейронних мереж дає можливість моделювати складні залежності між вхідними та вихідними параметрами. Виділено недоліки застосування нейромереж для прогнозування обсягів споживання газу, зокрема, великий обсяг даних для тренування мережі, наявність експертних знань та досвіду у дослідника, висока обчислювальна складність навчання та застосування мережі. Визначено також переваги математичних моделей для прогнозування обсягів споживання газу, що дозволяє отримати більш точні результати, забезпечує можливість урахування експертного досвіду, дозволяє адаптувати модель до змінних умов та встановлювати причинно-наслідкові зв'язки. Обґрунтовано доцільність розроблення автоматизованої системи прогнозування обсягів споживання природного газу на основі комбінованого методу прогнозування, який поєднує детерміновані залежності обсягів споживання від основних вхідних параметрів та застосування нейромережі для опису впливу багатьох випадкових факторів.

Ключові слова: математична модель, обсяги споживання, природний газ, методи прогнозування, фактори впливу, нейронна мережа.

Постановка проблеми. Природний газ є важливою сировиною для промисловості та найбільш споживаним енергоносієм, і його використання з належним плануванням є надзвичайно важливим для суспільства. Потрібно також підкреслити, що природний газ це ресурс, дія якого на довкілля може призвести до незворотних екологічних наслідків. Тому прогнозоване, економне, дбайливе використання природного газу є головною турботою газової промисловості, інших галузей діяльності та уряду [1].

Україна, як великий споживач природного газу, постійно стикається з викликами його ефективного використання. Залежність від імпорту та обмежені власні запаси природного газу вимагають постійного вдосконалення систем управління та прогнозування споживання газу. Для реалізації автоматизованих систем прогнозування обсягів споживання природного газу важливу роль відіграє наявність математичних моделей процесів розподілу та споживання природного газу. Використання таких моделей дає можливість аналізувати тенденції споживання природного газу, передбачати пікові навантаження, виявляти потенційні економічні збитки та розробляти стратегії зменшення його витрат.

Розроблення точних моделей прогнозування обсягів споживання енергоносіїв є складною проблемою, яка ще недостатньо досліджена. Зокрема для прогнозування обсягів споживання природного газу така модель повинна враховувати вплив температури, вологості атмосферного повітря, соціальних та багатьох інших факторів. Тому глибокий аналіз процесів споживання природного газу, виявлення всіх впливових факторів та розроблення моделей і методів для прогнозування споживання газу є важливими та актуальними завданнями.

Наявність моделей та методів прогнозування обсягів споживання енергоносіїв дає можливість розробити автоматизовані системи прогнозування їх споживання, які надають учасникам ринку енергоносіїв можливість динамічно в реальному часі реагувати на впливи техногенних, соціальних та економічних факторів, що надзвичайно важливо для економіки нашої держави в умовах воєнного стану.

Метою статті є аналіз методів та моделей для автоматизації прогнозування обсягів споживання енергоносіїв, визначення їх області застосування, переваг та недоліків, на основі чого виокремлення методів та моделей для прогнозування обсягів споживання природного газу. Удосконалення виділених методів та моделей дасть можливість у подальшому розробити автоматизовану систему прогнозування обсягів споживання природного газу.

Аналіз методів та моделей для прогнозування показників детермінованих та випадкових процесів. Аналіз детермінованих процесів передбачає використання

математичних моделей, які враховують закономірності та фактори, що впливають на процес. Наприклад, лінійна регресія, аналіз часових рядів та аналіз факторів є добре відомими методами прогнозування детермінованих процесів. Ці методи базуються на залежностях між показниками та їх факторами, та дозволяють прогнозувати майбутні значення з високою точністю. Такі методи застосовані авторами у роботах [2, 3] для прогнозування подового обсягу споживання на основі відомого обсягу споживання за місяць.

У випадку випадкових процесів, прогнозування є складнішим завданням, оскільки показники змінюються випадковим чином. Для таких процесів використовують статистичні методи та моделі, такі як ARIMA, GARCH, ANFIS та VAR [4 - 9]. Ці методи дозволяють враховувати статистичні характеристики процесу, такі як середнє значення, дисперсія та кореляція.

Також існують інші методи та моделі, які поєднують у собі як детерміновані, так і стохастичні елементи. Наприклад, нейронні мережі та генетичні алгоритми можуть використовуватись для прогнозування як детермінованих, так і випадкових процесів. Авторами проаналізовано особливості кожної моделі, представленої в науково-технічних джерелах, а також область їх застосування.

СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ.

1) Моделі ARIMA (autoregressive integrated moving average – авторегресійне інтегроване ковзне середнє) визначають лінійний зв'язок між послідовними даними [4]. Це найпоширеніший клас моделей для прогнозування часових рядів. Випадкові величини, які є часово-змінними рядами, якщо їх статистичні характеристики залишаються сталими в часі, то моделі ARIMA можуть бути найбільш відповідним вибором. Ці моделі покладені в основу різноманітних застосунків для прогнозування споживання природного газу. Джунхуї Гуо (2019) використовував дані цін на нафту WTI за останні тридцять три роки для навчання моделі ARIMA [5]. Проте, навчальні дані містили відмінності у цінах нафти між 2000 і 2013 роками, що ускладнило навчання за допомогою примітивних моделей ARIMA. Дослідники зауважили, що часово-змінні дані часто називають стаціонарними, якщо протягом заданого періоду T логарифм ціни на нафту WTI має однаковий розподіл протягом часу T . Додатково вони додали, що стаціонарність часто перевіряють за допомогою тесту Дікі-Фулера. Крім того, вони розклали дані логарифму ціни на нафту на тренд сезонності встановивши частоту сезонної декомпозиції на 360 днів. Порівняно з іншими моделями, модель ARIMA має найнижче значення R^2 порівняно з іншими алгоритмами прогнозування і мало придатна для опрацювання даних з великими варіаціями [4].

Модель Box-Jenkins є статистичним методом прогнозування, який успішно використовують для прогнозування часових рядів з однією змінною на короткий і середній терміни [6]. Підхід Box-Jenkins став популярним завдяки таким особливостям, як можливість використання для опрацювання часових рядів з різними характеристиками, наявне теоретичне обґрунтування та досвід успішного застосування для різних задач. Підхід Box-Jenkins є інтеграцією авторегресійного методу (AR) та методу ковзного середнього (MA) і може бути застосований до стаціонарних часових рядів. Для забезпечення стаціонарності в нестаціонарних часових рядах використовують диференційний метод. Зазвичай цю модель позначають як ARIMA (p, d, q). Тут p та q – це, відповідно, порядок авторегресійної (AR) моделі та моделі ковзного середнього (MA), а d - порядок диференціювання. Основне рівняння ARIMA-моделі можна записати у вигляді [4]:

$$Z_t = \Phi_1 Z_{t-1} + \Phi_2 Z_{t-2} + \dots + \Phi_p Z_{t-p} + \delta + a_t - \Theta_1 a_{t-1} - \Theta_2 a_{t-2} - \dots - \Theta_q a_{t-q}, \quad (1)$$

де δ - стала, $Z_t, Z_{t-1}, \dots, Z_{t-p}$ і $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$ є, відповідно, диференційованими спостереженнями та коефіцієнтами цих спостережень; $a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-q}$ представляють похибки, а $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_q$ - це коефіцієнти впливу похибок [4].

У моделях ARIMA прогнозування здійснюють за чотири етапи. По-перше, перевіряють стаціонарність ряду та забезпечують стаціонарність нестаціонарного ряду, визначають відповідну моделі Бокса-Дженкінса. По-друге, прогнозують параметри моделі. Потім перевіряють статистичними методами відповідність моделі набору даних. Якщо відповідність моделі, отриманої на попередньому етапі, підтверджено, то переходять до четвертого етапу, якщо ні, то повертаються до першого етапу. Під час четвертого етапу застосовують отриману модель для прогнозування [6].

2) Модель MLR (Multiple Linear Regression - множинна лінійна регресія) застосовують для визначення зв'язку між багатьма випадковими характеристиками процесу або змінними.

Інакше кажучи, MLR аналізує, наскільки тісно декілька незалежних змінних пов'язані або взаємозв'язані з однією залежною змінною. MLR передбачає наявність лінійного відношення між залежними та незалежними змінними, а також відсутність значної кореляції між незалежними змінними. М. Козельський (2019) [7] запропонували мета-модель, яка відтворює взаємозв'язок між моделями та характеристиками споживання LPG газу клієнтами та враховує багато факторів. Мета-модель може бути виражена у вигляді лінійної комбінації базових залежностей і має вигляд: $y = a_1 * x_1 + \dots + a_m * x_m + b$, де: m - загальна кількість розглянутих впливних величин [7].

Надані дані включали в себе щогодинні виміри з трьохсот LPG балонів. Кожний запис містив дату і час, відсоток рівня газу у балонах і температуру приміщення. Дослідники прийшли до висновку, що ця модель працює добре, коли горизонт прогнозування є щотижневим або щомісячним.

3) Експоненційне згладжування (Exponential Smoothing). Експоненційне згладжування є методом прогнозування часових рядів, який використовує попередні дані з ваговими коефіцієнтами. Цей метод заснований на усередненні попередніх значень з певними ваговими коефіцієнтами, де більший ваговий коефіцієнт надає більшу вагу ближчим даним. У випадку дослідження Альдіни Корреї [8] використовувалася модель експоненційного згладжування для прогнозування споживання газу з LPG балонів португальської газової компанії.

Дослідники аналізували деталі, такі як кількість продажів та повернень балонів, запаси різних типів балонів. Вони враховували те, що споживання з газових балонів LPG зазвичай зростає в холодні місяці через збільшений попит на приготування їжі та нагрівання води. Дослідники використовували ковзне середнє та обчислювали сезонні індекси для визначення кількості споживання газу в різні місяці. Після цього вони «десезонізували» дані, використовуючи отримані сезонні коефіцієнти, та застосували метод Холта для прогнозування продажів та повернень газових балонів. Важливо відзначити, що ефективність цієї моделі прогнозування може залежати від обсягу доступних даних, оскільки в іншому випадку сезонні коефіцієнти можуть значно відрізнятися від фактичних значень, що може вплинути на точність прогнозів [8].

4) Модель ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference System - адаптивна мережева система з нечітким висновком). Це система з нечіткою (fuzzy) логікою висновку, яка розроблена в рамках нейронних мереж. Цей метод був представлений Jang [9]. Алгоритм ANFIS можна навчати за допомогою методу градієнтного спуску в поєднанні з методом найменших квадратів. Загальну структуру ANFIS показано на рисунку 1 [9].

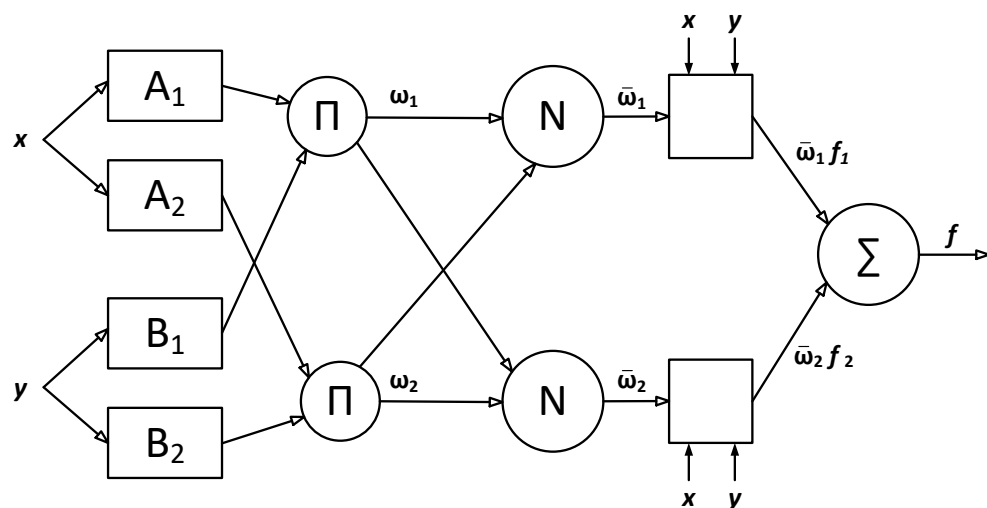


Рисунок 1 – Загальна структура моделі ANFIS з двома вхідними змінними: x , y – вхідні змінні; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 – рівняння нечітких множин; П – шар формування добутків зважених входів; N – шар нормалізації; ω_1 , ω_2 – вихідні вагові функції шару П; $\bar{\omega}_1$, $\bar{\omega}_2$ – нормалізовані ступені активації; $\bar{\omega}_1 f_1$, $\bar{\omega}_2 f_2$ – вихідні дефазифіковані сигнали; f – загальна вихідна функція ANFIS

Різні змінні впливають на споживання природного газу, такі як кількість населення, температура атмосферного повітря, ВВП, обсяг використання інших видів енергії тощо. У

роботі [9] населення та ВВП вважаються найбільш важливими факторами, а отже вважаються вхідними змінними для ANFIS. Збір даних – один з головних головний крок у процесі прогнозування, тому дані для вхідних змінних (кількість населення та ВВП) і вихідних змінних (споживання газу) зібрані з 1993 по 2012 рік. Також всі дані введення та виведення перед обробкою були нормалізовані. Це дуже важлива процедура, оскільки якість відповіді моделі безпосередньо залежить від якості формування даних, і незважаючи на високу якість моделі, якщо зібрані дані не мають необхідної якості, кінцева відповідь моделі не буде надійною. Авторами [9] дані були зібрані від British Petroleum та Всесвітнього банку. Всі дані були розділені на дві групи: навчальні дані та тестові дані. Зазвичай навчальні дані складають від 70% до 90% всіх даних, а решта даних використовується для тестування. Відповідно в роботі [9] дані з 1993 по 2007 рік вважаються навчальними даними, а дані з 2008 по 2012 рік – тестовими даними.

Усі моделі ANFIS формують відповідно до двох основних параметрів: типу функції належності та кількості лінгвістичних змінних. Кількість лінгвістичних змінних може бути від 2 до 20. Було сформовано багато ANFIS-моделей з одинадцятьма функціями належності, проте моделі з шістьма функціями належності мають прийнятну відповідь. Застосовують такі функції належності: узагальнену дзвоноподібну вбудовану функцію належності (gbell), вбудовану функцію належності з гаусівською кривою (gauss), функцією приналежності з комбінованою гаусівською кривою (gauss2), з різницею між двома сигмоїдними функціями належності (dsig), з добутком двох сигмоїдних функцій належності (psig), вбудовану функцію належності з формою "π" (pi) [9].

Для вибору прийнятної моделі ANFIS потрібно знайти критерій середньої абсолютної відсоткової похибки (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) для кожної моделі з кожною функцією приналежності та кожною лінгвістичною змінною. Критерій MAPE обчислюють за формулою [9]:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{x_t - x'_t}{x_t} \right|}{n} \quad (2)$$

У роботі [9] значення кількості населення та ВВП з 2013 по 2020 рік прогнозуються за допомогою авторегресійної моделі. Вони подаються на вхід до навченої моделі ANFIS, яка обчислює значення споживання газу з 2013 по 2020 рік як вихідний параметр. За результатами досліджень навчених моделей ANFIS з різними ваговими функціями встановлено [9], що модель із вбудованою функцією належності "gauss" та трьома лінгвістичними змінними є кращою серед інших моделей, оскільки має найменшу відсоткову помилку (MAPE).

МОДЕЛІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ. Штучні нейронні мережі (Artificial neural networks - ANN) розроблені на основі результатів вивчення активності мозку та мають характеристики продуктивності, подібні до біологічних нейронних мереж. ANN має багато важливих можливостей, таких як навчання на основі даних, узагальнення, робота з необмеженою кількістю змінних. ANN зазвичай складається з кількох шарів багатьох обчислювальних елементів, які називаються вузлами. Кожен вузол отримує вхідний сигнал від інших вузлів або зовнішніх вхідних сигналів, а потім після обробки сигналів локально через функцію переносу, він виводить перетворений сигнал до інших вузлів або до вузла формування кінцевого результату [6].

На сьогодні розроблено багато моделей штучних нейронних мереж для використання в різних галузях діяльності (MLP, RBF, LVQ, Hopfield, Recurrent, FCNN, SOM, LSTM, ART тощо). Нижче розглянуто детальніше деякі з них:

1) Conventional Neural Network (звичайна нейронна мережа). Звичайна штучна нейронна мережа (ANN) є аналітичним методом, інспірованим біологічними процесами в людському мозку, який використовують для аналізу та прогнозування даних у часових рядах. ANN складається з простих обчислювальних елементів, які працюють разом, і має здатність вчитися на основі наданих прикладів, створюючи певні зв'язки з даними. У дослідженні, проведеному Ногасіо Раджі (2014), була використана штучна нейронна мережа для прогнозування споживання пропану у газових балонах [10]. Аналізовані дані включали щоденні споживання газу, атмосферну температуру, погодні умови тощо. Щоб прогнозувати щотижневе споживання, дослідники об'єднали щоденні дані з понеділка по суботу. У іншому дослідженні Прабод Кумар Прадхан (2018) також застосував ANN для прогнозування споживання природного газу [11]. Він використав п'ять різних вхідних параметрів для навчання мережі,

включаючи щоденний попит, температуру, вологість, опади та інші показники. Результати досліджень показали, що використання штучних нейронних мереж (ANN) дозволило отримати кращі прогнози в порівнянні з класичними моделями прогнозування. Застосування ANN виявилось ефективним у прогнозуванні споживання природного газу за різних погодних умов [11].

2) Нечітка когнітивна нейронна мережа (Fuzzy Cognitive Neural Network, FCNN) дає можливість створювати складні та нелінійні моделі процесів. У дослідженні, проведеному Katarzyna Poczeta (2018), була запропонована модель, яка комбінує техніку нечіткої моделі кластеризації (FCM) зі звичайною штучною нейронною мережею (ANN) для створення каскадної моделі [12]. Оптимізація структури цієї моделі здійснюється за допомогою генетичних алгоритмів, які вибирають найважливіші концепції (вузли) для нечітких когнітивних карт. Ці обрані концепції потім використовуються у FCM як вхідні дані для навчання штучних нейронних мереж. Після подання цих обраних атрибутів даних у формі вузлів як вхідних даних для штучних нейронних мереж, модель може вчитися за допомогою методів зворотнього поширення. Гібридна модель FCM-ANN, яку було запропоновано, показала відмінні прогностичні здатності та здатність адаптуватися до складних структур даних у порівнянні зі стандартними моделями штучних нейронних мереж (ANN). Це дозволяє застосовувати цей метод для прогнозування в різних областях, де потрібна висока точність та гнучкість у моделюванні складних систем [12].

3) Мережа LSTM (Long Short-Term Memory - довга короткочасна пам'ять) - це тип рекурентної нейронної мережі (RNN), розроблений для вирішення завдань, пов'язаних з моделюванням довгострокових залежностей в послідовних даних. LSTM є корисним інструментом для прогнозування часових рядів та використовується в різноманітних галузях, де необхідно аналізувати та прогнозувати дані на основі минулих інформаційних шаблонів. У дослідженні, проведеному Athanasios Anagnostis (2019), LSTM використовувалася для прогнозування потреби в природному газі на наступний день у трьох центрах розподілу в Греції [13]. Для побудови моделі використовувалися історичні дані попиту на природний газ протягом понад 5 років. LSTM навчали на попередніх 4 роках даних, використовуючи дані зазначених 364 днів для прогнозування наступних 364 днів. Отримані результати показали, що модель LSTM успішно вирішує завдання прогнозування природного газу при невеликій кількості вхідних змінних. Проте зі збільшенням кількості вхідних змінних, продуктивність LSTM може зменшуватись. Це вказує на те, що у деяких випадках збільшення складності моделі може призвести до зниження її ефективності [13].

4) Багатошарові перцептрони (Multiple Layer Perceptron, MLP). Нейрони та шари у мережах MLP організовані у прямому напрямку. У MLP перший шар є вхідним, де отримують зовнішню інформацію про проблему, яку потрібно вирішити. Останній шар є вихідним, де отримують оброблену в мережі інформацію. Шар, який знаходиться між вхідним та вихідним, називається прихованим. У MLP мережах може бути більше одного прихованого шару. На рисунку 2 показано архітектуру типової MLP мережі [6].

Головна роль штучної нейронної мережі (ANN) полягає в тому, щоб навчитися та сформувати структуру набору вихідних даних для їх узагальнення. Для цього мережу навчають, використовуючи вибірку вхідних даних. Під час процесу навчання, приклади вхідних даних або шаблони подають до вхідного шару мережі. Значення активації вхідних вузлів зважуються за допомогою коефіцієнтів v_{ij} та накопичуються в кожному вузлі прихованого шару. Зважена сума передається відповідною функцією, щоб створити значення активації вузла. Вихід прихованого шару j можна обчислити за наступною формулою [6]:

$$z_j = f\left(v_{oj} + \sum_{i=1}^N v_{ij}x_i\right) \quad (3)$$

5) Радіальна базисна функційна мережа (RBFN). Традиційно використовується для вирішення інтерполяційних проблем в багатовимірному просторі та має схожі можливості з MLP нейронною мережею, яка вирішує будь-яку проблему апроксимації функції.

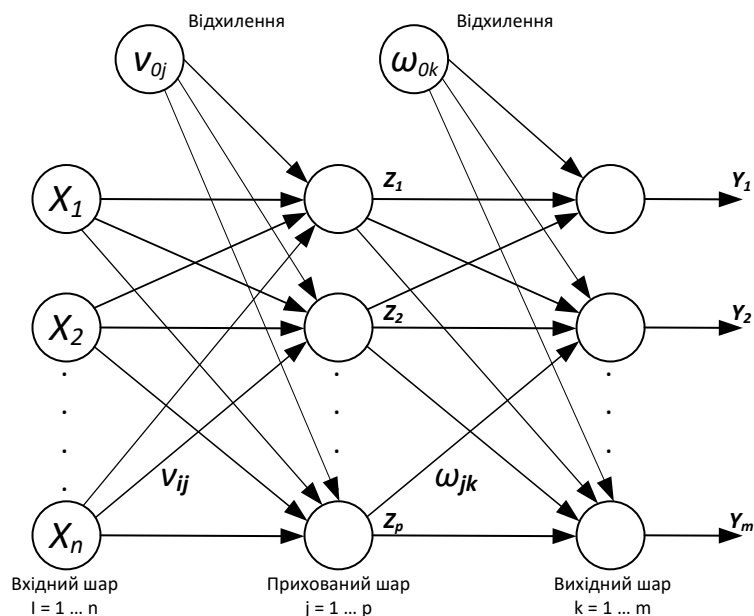


Рисунок 2 – Нейронна мережа з багатьма шарами [6], де $X_1, X_2, \dots, X_n$ – вхідні величини; v_{ij} – ваговий коефіцієнт зв'язку, що з'єднує i -тий вхід з прихованим вузлом j ; ω_{jk} – ваговий коефіцієнт, що з'єднує j -ий вхід прихованого шару з вихідним вузлом k ; v_{0j}, ω_{0k} – відхилення; $z_1, z_2, \dots, z_p$ – вихідні величини прихованого шару; $y_1, y_2, \dots, y_m$ – вихідні величини мережі

RBF-функції були вперше використані для проектування нейронної мережі Брумхедом і Лоу, які показали, як RBF нейронна мережа моделює нелінійний зв'язок та вирішує проблеми інтерполяції. Перевагами RBFN є те, що вона може бути навчена протягом короткого часу порівняно з MLP та наближати найкраще рішення без проблеми з локальними мінімумами. Крім того, RBFN це локальні мережі порівняно з мережами прямого поширення, які виконують глобальне відображення. Це означає, що RBFN використовує один набір обчислювальних одиниць, кожна з яких найбільш чутлива до локальної області вхідного простору. Завдяки цим особливостям RBFN були широко застосовані як альтернативна модель нейронних мереж у таких застосуваннях як апроксимація функцій, прогнозування часових рядів, а також завданнях класифікації [6].

RBFN складається з трьох шарів, як показано на рисунку 3. Основною відмінністю між MLP та RBFN є те, що у RBFN є один прихований шар, який містить вузли, що називаються RBF-блоками [6].

Вхідний шар служить лише для розподілу вхідних сигналів до прихованого шару. На відміну від MLP, значення з вхідного шару передаються без множення на вагові коефіцієнти. Одиниця прихованого шару вимірює відстань між вектором входу та центром радіальної функції і формує значення на виході в залежності від відстані. Центр радіальної базисної функції називається опорним вектором. Чим ближче вхідний вектор до опорного вектора, тим більше значення буде сформоване на виході прихованого вузла. Хоча для використання в прихованому шарі запропоновано багато радіальних базисних функцій (Гауса, мультикватрична, узагальнена мультикватрична), у більшості випадків в застосуваннях використовують гаусівську функцію. Функція активації окремих прихованих вузлів, визначена гаусівською функцією [6].

Під час навчання мережі RBF можуть виникати дві проблеми: проблема обчислювальної складності при великому розмірі набору даних та проблема перенавчання, яка виникає, коли тренувальні дані містять шум. Для зменшення обчислювальної складності та вирішення проблеми перенавчання кількість нейронів у прихованому шарі встановлюють менше, ніж кількість прикладів у вхідному наборі даних. В цьому випадку центральні вектори вибирають з вхідних векторів випадковим чином [6].

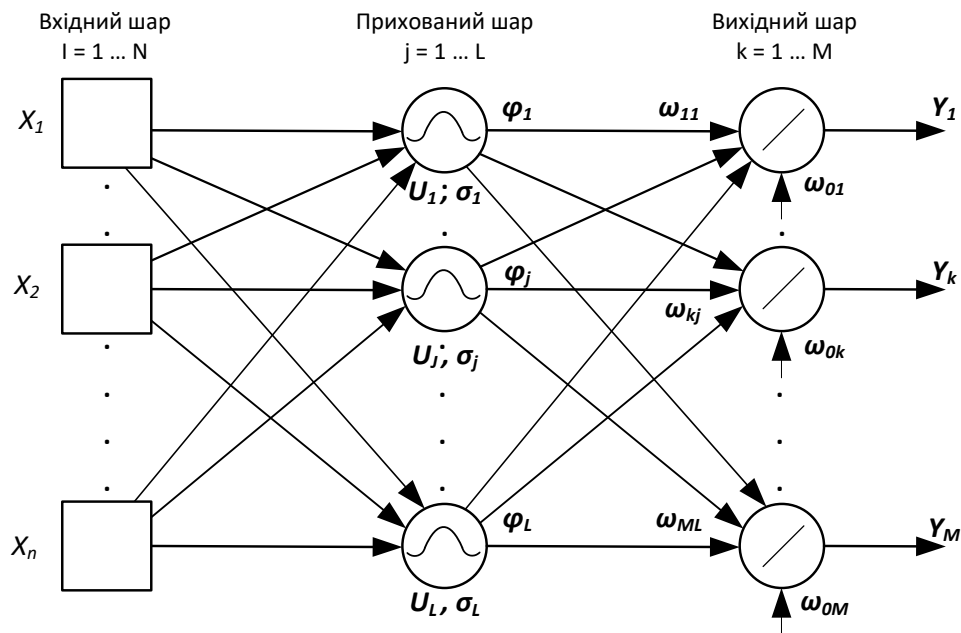


Рисунок 3 - Радіальна базисна функційна мережа, де $X_1, X_2, \dots, X_n$ – вхідні величини; v_{ij} – вагове значення, що з'єднує i -тий вхід з прихованим вузлом j ; ω_{jk} – вагове значення, що з'єднує j -тий вхід прихованого шару з вихідним вузлом k ; $\omega_{01}, \omega_{0k}, \omega_{0M}$ – відхилення; $\varphi_1, \varphi_j, \dots, \varphi_L$ – вихідні величини прихованого шару; $Y_1, Y_k, \dots, Y_M$ – вихідні величини мережі; $\omega_{11}, \omega_{kj}, \dots, \omega_{ML}$ – лінійні вагові значення; $U_1, U_j, \dots, U_L$ – центральні вектори функції Гауса; $\sigma_1, \sigma_j, \dots, \sigma_L$ – радіус-функції Гауса

КОМБІНОВАНІ МОДЕЛІ. Окрім традиційних методів прогнозування, деякі вчені експериментують з використанням комбінації двох чи більше моделей для передбачення споживання природного газу. Це спроба покращити результати, перевірити ефективність різних моделей та порівняти їх з традиційними методами. У своїй роботі Aldina Correia (2020) запропонувала використання методу ансамблю, де моделі для прогнозування щомісячного споживання природного газу поєднуються разом [8]. Вона використовувала модель експоненційного згладжування (формула Холта), модель лінійної регресії (MLR) для урахування різних факторів і штучні нейронні мережі (ANN) з одним шаром та чотирма прихованими вузлами. Ці моделі були об'єднані, кожній з них надавалася вага, щоб створити комплексну модель. Zlatan Sicanica (2018), в свою чергу, провів порівняльне дослідження алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж для прогнозування попиту на природний газ [14]. Він порівнював різні моделі, такі як нейронні мережі, дерева рішень, регресія методом опорних векторів та інші за допомогою опрацювання тривалих даних споживання природного газу в Хорватії. Отримані результати вказують на те, що комбінація моделей може дати більш точний прогноз навіть при обмежених вхідних даних. Також, важливо враховувати, що порівняльне оцінювання різних моделей машинного навчання важливе для виявлення їх ефективності та уникнення перенавчання моделей на етапі навчання.

Висновки. В статті розглянуто застосування для прогнозування обсягів споживання енергоносіїв статистичні моделі, штучні нейронні мережі (ANN), адаптивні нейро-нечіткі системи (ANFIS), моделі ARIMA та інші.

З проведеного аналізу видно, що використання штучних нейронних мереж дає можливість моделювати складні залежності між вхідними та вихідними параметрами. Моделі MLP (multilayer perceptron) та RBF (radial basis function) були успішно застосовані для прогнозування випадкових процесів. MLP показала незначно кращі результати порівняно з RBF, але обидві моделі забезпечили адекватні прогнози [6].

Адаптивні нейро-нечіткі системи (ANFIS) є поєднанням нейромережі та нечіткої логіки. Відомі приклади застосування алгоритму групування для генерації початкової структури у ANFIS, що дозволило зменшити кількість нечітких правил та параметрів та поліпшити продуктивність моделі [4, 6]. Більшість дослідників підтверджують, що модель ARIMA виявилася ефективною для прогнозування детермінованих процесів. Застосування

диференціювання для досягнення стаціонарності часового ряду і вибір оптимальної ARIMA моделі дозволили отримати достовірні прогнози.

Отже всі розглянуті методи та моделі показали добрі результати прогнозування показників детермінованих та випадкових процесів. Вибір конкретного методу залежить від конкретного завдання та обсягу даних для опрацювання.

Однак застосування нейромереж для прогнозування споживання газу має такі недоліки:

1) нейромережі часто вимагають великого обсягу даних для тренування та налагодження; отримання достатньої кількості точних даних про споживання газу може бути складним завданням.

2) налаштування нейромереж вимагає експертних знань та досвіду у галузі машинного навчання та може забрати у дослідника багато часу.

3) висока обчислювальна складність: нейромережі можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих та складних моделей; це може стати проблемою при застосуванні нейромереж на малопотужних обчислювальних пристроях.

Натомість, застосування математичних моделей для прогнозування обсягів споживання газу має певні переваги:

1) математичні моделі (аналітичні чи статистичні) можуть враховувати взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами, що робить їх зрозумілими та детермінованими, а також допомагає менеджерам приймати обґрунтовані рішення під час планування споживання газу;

2) математичні моделі можуть враховувати експертні знання та правила, що визначають взаємозв'язки між змінними, тобто експерти в галузі споживання газу можуть застосувати свої знання та досвід під час розроблення моделі.

3) математичні моделі можуть бути легко модифіковані та адаптовані до нових умов газового ринку та зміни впливних факторів;

4) можлива реалізація математичних моделей на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами; особливо це актуально для прогнозування в реальному часі.

Отже, використання математичних моделей для прогнозування споживання газу дозволяє отримати більш точні результати, забезпечує можливість урахування експертного досвіду, дозволяє адаптувати модель до змінних умов та встановлювати причинно-наслідкові зв'язки. Це допомагає управляти споживанням газу більш ефективно, планувати ресурси та розробляти стратегії зменшення споживання, що є важливим аспектом у сучасному енергетичному секторі.

У роботі [4] представлено результати кількісного аналізу застосування різних моделей та методів для прогнозування споживання газу. Навчання усіх моделей виконано на основі одних і тих самих масивів даних про споживання газу. Для оцінювання методів застосовано квадрат коефіцієнта кореляції фактичних та прогнозованих значень споживання газу R^2 та середньоквадратичне відхилення (RMSE). За результатами аналізу встановлено, що модель LSTM показала найкращі результати. Також комбінований метод, що складався з нейронних мереж, лінійної регресії Lasso, SVR та дерева рішень, дав майже ті ж результати, що і LSTM. Для комбінованого методу отримано $RMSE = 4.8621$ і R-квадрат 0.9437. Якщо б обсяг тренувальних даних був ще більшим, то комбінований метод міг би забезпечити найкращий результат завдяки його адаптивним алгоритмам навчання. Інші неромережеві методи (крім LSTM) а також метод експоненційного згладжування показали гірші результати. Цей аналіз показує, що зі збільшенням кількості вхідних параметрів комбіновані моделі та методи досягають кращої ефективності порівняно з класичними моделями [4].

В роботі [6] порівняння моделей ARIMA, MLP, RBF та ANFIS виконано на основі значення середньої абсолютної відсоткової похибки (MAPE). Отримано такі значення MAPE відповідно для моделей ARIMA, MLP, RBF та ANFIS: 6,410%, 5,477%, 6,186% та 5,468%. Тобто найкращий результат отриманий за допомогою моделі ANFIS, яка використовує алгоритм групування для генерації початкової структури FIS.

Отже для розроблення автоматизованої системи прогнозування обсягів споживання природного газу доцільно застосувати один з комбінованих методів. Причому залежності обсягів споживання від основних вхідних параметрів доцільно розробити у формі детермінованих математичних моделей. Вплив багатьох випадкових факторів доцільно врахувати за допомогою застосування нейромережі.

Інформаційні джерела

1. Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Затверджено розпорядженням Кабінету міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р.
2. Матіко Ф.Д., Коробко І.В., Кузьменко Ю.В. Методика перетворення до стандартних умов об'ємів природного газу, виміряних побутовими лічильниками газу. Київ, ДП «Укрметртестстандарт» 2021. 28 с.
3. Description of the TDD Model Version 3.11 - Jakub Novak, Marcel Jirina, Petr Novak, 2020. - 26 p. (In Czech)
4. 10. Meenakshi Thalor, Ritesh Choudhary, Ajay Jangid et al. Forecasting Models of Natural Gas / International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 2021, Volume 8, Issue 3. – p.251-258. doi : <https://doi.org/10.32628/IJSRST218375>
5. Junhui Guo. Oil price forecast using deep learning and ARIMA. International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), 2019, Page 241- 247.
6. 4. Oguz Kaynar, Isik Yilmaz , Ferhan Demirkoparan. Forecasting of natural gas consumption with neural network and neuro fuzzy system / Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research. 2011, Volume (Issue) 26(2). – p. 221-238.
7. Michal Kozielski, Zbigniew Laskarzewski. Matching a Model to a User - Application of Meta-Learning to LPG Consumption Prediction: The 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2018), January 2019. DOI:10.1007/978-3-319-98557-2_46
8. Correia, A., Lopes, C., Costa e Silva, E. et al. A multi-model methodology for forecasting sales and returns of liquefied petroleum gas cylinders. Neural Comput & Applic 32, 12643–12669 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04713-0>
9. 6. Mahdiah Qanbari1, Shahram Javadi, Reza Sabbaghi-Nadooshan. The Forecasting of Iran Natural Gas Consumption Based On Neural-Fuzzy System Until 2020 - International Journal of Smart Electrical Engineering, Vol.2, No.3, 2013. – p.181-184.
10. Horacio Paggi, Franco Robledo. A Neural Networks Based Model For The Prediction Of The Bottled Propane Gas Sales, International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry, 2014, Page 69-74.
11. P. K. Pradhan, S. Dhal and N. K. Kamila. Artificial Neural Network Conventional Fusion Forecasting Model for Natural Gas Consumption, 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Bangalore, India, 2018, pp. 2200-2205, doi: 10.1109/ICACCI.2018.8554500.
12. Katarzyna Poczeta, Elpiniki I. Papageorgiou. Implementing Fuzzy Cognitive Maps with neural networks for natural gas prediction, IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2018, Pages 1026-1032.
13. A. Anagnostis, E. Papageorgiou, V. Dafopoulos and D. Bochtis. Applying Long Short-Term Memory Networks for natural gas demand prediction, 2019 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA), Patras, Greece, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/IISA.2019.8900746.
14. Zlatan Sicanica, Zdravko Oklopčić. Countywide Natural Gas Consumption Forecast, a Machine Learning Approach, MIPRO 2018, May 21-25, 2018, Opatija Croatia, 2018, Page 1070-1073.

Matiko F., Chaban V., Masniak O.
Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF METHODS AND MODELS FOR AUTOMATION OF ENERGY CARRIER CONSUMPTION FORECASTING

The usage of statistical models, artificial neural networks, and adaptive neuro-fuzzy systems for forecasting energy carrier consumption is considered in the article. It is shown that the use of artificial neural networks makes it possible to model complex dependencies between input and output parameters. Disadvantages of the use of neural networks for forecasting gas consumption are highlighted, in particular, a large amount of data for training the network, availability of expert knowledge and experience of the researcher, high computational complexity of training and application of the network. The advantages of mathematical models for forecasting the volumes of gas

consumption are also determined, which allows to obtain more accurate results, provides the possibility of taking into account expert experience, allows to adapt the model to changing conditions and establish cause-and-effect relationships. The feasibility of developing the automated system for forecasting natural gas consumption volumes based on a combined forecasting method is substantiated. The combined method should combine the deterministic dependence of consumption volumes on the main input parameters and the use of a neural network to describe the influence of many random factors.

Keywords: *mathematical model, consumption volumes, natural gas, forecasting methods, influencing factors, neural network*

УДК 621.315.592

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-09

Никируй Л.І.¹, Ільницький Р.В.¹, Павлюк М.Ф.¹, Федосов С.А.², Пташенчук В.В.²¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника²Луцький національний технічний університет

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИГЕРІВ НА ЛОГІЧНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СИСТЕМАХ ПТШ З ЄМНІСНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МІКРОСИСТЕМ

У даному дослідженні подані результати комп'ютерного моделювання інтегральних тригерних елементів, реалізованих на польових транзисторах Шотткі (ПТШ) з ємнісними зв'язками, а саме, синхронного RS-тригера та двотактного T-тригера. На основі результатів моделювання представлено отримані режими їх функціонування, наведено їх конструктивно-технологічні приладні структури. Ці структури можуть бути отримані суміщеними субмікронними Si і GaAs технологіями. Такі технології водночас є перспективними для створення різних типів сенсорних елементів, що відкриває додаткові можливості їх інтеграції зі схемами первинної обробки інформації від них і створення сенсорних мікросистем-на-кристалі. Також за рахунок цього майже на порядок зростає швидкодія тригерних систем при формуванні гетеро-ПТШ транзисторів, що забезпечується за рахунок утворення подвійного електронного газу, рухливості електронів якого зростає на порядок. Для цифрових перетворень інформації від сенсорних елементів на основі ПТШ відповідно необхідні тригерні елементи зі структурами ПТШ. Результати аналізу і досліджень схемотехніки RS-тригерів і двотактних T-тригерів з міжелементними ємнісними зв'язками подано у цій статті.

Ключові слова: RS-тригер, T-тригер, мікропроцесор, ПТШ-транзистор, субмікронна технологія.

Постановка наукової проблеми. Одним з найважливіших елементів цифрової техніки є тригер. Сам тригер не є базовим елементом, так як він збирається з більш простих логічних схем. Сімейство тригерів досить велике. Це тригери: Т, D, С, JK, але основою всіх є найпростіший RS-тригер. Відмінною особливістю тригера як функціонального пристрою є властивість запам'ятовування двійкової інформації. Під пам'яттю тригера мають на увазі здатність залишатися в одному з двох станів і після припинення дії сигналу, який перемикається. Приймавши один зі станів за «1», а інше за «0», можна вважати, що тригер зберігає (пам'ятає) один розряд числа, записаного в двійковому коді. Також цей пристрій має можливість швидко переключатися з одного стану в інший під зовнішнім впливом, що дає можливість змінювати інформацію. RS-тригер використовується для формування сигналу з позитивним і негативним фронтами, окремо керованими за допомогою подачі імпульсів на входи, які рознесені в часі. Також RS-тригери часто використовуються для виключення помилкового спрацювання цифрових пристроїв від так званого «брязкоту контактів». При виготовленні тригерів застосовуються переважно напівпровідникові прилади зазвичай біполярні і польові транзистори. З появою технології виробництва мікросхем малої і середньої ступені інтеграції був освоєний випуск великої номенклатури тригерів в інтегральному виконанні. В даний час логічні схеми, в тому числі з використанням тригерів, створюють в інтегрованих середовищах розробки під різні програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). Використовуються, в основному, в обчислювальній техніці для організації компонентів обчислювальних систем: регістрів, лічильників, процесорів, ОЗУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] її авторами розроблено RS-тригер із структурою транзисторів, розділених на дві групи (spaced transistor groups (STGs) RS-тригер), і TCAD моделювання цього логічного елемента виконується за технологією CMOS-блоків з проектним розміром 65 нм. Стійкість RS-тригера до впливу одиночних ядерних частинок покращується шляхом поділу його транзисторів на дві групи таким чином, щоб вплив на одну з цих груп не призводило до порушення логічного стану цього тригера. Стаття [2] досліджує механізм теплового виходу металооксидних напівпровідникових польових транзисторів (MOSFET) у RS-тригерах. Виконується моделювання для вивчення порогу пошкодження RS-тригера за різних входів затвора та часу наростання, а також будується графік внутрішнього розподілу температури. Завдяки аналізу авторами робиться висновок, що сильні

б) область G_i ($i = 1, 2, 3$) стійкої роботи (криві 1, 2, 3 для $E_{жс} = 6, 8, 10$ відповідно)

Проведене комп'ютерне моделювання дозволило визначити умови завадостійкої роботи RS-тригера в площині параметрів $E_{вх}$, T (рис. 2б), які поступають на входи R і S ($E_{вх}$ – тут амплітуда вхідного сигналу, T – тривалість вхідного сигналу). У даних графіках всі напруги і часові параметри нормуються на φ_0 (бар'єр Шотткі, що є $\leq 0,4$ В) і RS ланки (R – опір витоку, C – ємність затвору ПТШ-транзистора, який використовується в логічних схемах високої швидкодії на ємнісних зв'язках). Із поданого на графіках рис. 2 видно, що область стійкої роботи зменшується із збільшенням напруги джерела живлення $E_{жс}$, причому мінімальна амплітуда вхідного сигналу $E_{вх}$, при якій ще проходить якісне спрацювання тригера, залишається постійною і рівною 2,5-3 В.

Часові та амплітудні характеристики RS-тригерів. Характеристики RS-тригера відносно амплітуди та часу подані на рис. 3а, б, в, де r – зменшення опору витоку, n – зменшення ємності навантаження.

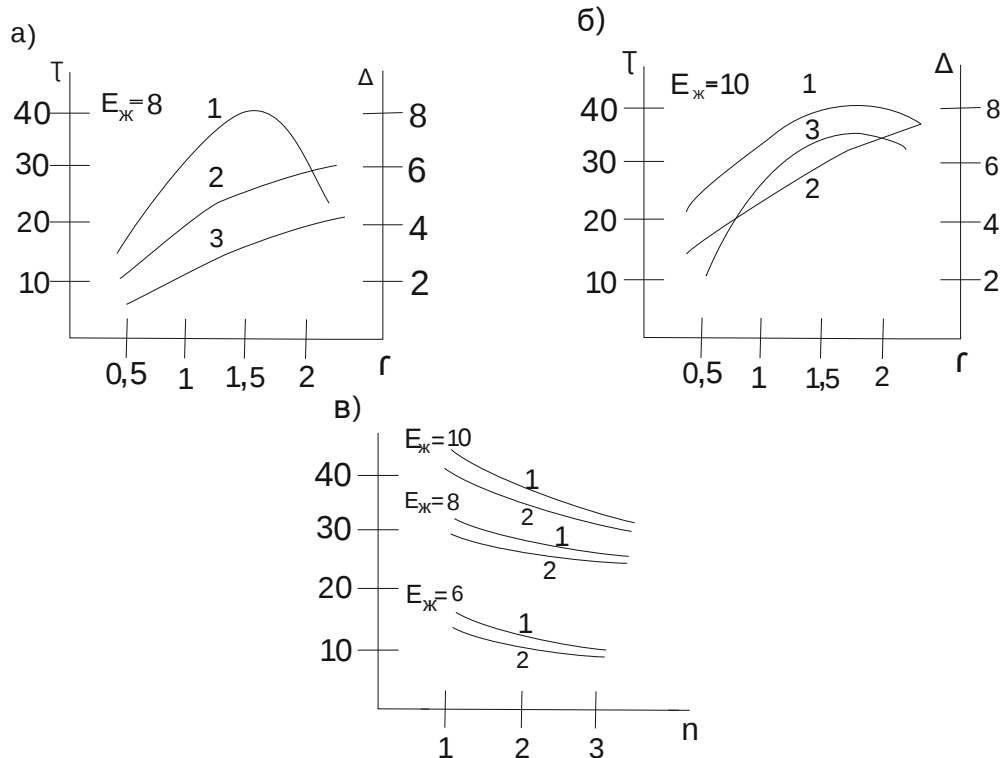


Рисунок 3 – Часові і амплітудні характеристики RS-тригера:
 а) залежність часу τ переходу із стану логічного «0» в логічний «1»;
 б) залежність часу τ переходу із стану логічної «1» в логічний «0»;
 в) логічний перепад

Із рис. 3а, б видно, що при зменшенні опору витоку ПТШ-транзистора сильно зростає логічний перепад. Це приводить до збільшення часу переключення, оскільки для зарядження ємності навантаження займає більше часу. Проте, при зменшенні опору джерела живлення в n раз (по відношенню до оптимального варіанту > 1) зміни є незначними. Якщо зменшити ємність навантаження C_3 в n -разів (при напрузі живлення $E_{жс} = 8-10$) то це спочатку приведе до різкого зниження часу передачі переключення (рис. 3в), а потім при $n \geq 1.5$ зміни стають незначними, так як ємність C_3 стає меншою ніж внутрішні ємності тригера. У випадку коли напруга живлення $E_{жс} = 6$ ця залежність є досить слабкою, оскільки робота тригера, у цьому випадку, характеризується дуже малим логічним перепадом.

Із поданого випливає наступне, що для забезпечення надійної роботи RS-тригера необхідно задавати напругу входу $E_{вх} = 3,5-4$; $r \geq 2$; $E_{жс} = 7-8$; це забезпечує, що при $n > 1$ час переключення стає на рівні $\tau = 30$ і логічний перепад $\Delta = 6$.

Тепер розглянемо динаміку роботи двотактного рахункового Т-тригера, які побудовані на двох RS-тригерах і який перемикається поданням на входи s і $\bar{s}$ двох серій тактових імпульсів, які зсунуті один відносно другого на π (180°). Функціональна схема такого тригера подана на рис. 2а. Перед початком роботи (аналогічно як і в RS-тригері) на входи s і $\bar{s}$ подаються синхронно два позитивні імпульси.

Моделювання показало, що мінімальна тривалість вхідних імпульсів, при якій проходять ділення частоти, є рівне 20. Це забезпечує слабку залежність стійкої роботи Т-тригера (в площині параметрів вхідних сигналів $E_{\text{вх}}$ і T) від напруги джерела живлення, яке змінюється в межах 6-10. На рис. 4 подані динамічні характеристики (час затримки τ_z і тривалість фронту $\tau_{\text{ф}}$ вихідних імпульсів Т-тригера, які визначаються як залежність ємності навантаження C_3 що є нормованою до C_1).

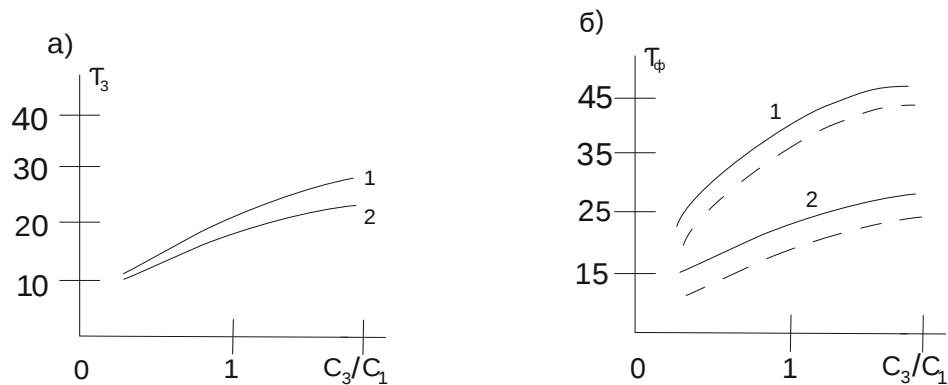


Рисунок 4 – Динамічні характеристики вихідних імпульсів:

- а) залежність середньої затримки (криві 1, 2 для $E_{\text{жс}} = 10$ і 8 відповідно);
 б) тривалість переднього (криві 1) і заднього (криві 2) фронтів від значення ємності навантаження C_3 нормованої на C_1 . Суцільні лінії і пунктирні лінії для $E_{\text{жс}} = 10$ і 8 відповідно.

Проведені розрахунки показують, що при тривалості імпульсу, що є рівний 60, тригер стабільно працює навіть при значенні ємності $C_3 = 15C_1$, що є еквівалент коефіцієнту розгалуження за виходом більше 10, проте в цьому випадку дещо понижуються швидкодія такого тригера (рис. 5). Тут дуже важливим фактором, що забезпечує правильний і надійний режим роботи двотактного Т-тригера є саме відсутність часових неузгоджень між сигналами на входах с і $\bar{\text{с}}$. Десинхронізація між імпульсами один відносно другого мають великий вплив на роботу тригера, що демонструє рис. 4а. В той же час, розширення або звуження імпульсів помітно не впливає на роботу Т-тригера, при цьому його часові характеристики, як видно на рис. 4б, покращуються. Т-тригер є саме тим елементом, по роботі якого можна визначити максимальну тактову частоту вже досить складних цифрових схем.

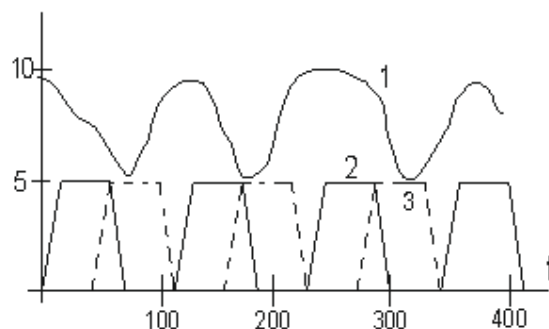


Рисунок 5– Вплив часових неузгоджень між сигналами на роботу Т-тригера вихідного сигналу (крива 1) при зсуві фази між сигналами на входах с і $\bar{\text{с}}$ (суцільна і пунктирна криві 2 і 3).

Проведений нами аналіз і моделювання показують, що якщо тривалість тактових імпульсів буде рівна $50RC_1$, то такий тригер працює дуже стійко, допускаючи коефіцієнт розгалуження на входах вже більше 5. При використанні розробленої нами субмікронної кремнієвої та арсенідгалієво-кремнієвої технології можна довести постійну часу RC_1 до значення $\leq 10\text{-}12$ пс, що і забезпечує тривалість імпульсу на рівні 50 пс. Очевидно, що чим менша тривалість $\tau_{\text{ф}}$ тим вища частота перемикавання, а отже і швидкодія тригера. Таким чином, цифрові тригерні схеми з ємнісними зв'язками на транзисторах ПТШ (як гомоперехідні, так і гетероперехідні) можуть працювати на тактових частотах до 40 ГГц та 120 ГГц відповідно.

Висновки. Висока стійкість і швидкодія синхронних RS-тригерів та рахункових Т-тригерів на основі ПТШ транзисторів досягнута використанням субмікронної кремнієвої технології для епішарів GaAs на моно кремнієвих підкладках, що підтверджують результати машинного моделювання. Формування шарів GaAs на моно кремнієвих підкладках забезпечується низькотемпературною епітаксією, стимульованою фотонною обробкою ексімерними лазерами при температурах $T = 520 - 550^\circ\text{C}$, а для вирівнювання постійних ґраток GaAs і Si використовується буферний шар моно германію товщиною 0,5-1 мкм. Швидкодія тригерних систем зростає майже на порядок при формуванні гетеро-ПТШ транзисторів, що забезпечується за рахунок утворення подвійного електронного газу рухливість електронів якого зростає на порядок (зростання тактової частоти з 40 ГГц до 120 ГГц). Малі значення контактного опору стік-витокових областей ПТШ-транзисторів забезпечується багатозарядною дуальною імплантацією та імпульсним фотонним відпадом ізотопних переходів $n+n$ -типу.

Інформаційні джерела

1. Stenin V.Y., Katunin Y.V. Simulation the Effects of Single Nuclear Particles on STG RS Triggers with Transistors Spacing into Two Groups. *Russian Microelectronics*. 2018. Vol. 47, № 6. P. 407–414.
2. Zhang Z., Chen X., Li Q., Wang D., Gong B. Simulation analysis of strong electromagnetic pulse rise time on damage threshold of RS flip-flop. *High Power Laser and Particle Beams*. 2017. Vol. 29, № 8. 083202.
3. Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V., Pakhomov I.V. The multifunctional programmable multiplexer of potential signals of sensors. *2016 International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES 2016 : Proceedings*. 2016. P. 261–264, 7593863.
4. Новосядлий С.П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС : Монографія. Івано-Франківськ : Місто-НВ, 2010. 458 с.
5. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Цифрові пристрої. К. : Каравелла, 2008 400 с.
6. Kogut I.T., Holota V.I., Druzhinin A.O., Dovhij V.V. The device-technological simulation of local 3D SOI-structures. *Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors, Energy Harvesting : NATO Advanced Research Workshop*. Lviv, 2015. P. 17–18.

Nykyruy L.¹, Ilnytskyi R.¹, Pavlyuk M.¹, Fedosov S.², Ptashenchuk V.²

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

²Lutsk National Technical University

COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TRIGGERS ON LOGIC TRANSISTOR PTS SYSTEMS WITH CAPACITIVE COUPLING FOR SENSOR MICROSYSTEMS

This paper presents the results of computer modeling of the integral trigger elements implemented on Schottky field-effect transistors (FETs) with capacitive coupling, namely, a synchronous RS-trigger and a two-stroke T-trigger. The obtained modes of their functioning are presented on the basis of the simulation results, and their constructive and technological instrument structures are shown. These structures can be obtained by combined submicron technologies based Si and GaAs. At the same time, such technologies are promising for the creation of various types of sensor elements, which opens up additional opportunities for their integration with circuits for primary processing of information from them and the creation of sensor microsystems-on-a-crystal. Also due to this, the speed of trigger systems increases by almost an order of magnitude during the formation of hetero-FETs transistors, which is ensured by the formation of a double electron gas, the mobility of which electrons increases by an order of magnitude. For digital transformations of information from sensor elements based on FETs the trigger elements with FETs structures are needed, respectively. The results of the analysis and research of RS flip-flops and two-stroke T-type of flip-flops with inter-element capacitive connections are presented in this paper.

Keywords: RS-Trigger, T-Trigger, Microprocessor, PTS-Transistor, Submicron Technology.

УДК 004.932

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-10

Полярус О.В., Поляков Є.О., Ібрагімов Ш.Г., Хоменко Ю.С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

МОДЕЛЬ КОЛЬОРОВОСТІ ОБ'ЄКТІВ НА ФОНІ ДОВІЛЬНОЇ МІСЦЕВОСТІ

В останні роки значно зріс інтерес до використання автономних мобільних роботів (АМР) в сферах людської діяльності, пов'язаних з безпекою і військовими операціями. Такі роботи повинні слабо залежати від GPS і самостійно орієнтуватися на незнайомій місцевості в інтересах виконання поставленого перед ними завдання. Для цього кожен робот повинен знайти на території об'єкт, який можна вважати наземним орієнтиром. Метою статті є створення нової моделі кольоровості об'єктів, що дає можливість в майбутньому відносити ці об'єкти до наземних орієнтирів і розпізнавати їх у часі, близькому до реального.

Вперше запропоновано метод з використання методу «знімків», тобто аналізу послідовних зображень, записаних на матрицю відеокамери в процесі сканування простору. Зв'язок між сусідніми кольоровими стовпцями кольоровості зображень забезпечується матрицею перетворення, яка з'єднує два сусідніх стовпця пікселів зображення шляхом інверсії Мура-Пенроуза. Похибки апроксимації свідчать про втрату лінійності перетворення, але в той же час можуть служити особливістю для виявлення наземного орієнтиру роботом. Розроблена в статті математична модель кольоровості наземного орієнтира для автономної навігації з урахуванням фону навколишньої місцевості справедлива для будь-яких навігаційних умов автономного мобільного робота в денний час, коли використовується скануюча відеокамера.

Ключові слова: автономний мобільний робот; наземний орієнтир; метод "моментальних знімків"; норма Фробеніуса; кольоровість.

Актуальність теми дослідження. В останній рік істотно зріс інтерес до використання автономних мобільних роботів (АМР) в галузях людської діяльності, що пов'язані з безпекою та військовими діями. Такі роботи повинні бути слабо залежними від GPS і самостійно орієнтуватися на незнайомій місцевості в інтересах виконання завдання, що поставлене перед ними. Для цього кожний робот повинен знайти на території об'єкт, який можна вважати наземним орієнтиром (НО). Кількість НО повинно перевищувати одиницю і відносно їх АМР створюють свою локальну систему координат, в якій пролягає їх маршрут. Функціонування систем виявлення і розпізнавання НО ґрунтується на використанні моделей орієнтирів, які відрізняються для активних та пасивних засобів. Активні засоби, наприклад, міні радари, створюють для себе ненавмисні завади, тобто сигнали, що відбиті від навколишнього фону місцевості. Пасивні засоби виявлення, наприклад, відеокамери, не мають подібного недоліку.

Постановка проблеми. При створенні математичної моделі НО потрібно забезпечити її достовірність хоча б за формою орієнтиру. Це зробити непросто бортовими засобами АМР, бо НО може знаходитись на фоні інших штучних або природних об'єктів. Найкращим наземним орієнтиром для робота можна вважати зосереджений у вертикальній площині високий об'єкт, що має малі розміри у горизонтальній площині. До таких орієнтирів можна віднести стовпи, високі дерева тощо. Розроблена заздалегідь модель НО найчастіше не буде адекватною для реальних умов. Отже, виникає завдання розробки моделі орієнтиру на основі поточних вимірювань окремих важливих параметрів. До таких параметрів належить колір НО, який у більшості випадків буде відрізнятися від кольору навколишніх об'єктів та всього фону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час розроблено багато підходів до створення математичних моделей об'єктів, які можна віднести до НО. Для підвищення якості виявлення і розпізнавання орієнтирів сформульовані вимоги щодо стиснення і попередньої обробки зображення, його зберігання та вибору характеристик відео камери [1]. Розпізнавання орієнтирів здійснюється з використанням нечітких множин на основі порівняння отриманого зображення з шаблоном [2]. При цьому може використовуватись декілька відеокамер, інформація від яких обробляється стерео алгоритмами [3]. Якісне розпізнавання НО здійснюється на основі апріорної інформації про його зображення або в процесі панорамного опису сцен [4]. Апріорна інформація для розпізнавання об'єктів міститься в базі даних і може досягати 10 мільйонів фотографій сцен [5]. Для грубих оцінок форми орієнтиру іноді

використовують гістограми кольоровості виявлених об'єктів [6]. Порівняння з шаблонами і виявлення локальних особливостей зображень рекомендується здійснювати в хмарах точок [7]. Всі сучасні алгоритми оброблення зображень навіть для рухомих об'єктів працюють в реальному часі [8]. Багато методів розпізнавання об'єктів ґрунтуються на використанні штучних нейронних мереж [9], зокрема, мережі зворотного поширення [10] та згорткових нейронних мереж [11]. Для гнучкого розпізнавання застосовується глибоке машинне навчання на 3D-хмарах точок [12]. Під час навчання встановлюють додаткові перешкоди [10], штучно змінюють умови освітлення [13], щоб наблизити модельну ситуацію до реальної. Навчання є затратним в часі і може здійснюватися тільки кваліфікованими спеціалістами. Для автоматичного розв'язання мобільними роботами завдань в складних умовах навколишнього середовища в [14] синтезована система диференціальних рівнянь для оптимального визначення в реальному часі параметрів кольоровості НО. В [15] для виявлення орієнтирів конкретної форми, зокрема, стовпів, запропоновані дві оптимізовані системи оброблення інформації про кольоровість навколишнього середовища. Одна з них ґрунтується на накопиченні зсунутих в часі сигналів кольоровості, а інша на усуненні нестационарності процесів шляхом розкладання сигналів кольоровості на моди Гільберта-Хуанга і використанні перших трьох мод, які містять інформацію про стрибки кольоровості, що обумовлені наявністю орієнтирів в полі зору відео камери.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Основним недоліком наявних моделей кольоровості орієнтирів є ефективність тільки для окремих випадків, наприклад, тільки для стовпів визначеної форми. Якщо такі орієнтири відсутні на місцевості, то АМР може не виконати поставленого перед ним завдання. Виникає потреба в більш загальних моделях, які будуть придатними для широкого кола умов.

Метою статті є створення нової моделі кольоровості об'єктів, що дає можливість в майбутньому на основі цієї моделі класифікувати об'єкти як наземні орієнтири і розпізнавати їх у часі, близькому до реального.

Сутність запропонованої моделі.

Основним джерелом даних для побудови моделей є поточні вимірювання параметрів середовища, які необхідні для навігації АМР, зокрема, параметри кольоровості об'єктів в зоні огляду відеокамери. Ці параметри внаслідок зміни освітлення, попадання на об'єкт тіней, опадів тощо випадково змінюються з часом. При такому підході кількість моделей може бути необмеженою, але на практиці доцільно мати одну модель загального виду параметри якої уточнюються в процесі вимірювань кольоровості.

Розроблені моделі і алгоритми для задачі, що розглядається, повинні виявляти просторові структури на фотографіях для їх інтерпретації і можливого їх віднесення до класу наперед визначених орієнтирів. Оскільки параметри кольоровості орієнтиру і фону є випадковими, то їх моделі є статистичними. Фотографії описуються матрицями пікселів, які можуть мати високу розмірність, і тоді виникає потреба в зниженні розмірності матриць і прийнятті рішення про виявлення НО на основі матриць з пониженою розмірністю. Крім того, моделі кольоровості орієнтиру і фону мають бути лінійними, інакше їх важко подати у вигляді матриць. Змінювання кольоровості пікселів на матриці зображення при скануванні відеокамерою простору аналогічне в математичному сенсі змінюванню параметрів потоку рідини в поперечному перерізі труби. Для опису таких потоків розроблено метод "snapshots" або "моментальних зрізів" [16].

Для демонстрації методу в різних для виявлення НО умовах виберемо фотографії трьох довільних місцевостей (рисунок 1, а, б, в), на яких пізніше програмним методом буде встановлене зображення можливого наземного орієнтиру.

1) місцевість близька до однотонної за кольором і на ній відсутні якісь виділені об'єкти; наприклад, такою місцевістю може бути степ, морське узбережжя або суцільний ліс одного кольору (рисунок 1, а);

2) місцевість середньої насиченості з малою кількістю об'єктів (рисунок 1, б);

3) місцевість високої насиченості, де разом з природними елементами є штучні споруди типу будівель (рисунок 1, в).



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Фотографії трьох типів місцевостей: а – близька до однотонної місцевість, слабо насичена; б – середньо насичена місцевість; в - місцевість високої насиченості

При моделюванні з використанням математичного пакету Matlab здійснювалось перетворення фотографії у три матриці пікселів $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$, кожна з яких відповідно включає розподіл пікселів червоного, зеленого та синього кольорів по площині фотографії або матриці відеокамери. Ці матриці можна використовувати для вилучення динамічної інформації від поля кольорів знімка безпосередньо на основі послідовності моментальних знімків. Після вибору фотографії місцевості визначається квадратна матриця перетворення $\mathbf{A}$, яка зв'язує два сусідні стовпці (з номерами $k, k + 1$) кольоровості пікселів зображень $\vec{x}_k$ та $\vec{x}_{k+1}$,

$$\mathbf{A} \approx \vec{x}_{k+1} \cdot \vec{x}_k^{\dagger}, \quad (1)$$

де $\vec{x}_k^{\dagger}$ є інверсією Мура-Пенроуза, тобто аналогом оберненої матриці для неквадратних матриць. Наприклад, в пакеті Matlab для червоного кольору маємо: $\mathbf{A} = \mathbf{R}(:,2) * \text{pinv}(\mathbf{R}(:,1))$, де pinv реалізує оператор інверсії для неквадратної матриці (для даного випадку, стовпця). Точність наближення (1) оцінюється у вигляді вектору-стовпця різниць (похибки апроксимації)

$$\vec{\Delta} = \vec{x}_{k+1} - \mathbf{A} \vec{x}_k \quad (2)$$

для $k = 1$. Всі елементи цього вектору є близькими до нуля. Для $k = 2$ результат значно відрізняється (рис. 2).

Максимальна абсолютна похибка кольоровості пікселів може дорівнювати 255, а мінімальна – 0. Для сусідніх стовпців з номерами 200 та 201 графік аналогічних похибок має вигляд:

Аналогічні похибки спостерігаються для будь-яких сусідніх стовпців, окрім першого і другого. Основна причина похибок апроксимації обумовлена застосування лінійного перетворення для умов, в яких зв'язок між сусідніми стовпцями став нелінійним. Матриця $\mathbf{A}$ визначалась для зв'язку між першим та другим стовпцями, а потім застосовувалась для сусідніх зв'язків з іншими номерами. Якщо б фон був однорідним, то матриця $\mathbf{A}$ була б майже однаковою для всіх сусідніх стовпців. В протилежному разі необхідно створити таку матрицю перетворення, елементи якої були б функціями номерів стовпців. Слід очікувати нелінійної залежності значень матриці $\mathbf{A}$, що визначена для різних номерів сусідніх стовпців, причому для кожного кольору $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$ і фону (фотографії) вид нелінійної залежності буде різний, що є недоліком такого методу

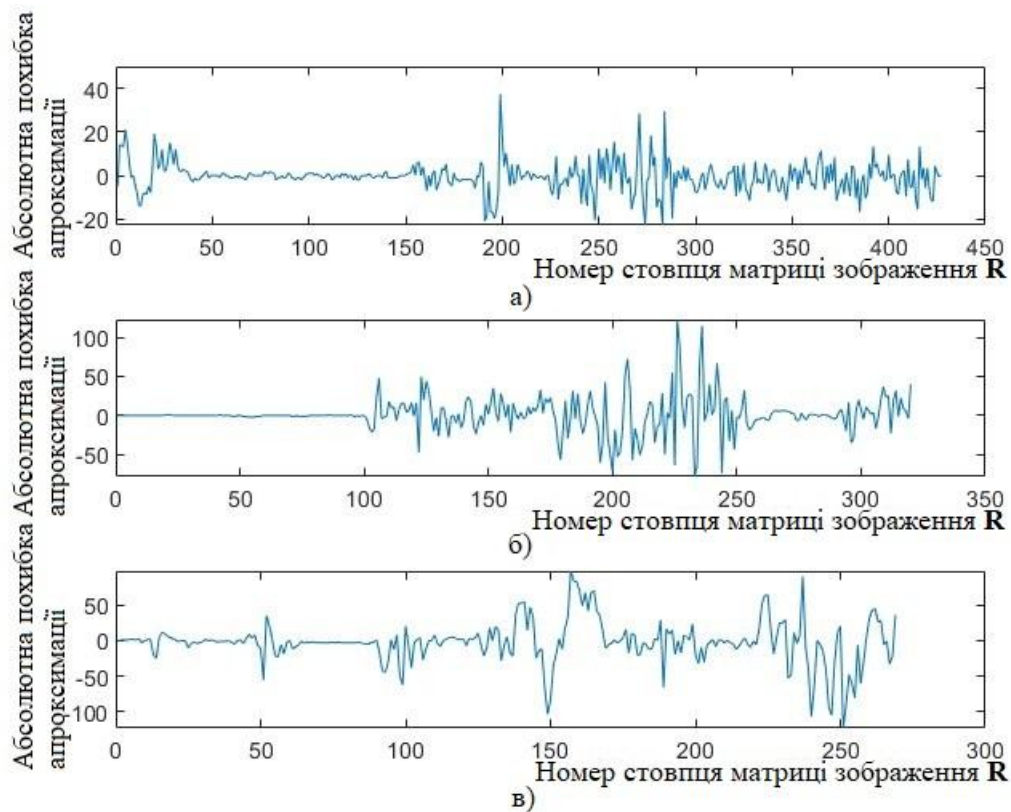


Рисунок 2 – Приклад залежності абсолютної похибки апроксимації (2) зв'язку між сусідніми стовпцями (другим і третім) від номеру стовпця матриці зображення $\mathbf{R}$ компоненту червоного кольору: для фонів, що відповідно приведені на рисунку 1, а, б, в

Тепер оцінимо не вектор, а матрицю різниць $\vec{\Delta} = \vec{X}_{k+1} - \mathbf{A}\vec{X}_k$, де $\vec{X}_k, \vec{X}_{k+1}$ вже є не стовпцями, а двомірними матрицями, що зсунуті на один стовпець чи більше. Матрицю кольоровості для першого фону, що має 960 стовпців, розділимо на дві половини. Розглянемо матрицю $\vec{X}_k$, що включає стовпці з номерами від 1 до 480, та матрицю $\vec{X}_{k+1}$, яка містить стовпці з номерами від 2 до 481. Тоді матриця $\mathbf{A}$ визначається за раніше приведеною формулою з використанням програми Matlab $\mathbf{A} = \mathbf{R}(:, 2:481) * \text{pinv}(\mathbf{R}(:, 1:480))$. Для матриць похибок (2) $\vec{\Delta} = \vec{X}_{k+1} - \mathbf{A}\vec{X}_k$ більш узагальненим параметром апроксимації є норма Фробеніуса, яка обчислюється за формулою [17]

$$\|\vec{\Delta}\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \Delta_{jk}^2}. \quad (3)$$

Оскільки вона залежить від кількості елементів матриці пікселів, то для забезпечення однакових умов аналізу для різних зображень норма Фробеніуса була розділена на сумарну кількість елементів матриці. Таку норму будемо називати приведеною. Залежність цієї норми від кількості стовпців матриці $\vec{X}_k$ показана на рис. 4.

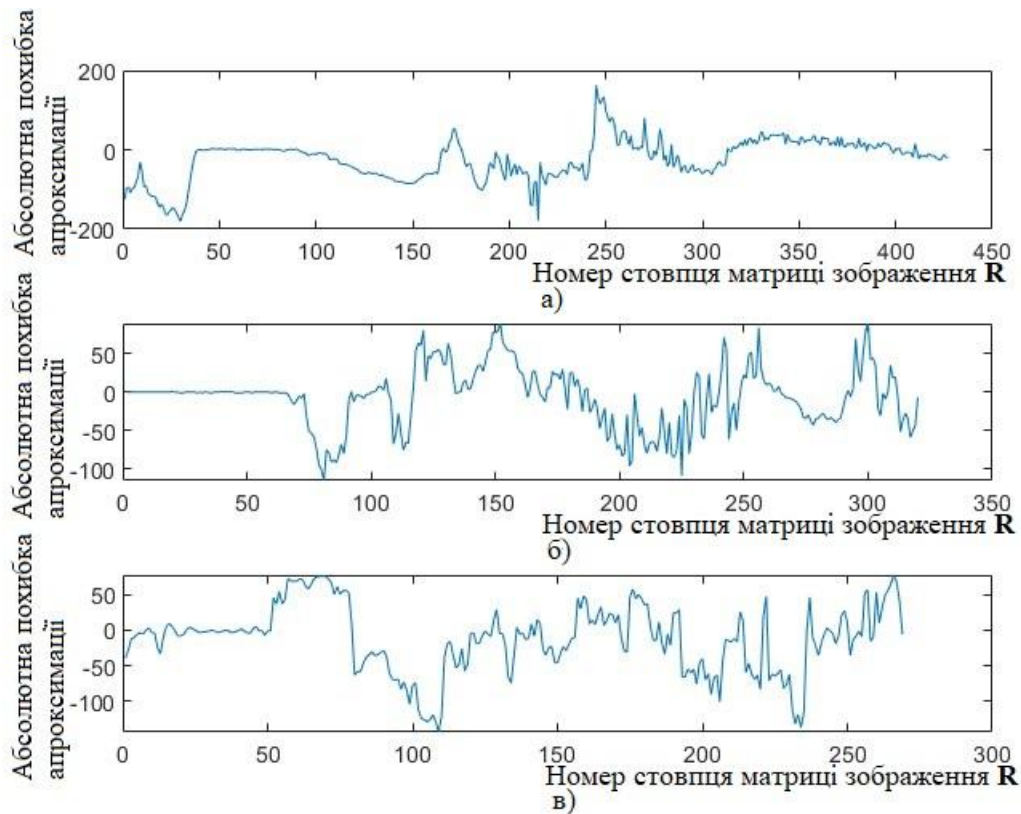


Рисунок 3 – Приклад залежності абсолютної похибки апроксимації (2) зв'язку між сусідніми стовпцями з номерами 200 та 201 від номеру стовпця матриці зображення $\mathbf{R}$ компоненту червоного кольору: для фонів, що відповідно приведені на рисунку 1, а, б, в

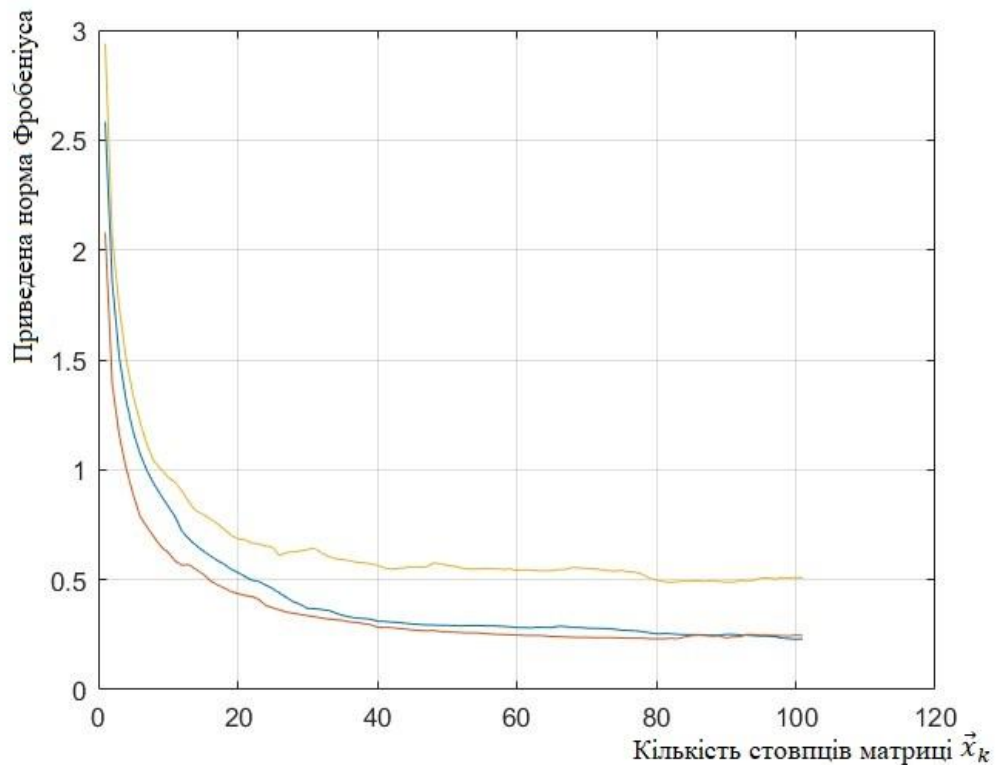


Рисунок 4 – Залежність приведеної норми Фробеніуса від кількості стовпців матриці $\vec{X}_k$: синій колір – для фону зображеного на рисунку 1, а (фон (а)), червоний колір – для фону (б), жовтий колір – для фону в)

Вплив наземного орієнтиру на результати моделювання. Наявність наземного орієнтиру, що підлягає виявленню чи розпізнаванню, змінює характер розподілу червоного, зеленого та синього кольорів пікселів. Якщо отримати математичний опис фону, на якому може перебувати об'єкт, то математичні вирази для фону і фону з об'єктом та закони розподілу кольорів будуть відрізнятися для цих ситуацій. Це дає підставу для проведення вище описаних операцій. Оскільки НО зосереджені у вертикальному напрямку, кількість стовпців матриці кольорів доцільно вибирати невеликим, щоб їх загальна ширина була сумірною з шириною наземного орієнтиру. Однак, як показано раніше, при малій кількості вибраних стовпців лінійні перетворення кольорів для довільного (не суцільного) фону є неможливими. Втрата лінійності з'являється після перевищення похибками апроксимації деякого наперед вибраного порогу, вибір якого потребує окремого дослідження. Інший підхід [18], [19] передбачає збереження лінійності моделі в умовах глобальної лінеаризації з використанням декомпозиції динамічних мод та оператора Купмана. Слід очікувати, що поява наземного орієнтиру на місцевості вплине на локальний розподіл кольоровості. Крім того, існує можливість використовувати для опису кольоровості місцевості і нелінійну модель, що ґрунтується на моделях Вінера та Гаммерштейна, як це, наприклад, зроблено для нелінійного інерційного каналу тиску [20]. На рисунку 5 приведені ті ж самі, що на рисунку 1, фотографії зі стовпом, який в окремих випадках можна вважати орієнтиром.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Фотографії фонів з можливим орієнтиром

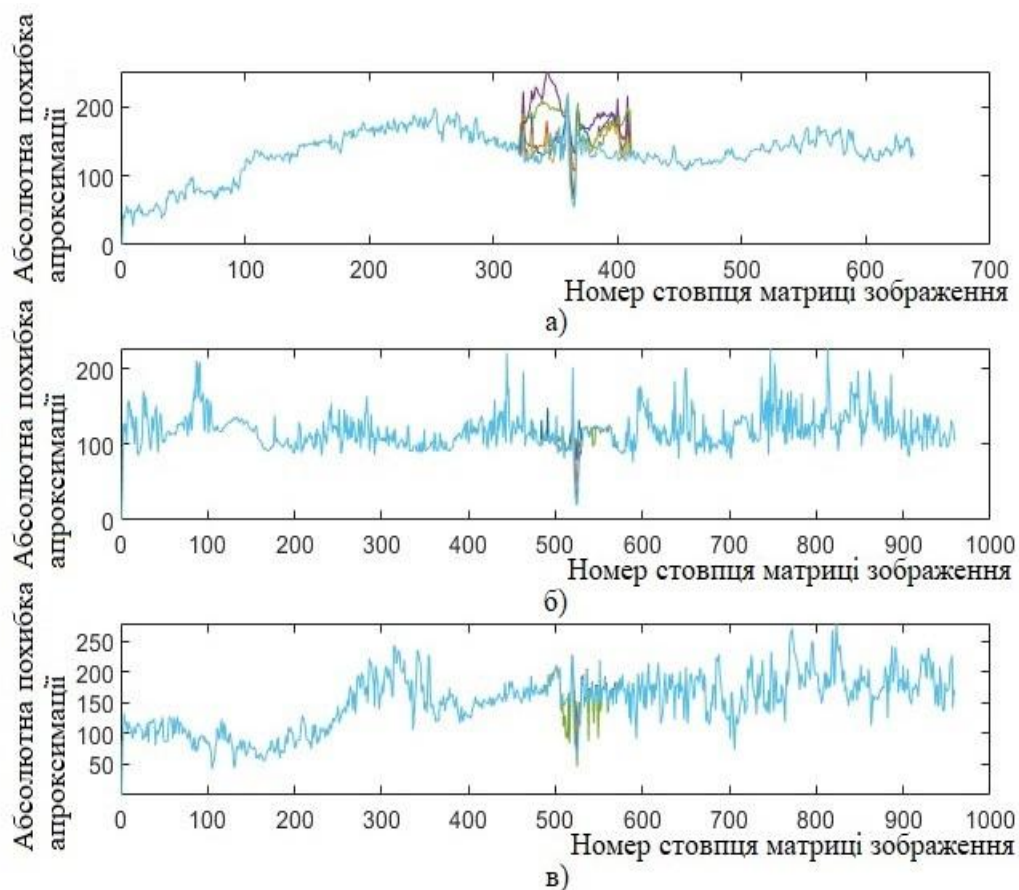


Рисунок 6 – Абсолютні похибки апроксимації (2) в місці розміщення стовпа для фонів, що приведені на рисунку 5 а, б, в

Наявність стовпа приводить до втрати локальної однорідності місцевості і тоді похибки апроксимації в місці розміщення стовпа стрибкоподібно змінюються, що показано на рисунку 6. Показане стрибкоподібне змінювання похибок апроксимації може бути ознакою для виявлення орієнтиру і визначення його положення на матриці зображення. Важливо, щоб його колір значно відрізнявся від кольору навколишнього середовища у місці розміщення орієнтиру. Існує поріг, перевищення якого свідчить про наявність орієнтиру в локальній області. Детально метод оцінювання ймовірності виявлення таких орієнтирів при наперед вибраному порозі похибок описано в [21]. Істотної залежності похибок апроксимації від форми орієнтиру не знайдено. Тому запропонований метод може використовуватись для виявлення наземних орієнтирів, що зосереджені у просторі і мають відмінний від фону колір.

Отже, описані операції дозволяють отримати моделі лінійного перетворення складових R, G, B різних типових фонів місцевості при скануванні простору відео камерою. Лінійні моделі є характерними для однорідних суцільних фонів. Для неоднорідних фонів можуть застосовуватись нелінійні моделі на основі матриці A з елементами, що нелінійно залежать від номерів стовпців K матриці кольорів. Для демонстрації наочності отриманих результатів приведена узагальнена таблиця 1.

З таблиці 1 випливає, що в місцях розташування на кадрі зображення стовпа, як можливого орієнтиру для АМР, спостерігається провал на графіках похибок апроксимації (2), причому він найбільш помітний на фотографіях з одноманітним за кольором фоном. Такий провал може служити ознакою для виявлення наземних орієнтирів та їх розпізнавання.

Таблиця 1– Фотографії фонів без орієнтиру та з орієнтиром і відповідні похибки апроксимації зв'язку (2) між кольорами сусідніх стовпців матриці зображення відео камери

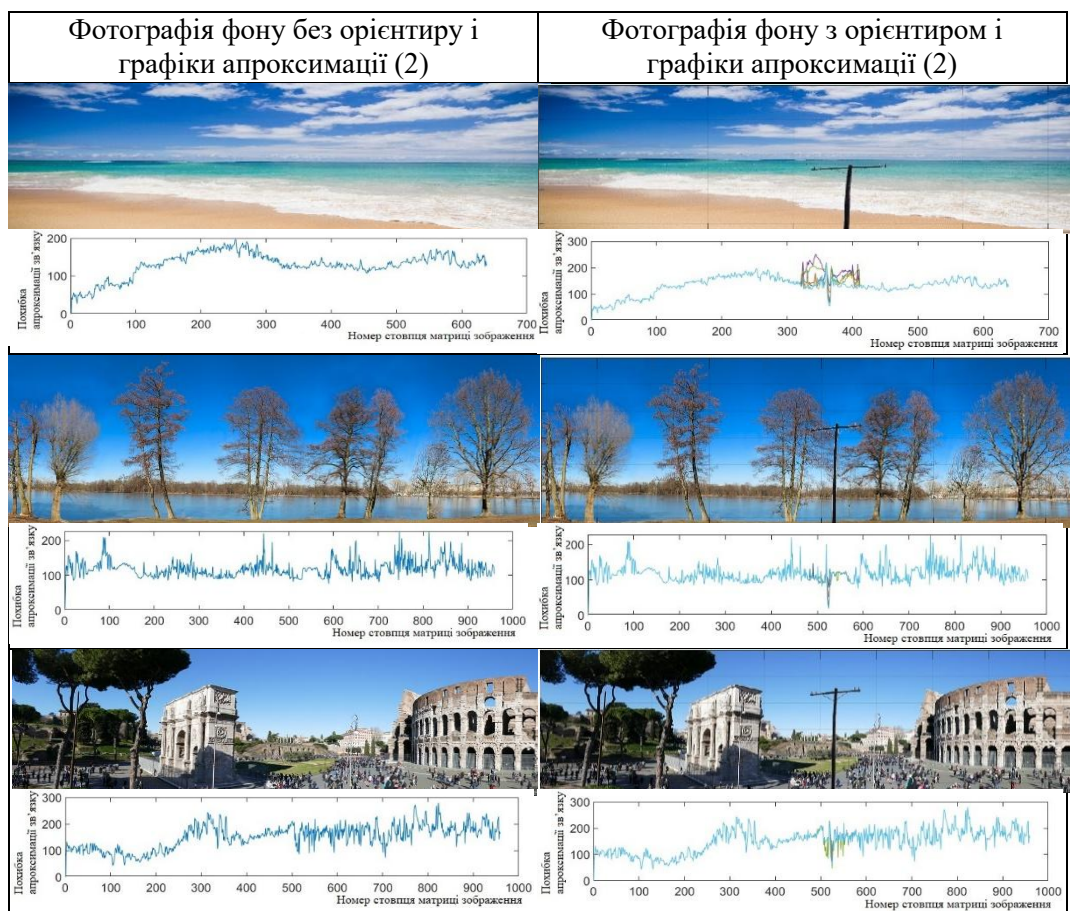


Fig.: 6. References: 21. Table: 1.

Висновки. Розроблена в статті нова математична модель кольоровості наземного орієнтиру для автономної навігації робота з урахуванням фону навколишньої місцевості є справедливою для будь-яких умов навігації автономного мобільного робота в денний час, коли застосовується скануюча відеокамера, яка може фіксувати кольорове зображення. Модель є лінійною, але може втрачати лінійність внаслідок різних причин, однією з яких є поява в зоні огляду камери об'єкту, який можна віднести до класу орієнтирів. Детальне вивчення основних причин втрати лінійності моделі може стати основою для загальної теорії виявлення і розпізнавання за ознаками кольоровості орієнтирів різних форм. Також лінійність втрачається при обробці неоднорідних фонів в наслідок чого для обробки останніх необхідно використовувати нелінійні моделі на основі апроксимації елементів матриці поліномом.

Інформаційні джерела

1. S. Margret Anuncia and J. Godwin Joseph. Approaches for Automated Object Recognition and Extraction from Images – a Study. - Journal of Computing and Information Technology - CIT 17, 2009, 4, 359–370. doi:10.2498/cit.1001363
2. T. Fukuda, S. Ito, F. Arai, Y. Yokoyama, Y. Abe, K. Tanaka, Y. Tanaka. Navigation system based on ceiling landmark recognition for autonomous mobile robot-landmark detection based on fuzzy template matching (FTM). - Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots
3. G. Novak; A. Bais; S. Mahlknecht. Simple stereo vision system for real-time object recognition for an autonomous mobile robot. - Second IEEE International Conference on Computational Cybernetics, 2004. ICCV 2004, DOI: 10.1109/ICCCYB.2004.1437710.

4. Jiang Yu Zhengt, Matthew Barth and Saburo Tsuji. Autonomous Landmark Selection for Route Recognition by A Mobile Robot. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California - April 1991.
5. Bolei Zhou, Agata Lapedriza, Aditya Khosla, Aude Oliva, and Antonio Torralba. Places: A 10 million Image Database for Scene Recognition. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, doi 10.1109/tpami.2017.2723009.
6. Mohammed Elmogy and Jianwei Zhang. Robust Real-time Landmark Recognition for Humanoid Robot Navigation. - Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Bangkok, Thailand, February 21 - 26, 2009.
7. Nils Bore, Rares Ambrus, Patric Jensfelt, and John Folkesson. Efficient Retrieval of Arbitrary Objects from Long-term Robot Observations. Robotics and Autonomous Systems Journal, Volume 91, May 2017, Pages 139-150.
8. Qazwan Abdullah, Nor Shahida Mohd Shah, Mahathir Mohamad, Muaammar Hadi Kuzman Ali, Nabil Farah, Adeb Salh, Maged Aboali, Mahmud Abd Hakim Mohamad, Abdu Saif. Real-time Autonomous Robot for Object Tracking using Vision System. – 2021, Distributed, Parallel, and Cluster Computing (cs.DC); Robotics (cs.RO), arXiv:2105.00852
9. Federico Furlán, Elsa Rubio, Humberto Sossa and Víctor Ponce. CNN Based Detectors on Planetary Environments: A Performance Evaluation. – Frontiers in Neurorobotics, pp. 63-70, Original research published: 30 October 2020 doi: 10.3389/fnbot.2020.590371.
10. Kyu Kyu Thin, Nay Win Zaw. Object Detection System of an Autonomous Mobile Robot by using Artificial Neural Network. - International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 9, Issue 3, March 2019.
11. Nilwong, Sivapong & Hossain, Delowar & Kaneko, Shin-ichiro & Capi, Genci. (2019). Deep Learning-Based Landmark Detection for Mobile Robot Outdoor Localization. Machines. 7. 10.3390/machines702002
12. Zhengxue Zhou, Leihui Li, Alexander Fürsterling, Hjalte Joshua Durocher, Jesper Mouridsen Xuping Zhang. Learning-based object detection and localization for a mobile robot manipulator in SME production. - Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 73, February 2022, 102229.
13. Seiji Aoyagi, Shota Ushiro, Masahito Fukuda, Tomokazu Takahashi, Masato Suzuki. Recognition and Grasping of Objects by Active Vision using Indoor Autonomous Mobile Robot. - Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, 2022 Volume 35 Issue 2, Pages 19-28.
14. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O. Detection of Landmarks by Mobile Autonomous Robots Based on Estimating the Color Parameters of the Surrounding Area. - In the book: Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Julio Cesar Rodríguez-Quinonez, (eds.). Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. - IGI Global, 2021, pp. 224-257. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch008
15. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lindner L. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. - The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Washington D. C., USA, October 21-23, 2018, pp. 3165...3170.
16. P. J. Schmid, L. Li, M. P. Juniper, O. Pust. Applications of the dynamic mode decomposition. – Theory of Computing Fluid Dynamics, 2010. – pp. 1-15.
17. Anatoli Torokhti, and Phil Howlett. Computational Methods for Modeling of Nonlinear Systems. Series: Mathematics in Science and Engineering. Elsevier, vol. 212, 2007, pp. 1-199. ISBN: 9780444530448.
18. Rowley, C. W., Mezic, I., Bagheri, S., Schlatter, S., and Henningson, D. S. Spectral analysis of nonlinear flows. - Journal of Fluid Mechanics, 2009, vol. 641, pp. 115-127.
19. J. Nathan Kutz, Steven L. Brunton, Bingni W. Brunton, and Joshua L. Proctor. Dynamic Mode Decomposition. - Data-Driven Modeling of Complex Systems, SIAM, 2016.- 241 p.
20. O. Poliarus, O. Koval, Ya. Medvedovska, Ye. Poliakov and S. Ianushkevych. Identification of a nonlinear inertial measuring pressure channel. - Ukrainian metrological journal, 2019, №1, с. 63-70.
21. Poliarus O., Poliakov Ye., Lebedynskyi A. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. - IEEE Sensors Journal, 2021, vol. 21, issue 10, pp. 11443-11450, doi: 10.1109/JSEN.2020.3010883

Poliarus O., Poliakov Ye., Ibragimov S., Khomenko Y.

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

A MODEL OF OBJECT COLOR ON THE BACKGROUND OF AN ARBITRARY TERRAIN

In recent years, interest in the use of autonomous mobile robots (AMR) in areas of human activity related to security and military operations has increased significantly. Such robots should be weakly dependent on GPS and independently navigate unfamiliar terrain in the interests of performing the task assigned to them. To do this, each robot must find an object on the territory that can be considered a ground landmark

The purpose of the article is to create a new objects color model, which in the future gives the opportunity to attribute these objects to landmarks and carry out their recognition in time close to real. For the first time, a method on the use of the "snapshots" method, i.e., the analysis of sequential images recorded on the matrix of the video camera in the process of scanning the space. The connection between adjacent color columns of images is provided by a transformation matrix that connects two adjacent color columns of image pixels by Moore-Penrose inversion. Approximation errors indicate the loss of linearity of the transformation, but at the same time can serve as a feature for the detection of a landmark by the robot. The mathematical model of a landmark color for autonomous robot with scanning video camera developed in the article, taking into account the background of the surrounding terrain, is valid for any navigation conditions in the daytime.

Keywords: autonomous mobile robot; landmark; the "snapshot" method; Frobenius norm; object color.

УДК 628.9; 681.2; 681.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-11

Симонюк В.П.¹, Божко К.М.², Пташенчук В.В.¹¹Луцький національний технічний університет²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

СПОСІБ ЗАМІРУ ОСВІТЛЕНOSTІ ІЗ АВТОНОМНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ ВІД СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Одним із основних пріоритетів при створенні мікроклімату у приміщеннях є професійний контроль рівня освітленості. Основним джерелом освітленості, звичайно, є природне сонячне освітлення. У разі відсутності чи недостатності необхідно застосовувати додаткові джерела освітлення. Тому, контроль освітленості та автоматизована система керування параметрами освітленості, потребують особливої уваги при проектуванні та експлуатації об'єктів виробництва, обслуговування, навчання, медичних закладах тощо. Задачею, яка ставилась, було створення способу заміру освітленості самодостатнім джерелом живлення пристрою з високою точністю вимірів освітленості, зручного у користуванні при невеликій його вартості. Поставлена задача вирішується шляхом розробки, виготовлення та дослідження пристрою для вимірювання освітленості у якому ця ж освітленість використовується в якості джерела живлення. Блок живлення пристрою, включає фотоприймач, роль якого виконує модернізований мендосинський двигун, а як самодостатнє джерело живлення використовується сонячна батарея.

Ключові слова: освітленість, вимірювання, точність, мендосинський двигун, сонячна енергія, сонячна батарея, інтенсивність світлового потоку.

Постановка проблеми. Переважна більшість всього живого на Землі існує завдяки процесам, що відбуваються як на мікроскопічному рівні, так і на рівні функціонування організму та напряду пов'язані зі світлом. Це стосується як рослин, тварин так і людей. Фізичний та емоційний стан людей безпосередньо пов'язаний із сонячним світлом. Навіть існує спеціальний медичний термін, що характеризує недостатність природного освітлення для людини – «світлове голодування» [1].

До наслідків та негативних явищ недостатності освітлення для людини, необхідно віднести суттєве зниження продуктивності праці, виникнення сонливості, що в свою чергу призводить до передчасної втоми навіть у працівника після відпочинку, знижує ефективність прийнятих рішень і дій, зростання ймовірності виникнення помилок, зростання захворювань, травм і навіть летальних випадків.

Одним з основних чинників при створенні мікроклімату у приміщеннях є професійний контроль рівня освітленості за допомогою приладів для визначення інтенсивності освітлення. Першочергово необхідно подбати про достатність сонячного освітлення, а у разі його недостатності, використовувати додаткові джерела освітлення. Візуального контролю ступеня освітленості, зазвичай, буває недостатньо, а прилади для його визначення необхідно застосовувати скрізь, де поставлено питання правильного розподілу та встановлення освітлення для виробничих та побутових потреб, закладів освіти, медицини і т.д. Причому, проводити вимірювання освітленості необхідно як під час встановлення систем освітлення так і періодично [1, 2]. В процесі експлуатації відбувається запиленість, помутніння, технічне спрацювання та ін. засобів освітлення. Це значно знижує рівень освітленості приміщень.

Метою роботи є розробка та дослідження системи заміру освітленості із автономним джерелом живлення від сонячної енергії на основі мендосинського двигуна.

Аналіз стану та постановка завдання. Існують певні світлові параметри які суттєво впливають на життєдіяльність та підлягають вимірюванню і контролю. До таких параметрів необхідно віднести: силу світла, світловий потік, яскравість, освітленість.

Одним зі способів вимірювання сили світла є спосіб, заснований на використанні фотометричної лави [1, 2, 3, 4]. На фотометричній лаві по обидві сторони розташовують джерела випромінювання, один з яких еталонний, а другий-досліджуваний. Між ними на

каретці пересувається фотометрична голівка. Пересуваючи каретку по фотометричній лаві, необхідно добитися фотометричної рівноваги полів порівняння.

Телецентричний метод є ще одним і не менш популярним методом визначення сили світла. Особливість цього методу полягає в незалежності результату вимірювань від відстані між джерелом світла та приймачем. Телецентричний метод вимірювання сили світла ґрунтується на можливості відокремлення (з допомогою простих оптичних засобів) і вимірювання світлового потоку, що поширюється від джерела всередині постійного і малого тілесного кута, і визначенні сили світла джерела у відповідному напрямку.

Для визначення світлового потоку джерела з довільним світлорозподіленням випромінювання в навколишньому середовищі користуються співставленням невідомого світлового потоку несиметричного джерела з попередньо визначеним світловим потоком зразкового джерела [1, 2, 4]. Таке співставлення виконується за допомогою пустотілої кулі достатньо великого діаметру, внутрішня поверхня якої рівномірно покрита білою фарбою, що розсіює світло відповідно до закону Ламберта, тобто за допомогою фотометричної кулі.

З усіх світлових величин яскравість найбільш безпосередньо пов'язана із зоровими відчуттями, так як освітленості зображень предметів на сітківці ока пропорційні яскравості цих предметів. В системі енергетичних фотометричних величин аналогічна яскравості величина називається енергетичною яскравістю.

Як відомо, при оцінці освітлення, головним показником є освітленість. Вимірювання освітленості у багатьох випадках здійснюється за допомогою фотоелектричних люксметрів, шкала яких проградуєвана безпосередньо в люксах [1, 3, 4]. Фотоелемент люксметра розташовують в тому місці, де повинна бути виміряна освітленість, і орієнтують таким чином, щоб його світлочутлива поверхня збігалася з об'єктом, що контролюється. При цьому необхідно враховувати, що в міру віддалення від джерела світло начебто «розмазується» більшою площею. Зазвичай люксметр має декілька шкал, які використовуються при вимірюваннях декількох поверхонь освітлення. Для визначення шкали, якою слід користуватися, в конструкції передбачений перемикач опорів, що входять в електричне коло люксметра.

Попри виготовлення та застосування великої гами приладів для визначення і контролю світлових параметрів, необхідно створювати нові розробки із новими якісними характеристиками.

Постановкою завдання даної роботи є розробка та створення об'єкту дослідження, а саме мендосинського двигуна, спеціального лабораторного стенду та проведення з його допомогою експериментальних досліджень параметрів і характеристик створеного засобу вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Задачею, яка ставилась, було створення способу заміру освітленості самодостатнім джерелом живлення пристрою з високою точністю вимірів освітленості, зручного у користуванні при невеликій його вартості. Поставлена задача вирішується шляхом розробки, виготовлення та дослідження пристрою для вимірювання освітленості у якому ця ж освітленість використовується в якості джерела живлення. Блок живлення пристрою включає фотоприймач, роль якого виконує модернізований мендосинський двигун (МД) [1, 4], а як самодостатнє джерело живлення використовується сонячна батарея.

Задачею, яка ставилась, було створення малогабаритного пристрою з високою точністю вимірів освітленості, зручного у користуванні при невеликій його вартості. Поставлена задача вирішується у способі виготовлення пристрою для вимірювання освітленості об'єктів, що включає створення системи індикації даних з блоком їх обробки, спорядження пристрою джерелом живлення та монтаж фотоприймача роль якого виконує мендосинський двигун, а як джерело живлення використовуємо сонячну батарею.

Даний прилад для вимірювання ступеня освітленості побудований за аналогією до люксметра але принцип його роботи дещо відмінний. Як відомо, принцип роботи люксметра полягає в перетворенні випромінювання фотоприймачем в електричний сигнал. Цей сигнал в подальшому перетворюється в цифрову індикацію числових значень освітленості. Значення освітленості відтворюються в люксах.

Мендосинський двигун (рис.1) є різновидом двигуна постійного струму без щіток, особливістю якого є магнітний підвіс ротора, а сам ротор містить сонячні панелі із двома обмотками кожна, які при обертанні ротора по черзі комутують фото-струм у обмотках внаслідок багатократної зміни освітленості фотоелектричної сонячної панелі (ФЕСП) при обертанні. Таким чином, роль комутатора обмоток виконує світло, яке потрапляє на поверхню ФЕСП синхронно із обертанням ротора.

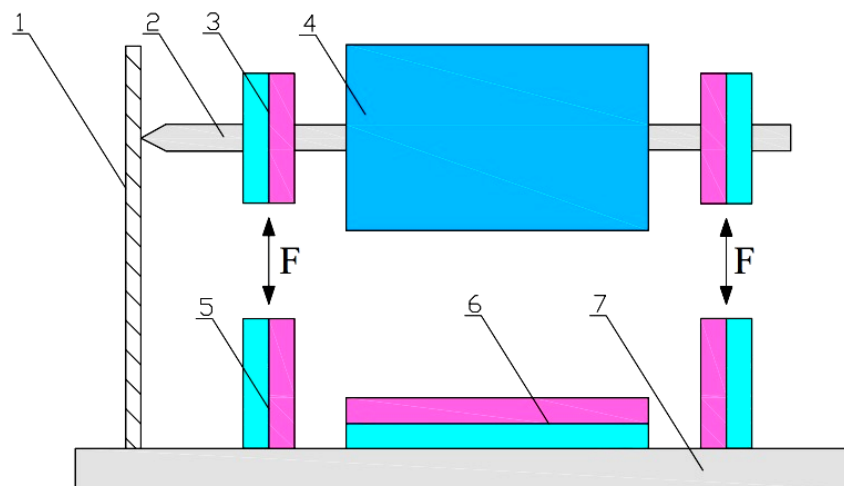


Рисунок 1 - Конструкція мендосинського двигуна:

1 – плита зі скла; 2 – вісь; 3 – магніт на осі; 4 – сонячний елемент з котушкою;
5 – магніт підшипник; 6 – магніт 7 – плита основи.

В даній конструкції система магнітів утворює підвіс, а для фіксації ротора, вісь двигуна торкається голчастим кінцем панелі із органічного скла. ФЕСП розташовані на валу ротора і утворюють барабан із чотирма, шістьма або іншою кількістю граней. Кожна із ФЕСП коротко замкнена через дві намотані в протилежному напрямі одна до одної електричні обмотки.

Фотострум, який виробляють ФЕСП при освітленні, створює магнітний потік, який взаємодіє із полем постійного магніту, який розташований в горизонтальній площині внизу під барабаном. Взаємодія магнітних потоків призводить до появи механічного моменту і призводить до обертального руху ротора. Наявність кількох пар обмоток потребує почергового їх вмикання і вимикання. Роль комутаторів тут виконує сам світловий потік: оскільки площа ФЕСП обертається, то світловий потік над кожною із них змінюється періодично від нуля до максимуму. Синхронно із цим починає протікати фотострум, який живить обмотки. Комутація струму тут відбувається внаслідок обертання і модуляції світлового потоку.

Для дослідження мендосинського двигуна був створений спеціальний лабораторний стенд у складі:

- галоген-вольфрамової лампи розжарення потужністю 150 Вт і розташованій в корпусі прожектора на рухомому кронштейні;
- мендосинського двигуна;
- дистанційних вимірювачів освітленості і температури;
- датчика обертового руху на фотодіоді із лабораторним джерелом живлення;
- цифрового осцилографу для відображення сигналів датчика руху і вимірювання частоти обертів двигуна.

Галоген-вольфрамова лампа розжарення є імітатором сонячного освітлення, її спектр найбільше наближений до сонячного спектру. Тому цю лампу використали в якості освітлювача.

Освітленість поверхні ФЕСП змінювали регулюванням висоти кронштейну освітлювача і додатково вимірювали люксметром MASTECH MS6612T в одній площині із ФЕСП (рис. 2). Використання люксметра в якості зразкового приладу є певною мірою паліативним рішенням, адже тут ми вимірюємо освітленість як фотометричну величину, а не енергетичну. Проте, за постійності температури лампи розжарення і незмінності її спектру випромінення покази люксметра будуть прямо пропорційні до енергетичної освітленості джерела. Щупом осцилографу знімали сигнал від фотодіоду.

За результатами лабораторних досліджень був знайдений діапазон лінійної залежності кутової швидкості від освітленості, а саме для значень освітленості від 600 Лк і вище. При меншій освітленості залежність є нелінійною внаслідок малого моменту на валу і великих механічних втрат. При розгоні мендосинського двигуна механічний опір стає сталим і залежність отримує лінійний характер.

Чутливість засобу вимірювання сонячної освітленості на основі мендосинського двигуна за результатами експерименту склала 86 об/хв на 1230 Лк або на 15,375 Вт/м².

При цьому співвідношення освітленості лампового імітатора в люксах і сонячної енергетичної освітленості взято із результатів попередніх досліджень [5]: 80000 Лк на 1000 Вт/м².

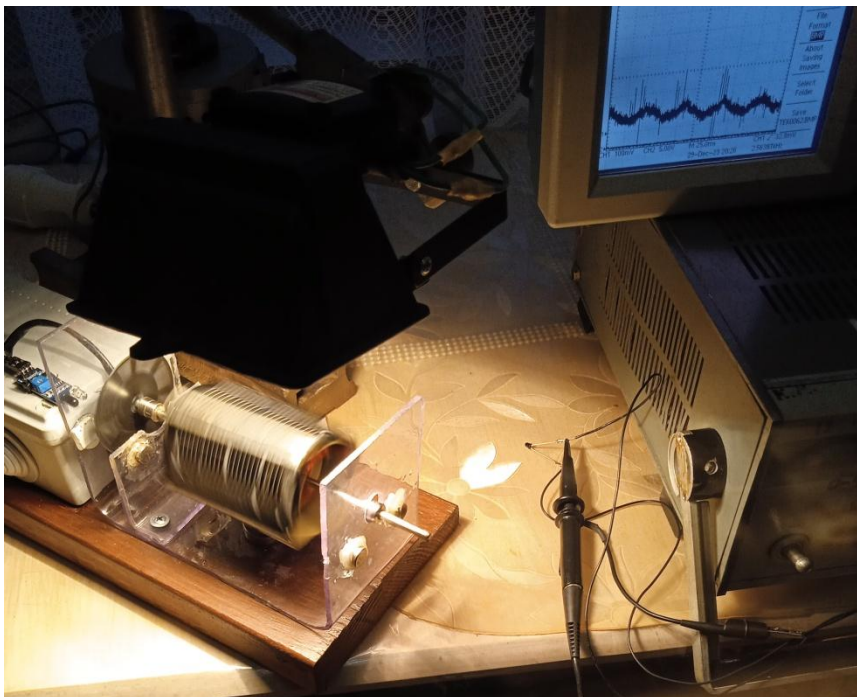


Рисунок 2 - Процес вимірювання кутової швидкості мендосинського двигуна

В результат лабораторних досліджень була отримана люкс-частотна характеристика двигуна на основі даних від осцилографа та люксметра. Графік швидкості двигуна від освітленості наведено на рис. 3.

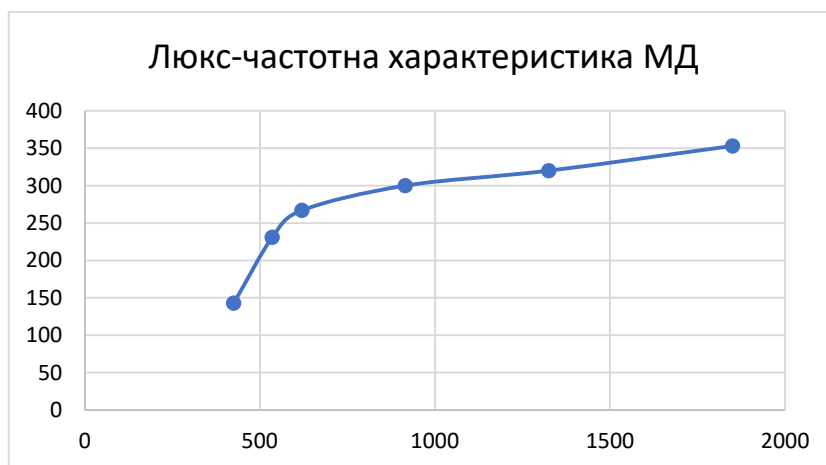


Рисунок 3 - Люкс-частотна характеристика мендосинського двигуна: по горизонтальній осі відкладено освітленість у Лк, по осі ординат – швидкість ротору в об/хв.

Остаточний результат розрахунку: чутливість дорівнює 5,6 об/хв/Вт/м². Невизначеність результату розрахунку має подвійну величину відносно до невизначеності вимірювання люксметром – 3%. Крім того, нелінійність люкс-частотної характеристики складає приблизно 2%. Оцінимо невизначеність чутливості як подвійну величину відносно невизначеності люксметра або в 6%. Таким чином, чутливість дорівнює $5,6 \pm 0,4$ об/хв/Вт/м².

Поле зору засобу вимірювання складає 360 градусів, оскільки при роботі двигуна кожна із ФЕСП обертається на повний кут. Для реалізації повної величини кута зору підставку для МД необхідно виконати прозорою, наприклад із органічного скла.

Спектральний діапазон засобу вимірювання сонячної освітленості на МД відповідає спектру поглинання кремнію і має діапазон від 300 до 1050 нм.

За допомогою годинника було виміряно часову характеристику МД: час реакції дорівнює 30 ± 5 с. Температурний відгук в діапазоні до 40 градусів за Цельсієм не був помічений, його оцінено в межах похибки або 1%. Нелінійність ЛЧХ оцінено за результатами експерименту в 2%.

Висновки. В результаті виконаних досліджень був виготовлений мандосинський двигун, розроблено та створено лабораторний стенд, за допомогою якого була отримана люкс-частотна характеристика мандосинського двигуна і визначені метрологічні параметри та характеристики засобу вимірювання сонячної освітленості на його основі. Діапазон лінійної залежності кутової швидкості від освітленості знаходиться в діапазоні значень від 600 Лк і вище. При меншій освітленості залежність є нелінійною внаслідок малого моменту на валу і великих механічних втрат. Чутливість засобу вимірювання сонячної освітленості на основі мандосинського двигуна за результатами експерименту склала 86 об/хв на 1230 Лк або на 15,375 Вт/м². Невизначеність методу вимірювання освітленості складає 6%.

Описаний спосіб та проведені натуральні дослідження його застосування підтвердили можливість використання даного способу. Це можуть бути прилади або стенди заміру освітленості в природних умовах стаціонарно, на транспорті, в повітряних зондах, а також з навчальною метою, в лабораторіях.

Інформаційні джерела

1. Симонюк В.П. До автоматизації освітленості виробничих приміщень за допомогою комбінованого освітлення /В.П. Симонюк, Ю.С. Лапченко, В.Ю. Денисюк, О.М. Решетило //Перспективні технології та прилади, вип. 19, 2021. С. 122-127. DOI: 10.36910/6775-5352-2021-19-20.
2. Сучасні люксметри – надійний контроль освітленості за будь-яких умов. [Електронний ресурс] / 16 червня 2020. <https://simvolt.ua/suchasni-luksmetri-nadiyniy-kontrol-osvitlenosti-za-bud-yakikh-umov/> (Дата звернення 28.11.2023 р.)
3. Daryl M. Chapin (1962). "Uses and Demonstrations". Bell System Science Experiment No. 2: Energy from the Sun. Bell Telephone Laboratories, Incorporated. p. 77.
4. Спосіб виготовлення пристрою для вимірювання освітленості об'єктів: пат. 144782 Україна, заявники та патентовласники В.О. Денисюк, В.П. Симонюк та Ю.С. Лапченко; №u144782; заявл. 10.05.2020; опубл. 27.10.2020.
5. K. Bozhko, N. Zashchepkina, I. Bozhko, "Linear current sweep and measuring the current-voltage characteristics of the solar panels", in Actual problems of modern science. Bydgoszcz, Poland, pp. 747-756, 2021. DOI: 10.31891/monograph/2021-10-1.
6. Васілевський О.М., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник / Вінниця : ВНТУ, 2015. 230 с.

Simonyuk V.¹, Bozhko K.², Ptashenchuk V.¹

¹ Lutsk National Technical University

²National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

METHOD OF MEASURING ILLUMINATION WITH AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY FROM SOLAR ENERGY

One of the main priorities when creating a microclimate in the premises is professional control of the level of illumination. The main source of illumination, of course, is natural sunlight. In case of absence or insufficiency, it is necessary to use additional sources of lighting. Therefore, lighting control and an automated lighting control system require special attention when designing and operating production, service, training, medical facilities, etc. facilities. The task that was set was to create a method of measuring illuminance with a self-sufficient power source of a device with high accuracy of illuminance measurements, convenient to use at a low cost. The task is solved by developing, manufacturing and researching a device for measuring illumination in which the same illumination is used as a power source. The power supply unit of the device includes a photo receiver, the role of which is performed by a modernized Mendosin engine, and a solar battery is used as a self-sufficient power source.

Keywords: Illumination, Mendoza engine, solar energy, solar battery, luminous flux intensity.

ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО ЗБІРНИКА «ПЕРСПЕКТИВНІ
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»**

1. Наукова стаття повинна мати наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290х210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтигула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об'ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1 см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: звичайний 12 пт., крупний індекс 7 пт., дрібний індекс 5 пт., крупний символ 18 пт., дрібний символ 12 пт.). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рисунок 1 –) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Таблиця (Таблиця 1 – ...) розташовується по лівому краю та вирівнюється по центру. Наприклад: Таблиця 1 – Результати зважування в статичному режимі.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов'язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім'я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Адреса для отримання збірника, e-mail, телефон.
- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові спеціальності:

- 131 Прикладна механіка;
- 132 Матеріалознавство;
- 133 Галузеве машинобудування;
- 163 Біомедична інженерія;
- 171 Електроніка;
- 172 Телекомунікації та радіотехніка;
- 174 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології;
- 175 Інформаційно-вимірювальні технології;
- 176 Мікро-та наносистемна техніка.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Ці спеціальності тісно пов'язані і доповнюють одна одну у сфері таких напрямків: прилади та системи фізичних та біомедичних технологій; прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні; проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки; метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація; проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України; фізика напівпровідників та діелектриків та фізика твердого тіла; прилади та методи вимірювання електричних, магнітних та механічних величин.

Редакційна колегія збірника забезпечує рецензування наукових статей, що подаються авторами до опублікування. Дотримані всі вимоги до редакційного оформлення наукового видання згідно державних стандартів України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: confkptm@gmail.com, в письмовому вигляді – за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:

- перевірка статті на відповідність вимогам;
- прийняття рішення щодо прийому статті;
- інформування авторів про можливість *публікації та дозвіл на оплату*.

Статті приймаються українською та англійською мовами. Вартість публікації становить **70 грн.** за 1 стор.

Реквізити на оплату: Луцький національний технічний університет ЄДРПОУ 05477296 Р/р UA558201720313201001201017820 Призначення платежу: За інформаційно-аналітичне забезпечення наукової діяльності від ППБ.

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою: confkptm@gmail.com.

Сайт видання <http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal>

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

Збірник наукових праць "Перспективні технології та прилади" індексується в Google Scholar, Crossref, Scientific Indexing Services у Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського, а також представлено у загальнодержавній технологічній платформі "Наукова періодика України".

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у головного редактора – **Марчука Віктора Івановича** за тел. 050-378-82-31, відповідального секретаря – **Пташенчука Віталія Віталійовича** за тел. 068-762-15-36 або за електронною адресою: confkptm@gmail.com.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

[illegible]

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Відповідальний за випуск Марчук В.І.
Технічний редактор: Пташенчук В.В.
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 27.12.2023 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 12,5. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.

Віддруковано у відділі іміджу та промоцій
Луцького національного технічного університету
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Свідоцтво Держкомтелерадіо ДК №4123 від 28.07.2011 р.