

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2024-25

Збірник наукових праць

Випуск 25
(грудень, 2024)

Луцьк 2024

УДК 004, 545, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку науково-технічною радою Луцького національного технічного університету, протокол №6 від 18 грудня 2024 р.

Зареєстрований Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення №40 від 11.01.2024 р.). Ідентифікатор R30-02458
ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» м. Луцьк, грудень 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. 154 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.

Контактна інформація:

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	Повстяной Олександр Юрійович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, 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	Богуш Вісніці (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	Коломієць 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 кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
21	Луців Ігор Володимирович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної інженерії, Державний університет «Житомирська політехніка», 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	Приступа 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 металорізючі 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	Яворський Богдан Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
32	Ярошевич Микола Павлович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
33	Григор'єва Наталія Сергіївна , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
34	Тулашвілі Юрій Йосипович , доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук, Луцький національний технічний університет, Україна.
35	Захарчук Віктор Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
36	Пальчевський Богдан Олексійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
37	Решетило Олександр Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
38	Гуменюк Лариса Олександрівна , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
39	Кайдик Олег Леонтійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
40	Симонюк Володимир Павлович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
41	Дагмар Цаганова (Dagmar Caganova) , Prof. M.A., Ph.D., Institute of Industrial Engineering and Management, Faculty of Materials Science and Technology STU, Slovakia
42	Євсюк Микола Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
43	Хвищун Микола В'ячеславович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
44	Заблоцький Валентин Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
45	Селєпина Йосип Романович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
46	Мороз Сергій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
47	Лищук Віктор Васильович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
48	Луньов Сергій Валентинович , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики, Луцький національний технічний університет, Україна.
49	Павло Комада (Paweł Komada) , dr hab. inż., katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Lubelska, Poland

ЗМІСТ	
Bukovsky O., Vysloukh S. EFFICIENCY OF ADAPTIVE ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF INTERBLOCK ELECTRICAL CONNECTIONS	7
Imbirovych N., Povstianoi O., Karbovska Yu., Tkachuk V. MORPHOLOGY OF COATINGS ON TITANIUM ALLOY WITH THE ADDITION OF BIOCOMPONENTS	12
Moroz S., Tkachuk A., Lyshuk V., Zablotskyi V., Shchavyi I. FEATURES OF GENERATING THE OUTPUT SIGNAL OF THE INFRARED RADIATION SENSOR	17
Грудецький Р. Я., Маркіна Л. М., Пльотка Б. С., Сацик В. О. ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СМАРТ-СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ДО ПІДРОЗДІЛІВ ОРГАНІЗАЦІЇ	24
Вовк М. А., Гуменюк П. О. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ БРОДІННЯ ВІНОМАТЕРІАЛУ	30
Грудецький Р. Я., Турич В. Ю., Сацик В. О. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ERP СИСТЕМИ "ODOO" У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ПРИКЛАДІ ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ	36
Дашковська О. П., Книш О. І., Дзюба С. В. КОНТРОЛЬ ВЕЛИЧИНИ ПЕРЕХІДНИХ ОПОРІВ НУЛЬОВОГО ПРОВОДА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖІ	47
Денисюк В. Ю. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ І ПРОЄКТУВАННЯ АКТЮАТОРІВ ДИСКРЕТНОЇ ДІЇ	53
Дорожинська Г. В. ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОНІКИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ	59
Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Міхєєв А. О., Четвержук Т. І. УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ТРАЄКТОРИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ВЕРСТАТА НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ПІДШИПНИКАХ	64
Когут В. М., Витвицька Л. А. РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО ЕКСПРЕС- КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЛАКІВ І ФАРБ	73
Кузнєцов Ю. М., Кобець І. Р. ЧОТИРЬОХКООРДИНАТНИЙ НАСТІЛЬНИЙ ВЕРСТАТ ПОРТАЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ	79
Кулакевич О. Р., Грудецький Р. Я., Сацик В. О., Маркіна Л. М. РОЗРОБКА ІОТ: IOS - ЗАСТОСУНОК ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОБЛАДНАННЯМ	88
Місько В. М., Гуменюк Л. О. СЕГМЕНТАЦІЯ МЕДИЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ПОРОГОВИМИ МЕТОДАМИ	93

Назаренко О. А., Банзак О. В., Грабовський О. В., Банзак Г. В. РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ	98
Осінов С. М. ЕФЕКТ БІОЛОГІЧНОГО ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ У БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ	105
Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сацик В. О. ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ КРОХМАЛЕВМІСНОГО ЗАМІСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	111
Рассовський В. Л., Зайцев Є. О., Левицький А. С. ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРІ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ	117
Роман В. І., Масняк О. Я., Костик І. В. ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ	123
Федосов С. А., Захарчук Д. А., Глушпенко А. ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ GPS	131
Фетісенко С. В., Гуменюк Л. О. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМІВ ГРУПОВОЇ ПОВЕДІНКИ РОБОТІВ	136
Швець С. В., Швець Р. С., Швець У. С. ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА СИЛУ РІЗАННЯ	141

UDC 621.3.011

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-01

Bukovsky O., Vysloukh S.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF ADAPTIVE ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF INTERBLOCK ELECTRICAL CONNECTIONS

The article discusses the current challenges associated with the control of the parameters of cable and wire products, especially in the context of interconnection electrical connections. It is noted that traditional methods of control often do not correspond to dynamic changes in operating conditions, which leads to an increased level of defects. Given these limitations, the study focuses on the need to implement adaptive algorithms that not only improve measurement accuracy but also provide immunity to external interference. The literature review shows the active use of automated control systems, but the emphasis is on insufficient attention to adaptive algorithms that could significantly improve the quality of control. Among the methods considered, adaptive algorithms such as Adam, Levenberg-Marquardt, LMS, and RLS prove to be effective tools for improving the objectivity and performance of control systems. Their implementation allows systems to respond faster to changes in production conditions, increasing the reliability and stability of production processes. An important aspect is the integration of adaptive technologies into specialized software of automated control systems, which expands the capabilities of existing methods and can significantly reduce the negative consequences of self-heating during measurement.

Thus, the studies carried out demonstrate that an adaptive approach to parameter control not only improves the accuracy and stability of products, but also brings modern production systems closer to high quality standards. This allows you to ensure the reliability of the electrical infrastructure, which is critical for the successful functioning of various electrical systems.

Key words: *electrical systems, production process, interblock electrical connections, parameter control, performance, accuracy, reliability, efficiency, stability, testing, control methods, automated control system, adaptive algorithms, optimization.*

Problem Statement. In today's production environment, which requires continuous quality control and product stability, especially in sectors where interconnect electrical connections are used, the challenge is to improve the accuracy and reliability of parameter control systems. Existing methods are often not able to quickly adapt to dynamic changes in operating conditions, which leads to an increased level of defects and constant fluctuations in product quality.

Taking into account the above factors, there is a problem of development and implementation of improved adaptive methods of parameter control. This implies not only improving the accuracy of measurements, but also increasing immunity to external interference and internal nonlinearities. This approach should ensure the speed of response to changing conditions and continuous self-improvement of systems, which is important for maintaining high quality standards in the production of cable and wire products. Thus, the key task is the integration of new adaptive technologies that are able to provide the necessary accuracy, stability and efficiency in the processes of controlling production parameters.

Analysis of the latest research. Analysis of existing research in the field of control of parameters of interblock electrical connections of cable and wire products indicates the active use of automated control systems. In King, M. S. [1] and Ng, F. M. [2] article discussed the general issues of control of the parameters of interconnected electrical connections, emphasizing the importance of increasing the speed and accuracy of control of insulation parameters. Works by Khouri, P. M. P. [3] and Hershberger, D. [4] solve the problem of automating the process of testing electrical connections by describing the developed systems and test methods that can be useful for production processes. Research by Ng, F. M. [5] and Kakkeri, R. B. [6] are dedicated to solving the problems of error protection in insulation resistance control systems, emphasizing the importance of checking the key parameters of cable products. The work of Bodyansky E. V. [10] is devoted to the study of adaptive control of computer network security on the basis of fuzzy logic. This approach is useful for the development of systems for controlling the parameters of interblock electrical connections using adaptive algorithms.

Thus, a review of the literature on the control of parameters of interblock electrical connections shows that today insufficient attention is paid to the development and implementation of adaptive algorithms in the relevant control systems. Existing studies do not fully reveal the influence of changing product characteristics and production conditions on measurement accuracy.

It is obvious that the introduction of adaptive algorithms in the systems for monitoring the parameters of interblock electrical connections is an urgent task that will increase the accuracy of parameter measurement, reduce control time, increase control reliability and increase production productivity.

Further research in this direction should be aimed at the introduction of adaptive algorithms in systems for controlling the parameters of interblock electrical connections, taking into account the changing characteristics of products and production conditions.

Summary of the main material. One of the main directions of implementation of adaptive algorithms in the direction of parameter control is to clarify the characteristics of controlled signals [1]. The use of such algorithms is aimed at improving the productivity and accuracy of the parameter control process, which is critical in today's production environment. Accordingly, production systems, especially those that work with cable and wire products, require reliable and efficient control methods to ensure high quality and product stability. In this context, it is important to consider the possibilities and advantages of using adaptive algorithms to improve the process of controlling the parameters of interblock electrical connections in modern production. The Levenberg-Marquardt (LM) algorithm is an efficient nonlinear optimization method used to solve nonlinear minimization problems [2]. It is used in a wide range of areas, including optimizing model parameters, approximating functions, and more. The algorithm is based on a combination of gradient descent methods and Newton's method [3]. Unlike Newton's method, which can fail in the case of a non-inverted Hesse matrix, LM uses a quasi-Newtonian update of the Hesse matrix to ensure stability and convergence. This algorithm is effective in solving optimization problems that include minimizing error functions, which can be useful for analyzing the electrical parameters of cables and selecting optimal settings.

Mathematically, the Levenberg-Marquardt algorithm can be represented in the following sequence of actions:

- 1) The error gradient $J(p)$ is calculated according to the model p parameters.

$$\nabla J(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p}, \quad (1)$$

- 2) The parameters of the model are updated according to the formula:

$$p_{k+1} = p_k - (H + \lambda I)^{-1} \nabla J(p), \quad (2)$$

where H is the Hesse matrix (the matrix of the second derivatives of the error function); λ – regularization parameter; I – a unit matrix.

- 3) The new value of the error function is evaluated $J(p_{k+1})$.

4) If the new value of the error function is less than the previous one, the parameter λ is reduced and the transition to the next iteration is performed. If the new value is larger, λ is increased and iteration is repeated.

- 5) Steps 1-4 are repeated until the specified accuracy or maximum number of iterations is reached.

It is advisable to use the LM algorithm to optimize the parameters of models used to analyze electrical connections in the control system. It allows you to quickly and efficiently adapt models to changing conditions and provides resistance to noise and nonlinearity. Also, the Levenberg-Marquardt method provides rapid convergence and reliability of solving optimization problems, which will allow to effectively adapt the parameters of the control system. The use of this adaptive algorithm will improve the efficiency of cable control by optimizing system performance and adapting to changing conditions.

The adaptive algorithm "Adam" (Adaptive Moment Estimation), which can also be effective for use in the system for controlling the parameters of interblock electrical connections, combines the ideas of adaptive learning speed and gradient moment [4, 5]. It uses exponentially smoothed gradient and gradient square estimates to adapt parameter updates. This algorithm can be used to optimize the parameters of models that analyze the electrical parameters of cables. It allows you to effectively train models, taking into account different scales of gradients, and adapt to changing production conditions.

Parameter update formulas are presented as follows:

$$m_{k+1} = \beta_1 m_k + (1 - \beta_1) \nabla J(w_k), \quad (3)$$

$$s_{k+1} = \beta_2 s_k + (1 - \beta_2) (\nabla J(w_k))^2, \quad (4)$$

$$m_{k+1} = \frac{m_{k+1}}{1 - \beta_1^{k+1}}, \quad (5)$$

$$s_{k+1} = \frac{s_{k+1}}{1 - \beta_2^{k+1}}, \quad (6)$$

$$w_{k+1} = w_k - \frac{\alpha}{\sqrt{\hat{s}_{k+1} + \varepsilon}} \cdot \hat{m}_{k+1}, \quad (7)$$

where m_k and s_k are exponentially smoothed estimates of the first and second moments of the gradient, respectively; β_1 and β_2 – exponential smoothing parameters; α – learning step; ε is an additional parameter for numerical stability.

Adam's algorithm adaptively updates the parameters taking into account the first and second moments of the gradient, which allows you to work efficiently at the learning rate and store information about the gradient [6]. Adaptive adjustment of the learning rate for each parameter allows for faster training coincidence and avoids gradient attenuation or impulsive growth.

For signal noise filtering and parameter analysis, it is advisable to use filters based on the recursive adaptive least-squares algorithm (RLS) [7]. The use of adaptive filtering will help to improve the accuracy of measurements and ensure reliable control of cable parameters in various operating conditions. In the case of a signal received, one or more implementations of this process must be processed. To do this, you need to find the filter coefficients w , which minimize the error rate (8) of signal reproduction [8].

$$J(w) = \sum_{t=0}^{T-1} |e(t)|^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

If we continue the matrix notation of the t -coordinate, we get the formulas for the column vector of the output signal a (9) and the error of reproduction of the input signal e (10) [7].

$$a = U^T w \quad (9)$$

$$e = m - U^T w, \quad (10)$$

where m is the vector-column of sampling signal counts; $U = [u(0), u(1), \dots, u(T-1)]$ is a matrix, whose columns display the contents of the delay line at different cycles.

The error rate expression (8) can be rewritten with the representation a in matrix form as follows

$$J(w) = e^T e \rightarrow \min. \quad (11)$$

Substituting (9) and (10) for (11), we get (12)

$$J(w) = (m - U^T w)^T (m - U^T w) = m^T m - w^T U m - m^T U^T w + w U U^T w. \quad (12)$$

To determine the minimum value of the objective function, it is necessary to calculate the gradient of this function and equate the resulting value to zero (13).

$$\text{grad} J(w) = -2U m + 2U U^T w = 0, \quad (13)$$

Thus, the optimal solution is:

$$w = (U U^T)^{-1} U m, \quad (14)$$

In the process of receiving the signal, the filter coefficients can be directly calculated according to equation (14) at each subsequent step. At the same time, the size of the matrix U continues to increase, and the inverse matrix $(U U^T)^{-1}$ needs to be recalculated each time. However, the computation costs can be reduced if you consider that each step only requires the addition of a new column to the matrix U and a new element to the vector m so that the value can be calculated recursively. The use of the adaptive RLS algorithm will provide the ability to obtain useful signals in the process of monitoring the connection almost without distortion [9]. The ability of filters to adapt to changing environmental conditions and respond quickly to changes will allow you to effectively detect anomalies and ensure stability in parameter control. Another effective means of filtering signals is the adaptive least-squares algorithm (LMS), which is a simple and effective method of adaptive filtering used to process signals in various systems [10]. Its main task is to find the optimal filter parameters that help minimize the deviation between the output and expected signals. Let's consider the mathematical implementation of this algorithm. Let the input discrete random signal $n(t)$ be processed by a non-recursive discrete order filter N , whose coefficients can be represented by a column vector $w = [w_0, w_1, \dots, w_N]^T$, then the output signal of the filter is:

$$a(t) = u^T(t) w, \quad (15)$$

where $u(t) = [x(t), x(t-1), \dots, x(t-N)]^T$ is the column vector of the content of the filter delay line in the t -th step.

The reproduction error (16) of the sample signal $m(t)$ is accordingly defined as:

$$e(t) = m(t) - a(t) = m(t) - u^T(t) w, \quad (16)$$

The adaptive algorithm needs to find such filter w coefficients that ensure the maximum proximity of the input signal $a(t)$ to the reference one $m(t)$, i.e. minimize the error $e(t)$. Since $e(t)$ is also a random process, it is reasonable to take the RMS value as a measure of its magnitude, then the function to be optimized (17) can be defined as:

$$J(w) = \overline{e^2(t)} \rightarrow \min, \quad (17)$$

$$e^2(t) = (m(t) - u^T(t)w)^2 = m^2(t) - 2m(t)u^T(t)w + w^T u(t)u^T(t)w. \quad (18)$$

Statistically averaging the expression (18), we get (19)

$$J(w) = \overline{e^2(t)} = \overline{m^2(t)} - 2\overline{m(t)u^T(t)w} + \overline{w^T u(t)u^T(t)w}, \quad (19)$$

where $\overline{m^2(t)} = \sigma_d^2$ is the middle square of the reference signal; $\overline{m(t)u^T(t)} = p^T$ – transposed column vector of mutual correlations p between the t -th sample signal and the content of the filter delay line u ; $\overline{u(t)u^T(t)} = R$ is a correlation matrix of a signal having the size of $(N + 1) \times (N + 1)$.

The method of fastest descent, based on the search for the minimum of the objective function (19), is the main criterion for adapting the least-squares algorithm. When using this optimization method, the coefficient vector w should be recursively updated as follows (20)

$$w(t + 1) = w(t) - \frac{\mu}{2} \text{grad}J(w(t)) = w(t) + \mu \cdot p - \mu R w(t), \quad (20)$$

where μ is the size of the gradient descent step; p – column vector of mutual correlations between t -th reference of the sample signal and the content of the filter delay line; R is a correlation matrix of a signal having the size of $(N + 1) \times (N + 1)$.

The algorithm converges if $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$, where λ_{\max} is the maximum eigenvalue of the correlation matrix R , but to calculate the gradient you need to know the values of the matrix R and the vector p . In practice, only estimates of these values derived from input data may be available. The simplest estimates are the instantaneous values of the correlation matrix (21) and the mutual correlation vector (22), which are obtained without any averaging:

$$R(t) = u(t)u^T(t); \quad (21)$$

$$p(t) = m(t)u(t). \quad (22)$$

When using these estimates, formula (20) takes the form (23)

$$w(t + 1) = w(t) + \mu u(t) (m(t) - u^T(t)w(t)), \quad (23)$$

The expression in parentheses, according to (16) represents the filtering error $e(t)$, taking this into account, the expression for the recursive update of the filter coefficients is (24)

$$w(t + 1) = w(t) + \mu e(t)u(t). \quad (24)$$

The main advantage of the LMS algorithm is its extreme computational simplicity – to adjust the filter coefficients at each step, you need to perform $N + 1$ multiplication-addition operations [11]. The consequence of this is slow convergence and increased error variance in the steady-state mode – the filter coefficients always fluctuate around the optimal values, which increases the level of output noise.

The selected adaptive Adam algorithms, adaptive filtering (LMS or RLS) and adaptive Levenberg-Marquardt algorithm, are the most appropriate for the system for monitoring the parameters of interconnect electrical connections in the production of cables. They allow you to effectively adapt to changing operating conditions and provide fast convergence and reliability in solving optimization problems. The LMS can be used for signal filtering and adaptive parameter control, while the RLS can be used to predict future cable parameter values and effectively respond to changes in operating conditions. The use of these algorithms will help improve the quality of cable parameter control, ensuring stable and reliable operation of the control system.

Conclusions. Studies have shown that effective control of the parameters of cable and wire products is a decisive factor for ensuring the quality and reliability of electrical infrastructure, which includes such important issues as the connection of power supplies to end consumers, the installation of electrical devices, as well as integration in distribution assemblies and internal power grids. The variety of types of cable and wire products requires a careful approach to the control of their parameters, which is carried out using various automated methods, limited only by the capabilities of the equipment.

It has been found that under conditions of limited traditional methods, the use of adaptive algorithms in control systems provides a significant improvement in the control process, demonstrating high efficiency of adaptation to a rapidly changing environment and various production parameters. It has been proved that adaptive algorithms, such as Adam, Levenberg-Marquardt, as well as filtering using LMS and RLS algorithms, can significantly increase the objectivity and productivity of monitoring the parameters of interblock electrical connections.

Integration of these adaptive algorithms into specialized software for automated control systems not only increases the accuracy and reliability of measurements, but also allows you to efficiently use resources and expand the capabilities of existing systems. This approach helps to reduce almost all negative factors associated with self-heating during measurement, thereby improving the overall stability and quality of products.

References

1. King M. S., & Iannello C. J. (2011). Evaluation of Cable Harness Post-Installation Testing. NASA Technical Reports Server.
2. Ng F. M., Ritchie J. M., Simmons J. E. L., & Dewar, R. G. (2000). Designing cable harness assemblies in virtual environments. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3), 37-43.
3. Khouri, P. M. P., Walsh, M. J., Brandl, C., & Rybachuk, M. (2021). Design and automation of electrical cable harnesses testing system. *Microelectronics Reliability*, 120, 114097.
4. Hershberger, D., Dawson, J., Lehman, A., Yurek, J., & Ball, J. (2012). Electrical Cable Harness Tester.
5. Jiang X., Koo K.-M., Kikuchi K., Konno A., Uchiyama M. (2011). Robotized Assembly of a Wire Harness in a Car Production Line. *Advanced Robotics*, 25, 473-489
6. Kakkeri, R., Inamdar, L., Bhambare, S., & Gund, A. (2017). Distributed cable harness tester. *International*.
7. Bi Z., Pomalaza-Ráez C., Hershberger D., Dawson J., Lehman A., Yurek J., & Ball J. (2017). Automation of electrical cable harnesses testing. *Robotics*, 7(1), 1.
8. Nevliudov V. A., Demaska N. P., Razumov-Fryziuk Ye. A., Novoselov S. P. (2020). Kontrol yakosti elektrychnykh mizhziednan hnuchkykh struktur. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, (1), 103-112.
9. Mazulevskyi O. Ye. (2005). Adaptivnyi kontrol zakhyshchenosti kompiuternoї merezhi na osnovi nechitkoї lohiky. *Adaptivni systemy avtomatychnoho upravlinnia*, (8), 62-66.
10. Bodyanskyi, E. V., Shafronenko, A. Yu., and Klimova, I. M. Method of adaptive reliable fuzzy clustering of data based on the evolutionary algorithm. *Collection of scientific papers of the Kharkiv National University of the Air Force*. 2021. № 2 (68). pp. 80-83. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.68.10>.
11. Bukovskyi O., Vysloukh S. "Systema avtomatyzovanoho kontroliu parametriv mizhblokovykh elektrychnykh ziednan" // *KhIKh Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh "Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u prykladobuduvanni"*; Kyiv, PBF, KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2023. p. 89-92.

Буковський О. М., Вислоух С. П.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕФЕКТИВНІСТЬ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІЖБЛОКОВИХ З'ЄДНАНЬ КАБЕЛЬНО-ПРОВІДНИКОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті розглянуто сучасні виклики, пов'язані з контролем параметрів кабельно-провідникової продукції, особливо в контексті міжблокових електричних з'єднань. Відзначено, що традиційні методи контролю часто не відповідають динамічним змінам умов експлуатації, що призводить до підвищеного рівня дефектів. Враховуючи ці обмеження, дослідження зосереджено на необхідності впровадження адаптивних алгоритмів, які не лише підвищують точність вимірювань, але й забезпечують стійкість до зовнішніх перешкод. Проведений огляд літератури свідчить про активне використання автоматизованих систем контролю, але акцентується недостатня увага до адаптивних алгоритмів, що могли б суттєво покращити якість контролю. Серед розглянутих методів, адаптивні алгоритми, такі як Адаптивний, Левенберга-Марквардта, LMS і RLS, виявляються ефективними інструментами для підвищення об'єктивності та продуктивності систем контролю. Їх впровадження дозволяє системам швидше реагувати на зміни виробничих умов, підвищуючи надійність і стабільність виробничих процесів. Важливим аспектом є інтеграція адаптивних технологій у спеціалізоване програмне забезпечення автоматизованих систем контролю, що розширює можливості існуючих методів і дозволяє значно зменшити негативні наслідки саморозігріву під час вимірювання.

Таким чином, виконані дослідження демонструють те, що адаптивний підхід до контролю параметрів не лише покращує точність і стабільність продукції, але й наближає сучасні виробничі системи до високих стандартів якості. Це дозволяє забезпечити надійність роботи електричної інфраструктури, що є критично важливим для успішного функціонування різноманітних електротехнічних систем.

Ключові слова: електротехнічні системи, виробничий процес, міжблокові електричні з'єднання, контроль параметрів, продуктивність, точність, надійність, ефективність, стабільність, тестування, методи контролю, автоматизована система контролю, адаптивні алгоритми, оптимізація.

UDC 620.197.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-02

Imbirovych N., Povstianoi O., Karbovska Yu., Tkachuk V.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

MORPHOLOGY OF COATINGS ON TITANIUM ALLOY WITH THE ADDITION OF BIOCOMPONENTS

In this work, the method of plasma electrolytic oxidation on a titanium alloy with the introduction of calcium-containing components and bioadditives in the form of diatomite into the coating is widespread. In order to increase the biocompatibility of the synthesized surface, working environments and coating application modes were developed. The study of the stage nature of PEO in such electrolytes allowed predicting the properties of coatings in the future depending on the requirements for their roughness.

Key words: *plasma electrolytic oxidation, anodic, cathodic, alkaline, hydroxylapatite, diatomite, roughness, porosity.*

Formulation of the problem. Attractive properties of titanium alloys make them widely used in many branches of modern industry. Titanium and its alloys are characterized by their high inert properties, making them indispensable for the manufacture of implants, and the advantageous combination of specific strength and density makes them particularly attractive for aircraft [1–4]. However, difficult operating conditions, increased requirements for high quality require the search for new methods of processing such alloys.

Promising methods are the application of coatings with high corrosion and mechanical properties. An important condition for such coatings may be the possibility of additional creation of a widely developed surface (highly porous surface with high roughness) [5–7]. Such a solution makes it possible to make titanium implants indispensable in orthopedic surgery.

The plasma electrolytic oxidation method refers to electrochemical methods of coating application. The advantages of the method are control of the composition, structure and properties of coatings. The synthesized coatings are characterized by high adhesive intermolecular bonds between the base and the coating, which makes this method particularly attractive. The environmental friendliness of the PEO method allows it to compete with known coating application methods, such as vacuum arc spraying, surface ion bombardment, the SHS process, etc.

Analysis of recent research and publications. Wouter Habraken, Pamela Habibovic, Matthias Epple and Marc Bohner raise the issue of implant placement worldwide. The authors describe the bleak prognosis for treatment of patients with osteoporosis-related injuries, with as many as 20% of such patients not surviving the first year after surgery. Some experts predict that less than 30% of hospital beds will be occupied by patients with osteoporosis [8]. Bone replacement surgery is already second only to the most widespread blood transfusion procedure. Scientists such as Carayon M.T., Lacout J.L., have analyzed the relevance of bone segment implantation in the world. In their work [9] they note that there are about 2 million bone transplants in the world, of which 0,5 million were performed in the USA. In 2010, global sales of bone tissue substitutes reached 1,3 billion US dollars with a forecast of 10% annual growth and a volume of 2,7 billion dollars [9].

Such data provide an understanding of the great need for biomaterials in the world. Therefore, the problems of our time require the search for new ideas for the production of new technologies for the creation of innovative biomaterials that would be characterized by biocompatibility, bioactivity, osteoinductivity, bioresorption [10]. The surface chemistry of biomaterials plays an important role in determining the organism's response and biocompatibility [11, 12].

Two main approaches to solving this issue have emerged: the search for bioenvironments [13–16] and technologies for creating biomaterials [17–20].

Setting objectives. The main objective of this work was to develop a technology for plasma electrolytic oxidation (PEO) of titanium alloys in an environment with hydroxylapatite and diatomite. To determine the impact of this technology on the change in biocompatible properties, a necessary condition is to establish the porosity and roughness of the synthesized coatings. High indicators of such properties indicate high biocompatibility of the coatings.

To explain the nature of the formation of biocoatings by the PEO method, a necessary condition is the synthesized stages, at which it is possible to study the dependence of the change in voltage at the anode on the synthesis time.

Knowing the impact of adding biocomponents to the working environment on changing regimes allows us to predict coating properties in the future.

Presenting main material. PEO coatings were applied to various metal substrates with different electrolytes in alternating current mode. The work investigated a biocompatible ceramic layer of TiO₂ composition with the content of hydroxylapatite (HAp) and diatomite, applied to the titanium alloy Ti-6Al-4V. For the synthesis of the coating, a titanium sample was used as the anode, and a stainless steel (electrolytic bath) was used as the cathode. In order to determine the gradation of the synthesis process of oxide ceramic coatings, the change in voltage at the anode during the entire coating build-up process was investigated. In order to analyze the influence of individual electrolyte components on the PEO phases, the operating synthesis parameters were experimentally selected.

First, PEO coatings were applied to titanium alloy samples in the presence of electrolytes containing KOH alkali, liquid glass, sodium pyro- and polyphosphate based on distilled water without the addition of additives. Later, HAp and diatomite nanoparticles were added to the electrolyte. Table 1 shows the synthesis modes of coatings on Ti alloy by the PEO method in different electrolytes.

Table 1 – Modes of synthesis of PEO coatings on Ti alloy

№ sample	Components electrolyte, g/l							Processing time τ , min	Current density, I_a/I_c , A/dm ²
	KOH	(Na ₂ O(SiO ₂) _n)	Ca(OH) ₂	Na ₄ P ₂ O ₇	Na ₆ P ₆ O ₁₈	HAp	diatomite		
1	5	5	-	-	-	-	-	60	1,25
2	10	10	0,5	-	-	-	-	120	1
3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	-	100	1
4	5	5	5	5	5	1	-	60	1
5	20	20	20	20	20	-	20	60	1

According to the obtained values of the synthesis voltage, its decrease is observed in electrolytes with a larger number of components (Fig. 1).

The exception is the synthesis of the coating in the electrolyte with the addition of only calcium hydroxide (Fig. 1, curve № 2). This effect is explained by the high energy consumption of the system.

When the concentration of KOH and liquid glass components is increased by half, the initial voltage at the anode decreases by only 8 V, but increasing the concentration of these same components by 1,5 times by introducing Ca(OH)₂ into the system reduces the initial voltage. This fact also indicates a decrease in the conductivity of electrolytes when calcium hydroxide is included in their composition.

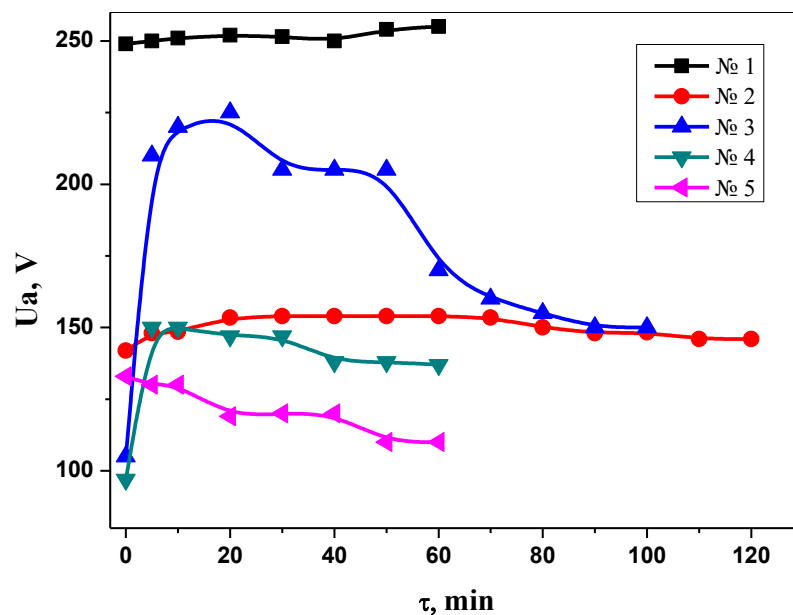


Figure 1 – The course of coating synthesis in electrolytes № 1, 2, 3, 4, 5 (see Table 1)

It should also be noted that the synthesis of the coating in the electrolyte with slaked lime occurs evenly, that is, in this case, areas of rapid increase and decrease in voltage at the anode are eliminated. Hydroxyapatite has the greatest structural similarity to bone, so the content of this component in the coating makes it a highly biocompatible material. The addition of diatomite (natural silica) to the electrolyte helps increase the porosity and roughness of the surface, increasing antibacterial properties. Fig. 2 shows samples of Ti alloy with coatings containing HAp and diatomite.

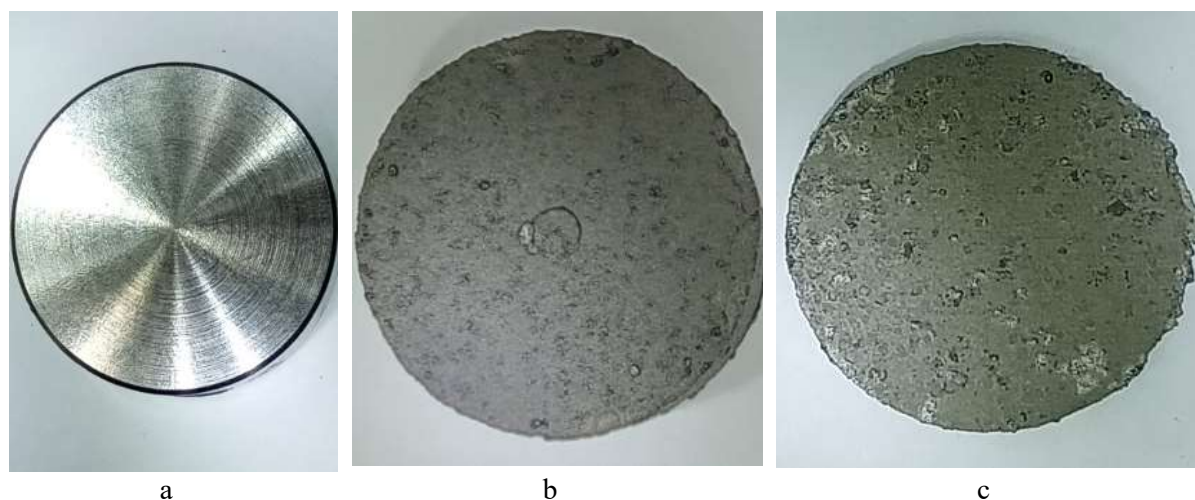


Figure 2 – Titanium alloy before surface treatment (a) and after synthesis in an electrolyte with HAp (b) and diatomite (c) (sample diameter 10 mm)

In this work, the surface morphology of the synthesized coatings was investigated. The study data indicate the presence of pores in all coatings (Fig. 3).

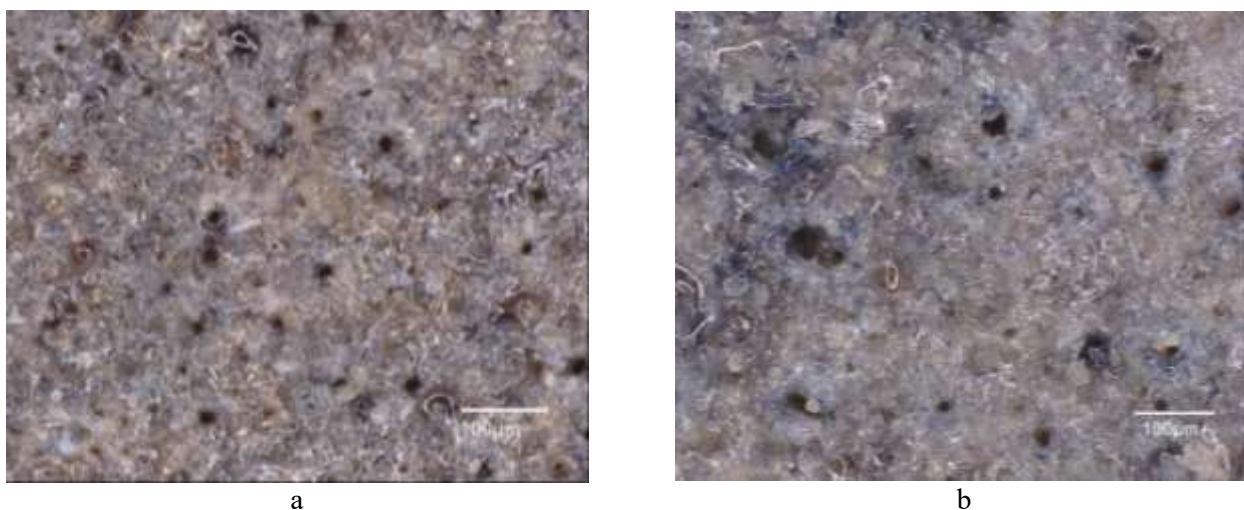


Figure 3 – Pores on the surface of PEO coatings: a – режим № 4, b – режим № 5 (see Table 1)

Studies of surface roughness make it possible to establish the biocompatibility of this type of coating, because it was described above that implants with high roughness take root faster and thereby help reduce the time for the rehabilitation period after surgery. Fig. 4 shows the results of a study of the roughness of PEO coatings synthesized on a titanium alloy in a diatomaceous earth environment.

The results obtained established a high surface roughness of the synthesized coatings on titanium alloy by the PEO method. The established values of the coating roughness exceed approximately twice the roughness of the coatings synthesized in an electrolyte with hydroxylapatite.

In the electrolyte containing alkali and phosphates, coatings with an average roughness $Rz=51 \mu\text{m}$, $Ra=8,7 \mu\text{m}$ are formed. By increasing the current density to $4/4 \text{ A/dm}^2$, the surface roughness increases slightly. The introduction of 20 g/l of diatomite into the electrolyte and an increase in the current density by another 1 A/dm^2 at the anode and cathode reduces the surface roughness to the values $Ra=6,6 \mu\text{m}$, $Rz=40,1 \mu\text{m}$.

Thus, the obtained results allow us to establish the dependence of the diatomite content on the roughness of the synthesized coatings. It was found that adding diatomite to the electrolyte in an amount

of 20 g/l allows us to obtain a surface with a widely developed morphology. This effect has a positive effect on the biocompatibility and osseointegration of PEO coatings.

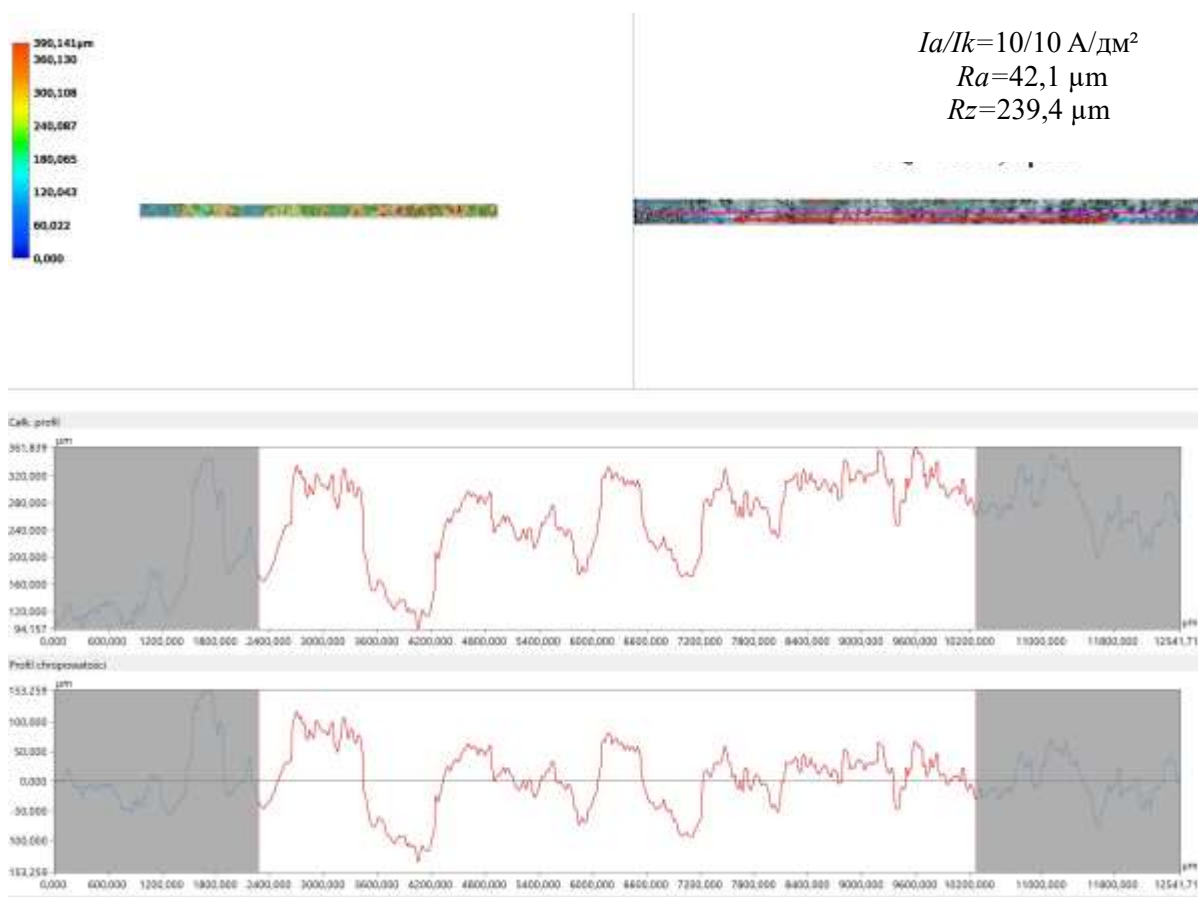


Figure 4 – Profilogramme of the coating synthesized according to mode № 5

Conclusions. As a result of the experiments, it can be noted that titanium-based coatings formed in alkaline electrolytes with hydroxylapatite and diatomite are porous. In addition, high surface roughness was established when forming it in an electrolyte with diatomite. It was found that adding diatomite to the electrolyte makes it possible to increase the roughness of the coatings to the value $Rz=119,7 \mu\text{m}$. A longer oxidation time of the titanium alloy in the electrolyte with diatomite leads to an increase in the roughness of the coatings. Thus, in 30 minutes of synthesis, coatings with $Rz=119,7 \mu\text{m}$ are formed, and when applying surface treatment for 1 hour, the roughness of the coatings doubles.

References

1. Marin E., Lanzutti A. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review. *Materials*, 2024, Vol. 17, P. 114.
2. Geetha M., Singh A., Asokamani R., Gogia A. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review, *Progress in Materials Science*, Volume 54, Issue 3, 2009, Pages 397-425.
3. Kaur M., Singh K. Review on Titanium and Titanium Based Alloys as Biomaterials for Orthopaedic Applications. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2019, 102, P. 844-862.
4. Bocchetta P., Chen L.-Y., Tardelli J.D.C., dos Reis A., Almeraya-Calderón, F., & Leo P. (2021). Passive layers and corrosion resistance of biomedical Ti-6Al-4V and β -Ti alloys. *Coatings*, 11(5), article number 487. doi: 10.3390/coatings11050487.
5. Aliasghari S., Skeldon P., & Thompson G. (2014). Plasma electrolytic oxidation of titanium in a phosphate/silicate electrolyte and tribological performance of the coatings. *Applied Surface Science*, 316, 463-476. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.08.037.
6. Babaei K., Fattah-alhosseini A., & Molaei M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on aluminum and its alloys: A review. *Surfaces and Interfaces*, 21, article number 100677. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100677.

7. Imbirovych N., Zvirko O., & Kurzydowski K. (2023). Morphology and porosity of the surface of titanium alloys after plasma-electrolytic oxidation in an alkaline environment with diatomite. *Materials Science*, 59(4), 451-458. doi: 10.1007/s11003-024-00797-4
8. Wouter Habraken, Pamela Habibovic, Matthias Eppl, Marc Bohner. Calcium phosphates in biomedical applications: materials for the future? *Materials today*, Vol. 19 (2) P (2016). 69-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970211500317X?via%3Dihub>
9. Carayon M., Lacout J. Study of the Ca/P atomic ratio of the amorphous phase in plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. *J. Solid State Chem.* 2003; 172:339-50.
10. Mann S. *Biomaterialization. Principles and concepts in bioinorganic materials chemistry.* Oxford Univ. Oxford, UK: Press; 2001. 198 p.
11. Kaur M., Singh, K. Review on Titanium and Titanium Based Alloys as Biomaterials for Orthopaedic Applications. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2019, 102, pp. 844-862.
12. Tomashov N., Altovsky R., Chernova G. Passivity and Corrosion Resistance of Titanium and Its Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 1961, pp.108-113.
13. Hugo R Fernandes, Anuraag Gaddam, Avito Rebelo, Daniela Brazete, George E Stan, José M F Ferreira. Bioactive Glasses and Glass-Ceramics for Healthcare Applications in Bone Regeneration and Tissue Engineering. *Materials* 2018, 11(12), 2530; <https://doi.org/10.3390/ma11122530>
14. Xiaopeng Lu, Carsten Blawert, Mikhail L. Zheludkevich, Karl Ulrich Kainer. Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition. *Corrosion Science.* Vol 101, (2015), P. 201-207.
15. Стан електролітної плазми в процесі синтезу оксидокерамічних покриттів на магнієвій основі [Електронний ресурс] / В. М. Посувайло, Н. Ю. Імбірович, М. Д. Клапків, С. І. Остап'юк, Ю. М. Коваль. Наукові нотатки. 2013. Вип. 42. С. 208-215. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_42_35
16. Birampally Kalyani, Navaneetha Pujari, Avula Edukondalu, M. Srinivasa Reddy, C.P. Vardhani. Effect of Bi₂O₃ on AC conductivity and dielectric properties of alkali arsenate bro-bismuthate glasses. *Materials Letters.* Vol. 317, (2022), P. 132128. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132128>
17. Cui F., Luo Z. Biomaterials modification by ion-beam processing. *Surface and Coatings Technology.* Vol. 112 (1-3), (1999), P. 278-285. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00763-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00763-4)
18. Gnedenkov A., Sinebryukhov S., Filonina V., Gnedenkov S. Hydroxyapatite-containing PEO-coating design for biodegradable Mg-0.8Ca alloy: Formation and corrosion behaviour. *Journal of Magnesium and Alloys*, (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.002>
19. Mashtalyar D., Nadaraia K., Plekhova N., Imshinetskiy I., Piatkova M., Pleshkova A., Kislava S., Sinebryukhov S., Gnedenkov S. Antibacterial Ca/P-coatings formed on Mg alloy using plasma electrolytic oxidation and antibiotic impregnation. *Materials Letters.* Vol. 317 (2022), P. 132099 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132099>
20. Klavkiv M., Povstyana N., Nykyforchyn H. Production of conversion oxide-ceramic coatings on zirconium and titanium alloys. *Materials Sciencethis link is disabled*, 2006, 42(2), pp. 277-286.

Наталія Імбірович, Олександр Повстяной, Юлія Карбовська, Віталій Ткачук
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МОРФОЛОГІЯ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ З ДОДАВАННЯМ БІОКОМПОНЕНТІВ

У даній роботі поширений метод плазмового електролітичного оксидування на титановому сплаві з введенням в покриття кальційвмісних компонентів і біодобавок у вигляді діатоміту. З метою підвищення біосумісності синтезованої поверхні розроблено робочі середовища та режими нанесення покриття. Дослідження стадійної природи ПЕО в таких електролітах дозволило прогнозувати властивості покриттів у майбутньому в залежності від вимог до їх шорсткості.

Ключові слова: плазмове електролітичне окислення, анодне, катодне, лужне, гідроксилапатит, діатоміт, шорсткість, пористість.

UDC 621.3.088

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-03

Moroz S., Tkachuk A., Lyshuk V., Zablotskyi V., Shchavyi I.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

FEATURES OF GENERATING THE OUTPUT SIGNAL OF THE INFRARED RADIATION SENSOR

The paper deals with infrared radiation detectors that can register the thermal radiation of a living organism. The human body has a temperature in the range from 31°C to 42°C, depending on the heat exchange between the skin and the environment, and infrared radiation in the wavelength range from 4 to 50 microns. The analysis of the phenomenon of the pyroelectric effect and the features of the use of pyroelectric sensitive elements, which are the basis of the operation of the sensors, has been carried out. The principles of the formation of thermal radiation in the detection zone of the sensor are given, and the formulas for determining the amount of radiation of the thermal flux are presented. The process of forming the output signal during the action of thermal energy on the sensor was studied. It has been established that for the rational use of methods and algorithms for improving the interference immunity of an infrared sensor, it is necessary to know the main parameters of the signal, namely the amplitude, shape, duration, dependence on the speed of human movement, and background temperature. Experimental graphs of the shape and spectrum of the signal at the input of the pyroelectric sensor under different input conditions are presented. The influence of temperature contrast on the formation of the sensor output signal is analyzed.

Keywords: sensitive element, pyroreceiver, IR radiation, signaling, sensitivity zone.

Introduction. Sensors based on a pyroelectric sensitive element are widely used for various needs. These are security alarms, automatic lighting systems, etc. The basis of the operation of such sensors is the registration of infrared radiation (IR) of a living body using a sensitive element. Infrared radiation is a type of electromagnetic wave, the wave-length of which is longer than that of visible light (0.74 μm), but shorter than that of radio waves (1...2 mm). Such radiation cannot be seen by the human eye, but it has thermal energy that can be recorded [1].

The human body has a temperature in the range of 31°C to 42°C, which depends on the heat exchange between the skin and the environment. It is a source of IR radiation in the wavelength range from 4 to 50 μm [2]. At the same time, the radiation density of the skin of the human body is: with a wavelength of up to 5 μm – up to 1%; with a wavelength from 5 to 9 μm – 20%; with a wavelength from 9 to 16 μm – 30%; with a wavelength over 16 μm – over 41% (Fig. 1). The human body emits infrared energy with a peak wavelength of 9 μm to 10 μm . In addition, the peak wavelength of infrared rays emitted by a heated object becomes shorter as the temperature increases [3].

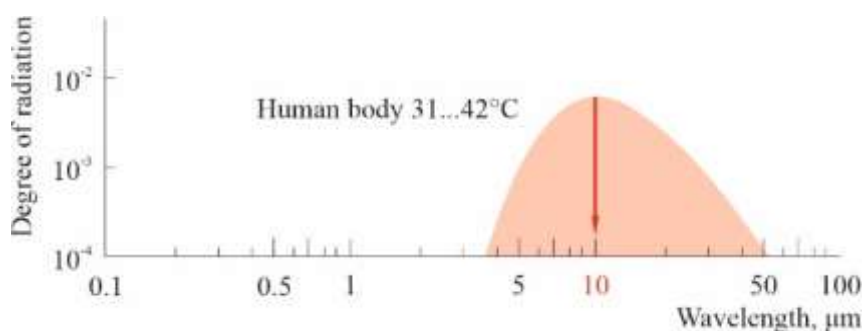


Figure 1 – Distribution of human body radiation by wavelength [3]

To understand the possibilities of using pyroelectric sensors for specific cases, it is necessary to analyze the pyroelectric effect, the principles of the formation of heat flows in the detection zone, and how the output signal is formed when thermal energy acts on the sensor [4].

Literature revive. The principle of operation of the sensitive sensor element is that some crystalline materials are characterized by the property of being polarized under the influence of IR radiation. Along with the change in radiation intensity, polarization is carried out and, as a result, a dipole moment is created in a crystal made of materials called pyroelectrics [2, 5]. By detecting the difference in potentials formed as a result of polarization between different regions of the pyroelectric crystal, it is possible to observe the amount of thermal IR radiation (Fig. 2). The principle of operation of IR sensors consists of the registration of thermal signals emitted by objects in the area of the sensor. The useful

signal at the output of a single-surface receiver, depending on the radiation, is determined by the formula (1) [6]:

$$S(t) = S_U \Delta Q(t) \quad (1)$$

where S_U is the voltage sensitivity of the radiation receiver; $\Delta Q(t)$ is a change in the amount of heat flow that enters the input hole of the optical system and occurs in the event of movement of the object in the area of the sensor.

The maximum value of $\Delta Q(t)$ occurs if the object completely falls into the detection zone of the IR sensor. Let's take this value as ΔQ . Consider the option if the losses in the optical system are small enough to be neglected. Let's determine ΔQ through the object's parameters and the environment's background. Suppose that within the background (the absolute temperature of the surface of which is T_b and the emissivity E_b), an object with the absolute temperature T_{ab} and the emissivity E_{em} appears [7, 8].

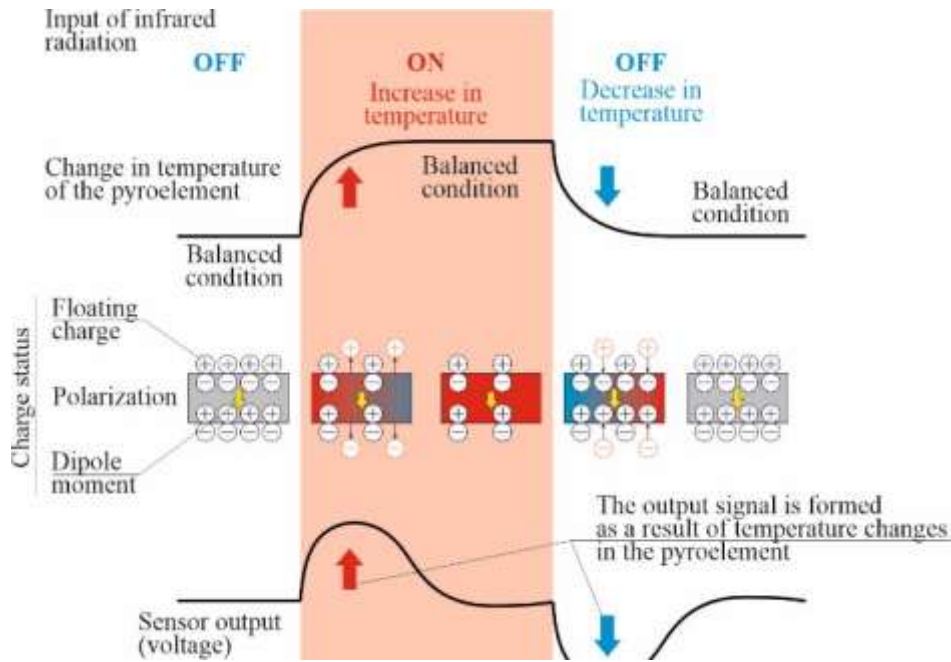


Figure 2 – The phenomenon of the pyroelectric effect [7, 8]

We will denote the area of the projection of the object on the plane that is perpendicular to the direction of radiation by S_{em} , and the area of the projection of the background in the field of view by S_b [9]. For such a case, the amount of heat flow that enters the optical system inlet before the observation object appears is determined by the formula (2):

$$Q_b = L_b \frac{S_b S_{in}}{l_b^2} \quad (22)$$

where l_b is the distance from the entrance hole to the background surface; L_b – is background brightness; S_{in} – is the area of the entrance hole of the optical system.

The value of the heat flow, which is created by the object of observation, is determined by formula (3):

$$Q_{ab} = L_{ab} \frac{S_{ab} S_{in}}{l^2} \quad (3)$$

where l is the distance from the sensor to the observation object; L_{ab} is the brightness of the observation object.

In the presence of an object of observation, the total heat flow entering the inlet created by the object and a separate part of the background surface not shielded by the object is determined by the formula (4):

$$Q_{\Sigma} = L_b \frac{S_b S_{in}}{l_b^2} + L_{ab} \frac{S_{ab} S_{in}}{l^2} = L_b \frac{S_{in}}{l_b^2} \left(S_b - \frac{S_{ab}}{l_b^2} l^2 \right) + L_{ab} \frac{S_{ab} S_{in}}{l^2} \quad (4)$$

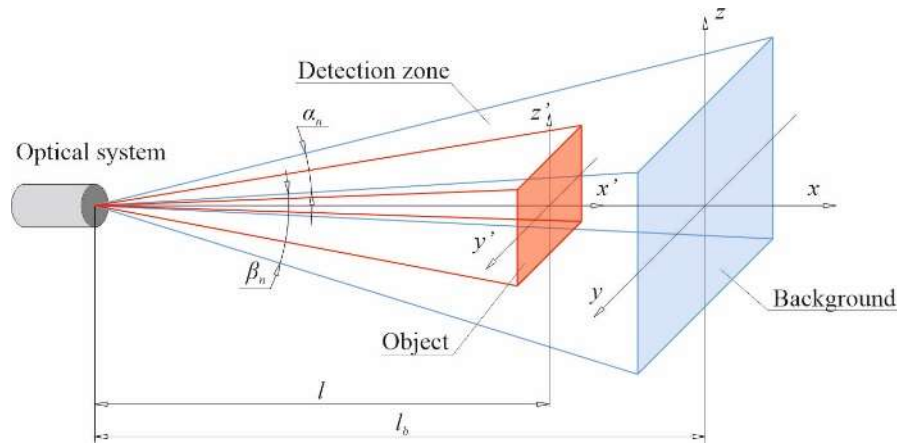


Figure 3 – Scheme of the detection zone of the infrared pyroelectric sensor [8]

The change in heat flux radiation ΔQ is determined by formula (5):

$$\Delta Q = \frac{S_{ab} S_{in}}{l^2} (L_{ab} - L_b) \quad (6)$$

Let's accept the statement that Lambert's law is fulfilled for the object of observation and the background, so we determine the luminances L_{ab} and L_b through the emissivity and absolute temperatures:

$$L_b = \frac{\delta_0 E_b T_b^4}{\pi}, \quad L_{ab} = \frac{\delta_0 E_{em} T_{ab}^4}{\pi} \quad (7)$$

where $\delta_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ is the Stefan-Boltzmann constant.

Substitute formula (6) into formula (5) and get the expression for ΔQ taking into account the absolute temperature and emissivity of the observation object and the background:

$$\Delta Q = \frac{\delta_0 S_{in} S_{em}}{\pi l^2} [E_{em} T_{ab}^4 - E_b T_b^4] = \Delta E S_{in} \quad (8)$$

Given the given parameters of the optical system and the radiation receiver, the signal value is completely determined by the change in the irradiance of the sensitive element. It is known that the emissivity of human skin is very high and is on average 0.99 relative to a completely black body at wavelengths longer than $4 \mu\text{m}$ [10]. In the IR region of the spectrum, the optical properties of skin radiation are quite close to the characteristics of black body radiation [11].

The temperature of the skin depends on the heat exchange between the skin and the environment. Thus, at an air temperature of $+25^\circ\text{C}$, the temperature on the surface of a person's palm varies within the range of $+32...+34^\circ\text{C}$, and at an air temperature of $+19^\circ\text{C}$, it varies within the range of $+28...+30^\circ\text{C}$. The presence of clothing reduces the thermal radiation of the object because the temperature of the clothing is lower than the temperature of bare skin. If the temperature around the object is $+25^\circ\text{C}$, then the average temperature of the body surface of a clothed person is approximately $+26^\circ\text{C}$. Other parameters included in the formula (7) can take on different values that depend on the specific situation and/or input data [12].

Research methodology. To establish relationships between the structural elements of the infrared sensor and the influence of external environmental factors on the output signal from the sensor, theoretical research methods were used, in particular, the phenomenon of the pyroelectric effect and the dependence of the sensitivity of the receiver on thermal radiation were analyzed [13].

Observation, measurement, and experiment methods were used to confirm the de-scribed phenomena. In particular, infrared transmitters with two-element pyroreceiv-ers were used. The movement of an object emitting infrared (thermal) radiation was simulated in the detection zone of the sensor. A spectroanalyzer was used to remove the output signal from the sensor. The resulting spectrogram was analyzed by shape and spectrum. To obtain data based on which the output signal was analyzed, an experimental study of the movement of a thermal object was carried out at different speeds at different distances from the pyroelectric receiver [14].

Results. We will analyze the process of generating signals for the sensor, the main types of interference, and extraneous influences that cause false operation of the IR sensor.

Signal generation. To understand the methods and algorithms for improving the in-terference immunity of the IR transmitter, it is necessary to know the main parameters of the signal – amplitude, shape, duration ΔE , dependence on the speed of human movement, and background temperature:

$$\Delta E = \frac{\delta_0 S_{em}}{\pi l^2} [E_{em} T_{ab}^4 - E_b T_b^4] \quad (9)$$

Consider, for example, one detection zone, the length of which is 10 m, and the beam's diameter at the base of the cone is 0.3 m. Let us assume that a person crosses the zone normally with different speeds (V_{\max} , V_{\min}) at a distance from the receiver of 10.5 and 1 m. The signal's shape in the case of crossing the beam at a distance of 10 m has a triangular shape with a maximum when the detection zone is completely covered (Figure 4a). Figure 4b shows the spectrum of this signal. If the beam crossing occurred at a shorter distance, the signal acquires a trapezoidal shape with steep fronts (Figure 5a) and the spectrum of this signal takes on the form shown in Figure 5b.

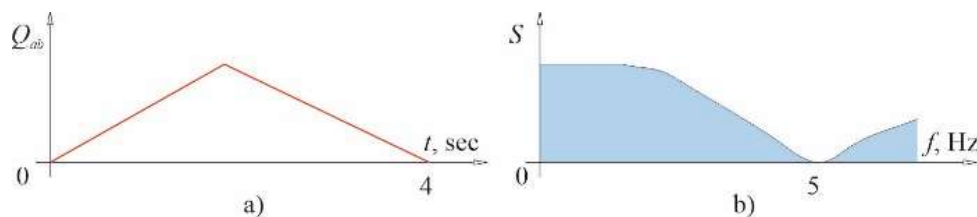


Figure 4 – The shape and spectrum of the signal at the input of the pyroelectric sensor under the conditions of D_{\max} , V_{\min} .

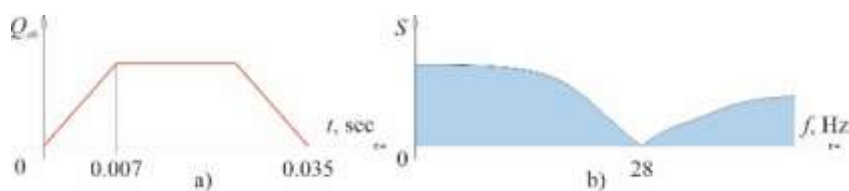


Figure 5 – The form and spectrum of the signal at the input of the pyroelectric sensor under the condition of D_{\min} , V_{\max} .

It was found that the duration of the output signal is inversely proportional to the speed of the object and the distance to the sensor. The real output signal differs from the ideal due to various distortions introduced by the amplification path and the influence of chaotic noises created by various temperature fluctuations in the background. Recordings of real signals obtained using a passive IR detector are shown in Figure 6. The figure also shows its spectral characteristics, which were obtained using a spectroanalyser.

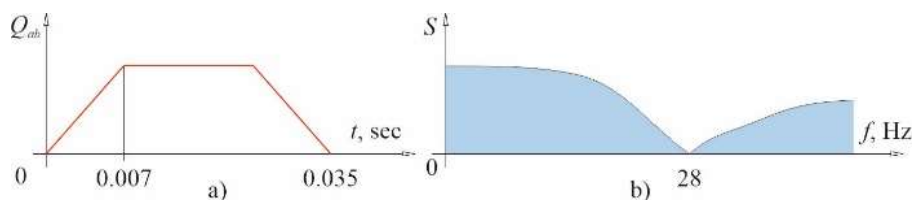


Figure 6 – Graphs of the change in the signal at the output of the pyroelectric sensor (a) and spectrograms of the signals (b).

The analysis of the graphs established the spectral range that is necessary for the transmission of signals generated when crossing the detection zone in the entire range of object speeds from 0.1 to 15 Hz. At the edges of the range, there is a possibility of weakening the signal, since the pyroreceiver has a frequency response with a drop in the region of 5...10 Hz. For its compensation, it is necessary to introduce an amplifier into the signal processing path, which provides a rise in the frequency response in the region of 5...20 Hz.

Usually, the amplitude of the output signal is determined by the temperature contrast between the human body and the background on which the detection beam is directed. Since the background temperature changes with the room temperature, the output signal also changes, which is proportional to their difference. At the point where the temperature of the person and the background coincide, the value of the output signal is zero. In the region of higher temperatures, the signal changes sign. The background temperature in the room reflects the temperature of the air outside the room with some delay, which is due to the thermal inertia of the wall materials and the way the building is insulated.

Temperature contrast depends on the temperature of the outer surface of a person, which is affected by clothing. Moreover, it is necessary to take into account that if a person enters a room where an IR motion detector is installed, for example, from a cold street, then at the first moment the thermal contrast is quite significant. Gradually, as the temperature of the clothes adapts to the temperature of the room,

the signal decreases significantly. However, even after a long stay indoors, the amount of the input signal depends on the type of clothing. Figure 7 shows experimental dependences of the temperature contrast of a person on the temperature around the object. The dashed line shows the extrapolation of experimental data for temperatures above $+40^{\circ}\text{C}$.

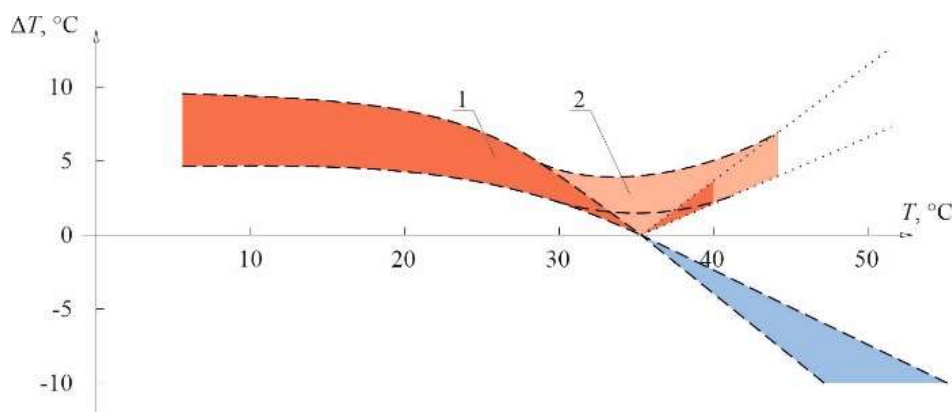


Figure 7 – Dependence of the temperature contrast of a person on the temperature of the environment.

Area 1 is a range of contrasts depending on the shape of the clothes, the type of background, the size of the person, and the speed of his movement. The transition of the value of the temperature contrast through zero occurred only if in the temperature range of $30...39.5^{\circ}\text{C}$ the measurements were carried out after the adaptation of the object in the heated room for 15 minutes. In the case of the invasion of an object that was previously in a room with a temperature below 30°C or outdoors with a temperature of 44°C , into the sensor's sensitivity zone, the signal levels in the temperature range of $30...39.5^{\circ}\text{C}$ lie in regions 2 and do not reach zero.

The temperature distribution on the human surface is not uniform. It is closest to 36°C on exposed parts of the body - the face and hands, and the temperature of the surface of clothes is closer to the background of the room. Therefore, the signal at the input of the pyro receiver depends on which part of the body overlaps the radiant zone of sensitivity.

Let's analyze the influence of interference that causes false operation of passive IR sensors. These are the effects of the external environment or internal noises of the receiving device of the transmitter, which are not related to the movement of the object in the sensitivity zone.

There is the following classification of obstacles:

- thermal, which is caused by heating the background of the room under the influence of solar radiation, convection air flows from the operation of radiators, air conditioners, drafts, etc.;
- electrical, caused by guidance from sources of electrical and radio radiation on individual elements of the electronic part of the IR sensor;
- own, which are caused by the noise of the pyroreceiver and the input signal amplification path;
- extraneous, which is associated with the movement of small animals or insects on the surface of the input optical window in the sensitivity zone of the IR sensor.

Conclusions. As a result of the analysis of the process of formation of the output signal, it was established that the amplitude of the signal is determined by the temperature contrast of the surface of the detection object and the surrounding background, which can range from a fraction of a degree to tens of degrees. The shape of the signal has a triangular or trapezoidal appearance, the duration of the signal is set by the intersection of the detection zone and, when moving normally to the beam, can be $0.05...10$ s. During movement at an angle to the normal, the duration of the output signal increases.

The maximum spectral density of the output signal is in the range of $0.15...5$ Hz; when a person moves along the beam, the signal is minimal and is determined only by the temperature difference of individual areas of the person's surface and is less than 1°C . During the movement of the object between the beams, the signal is practically absent; at a temperature in the room, which is close to the temperature of the surface of the human body, the signal is minimal, i.e. the temperature difference is less than 1°C . Signal amplitudes in different beams of the detection zone can differ significantly from each other, as they are determined by the temperature contrast of the human body and the area of the background to which this beam is directed, the difference can reach less than 10°C .

The spectral range of interference covers the range of the signal and lies in the region from one to tens of hertz. The most dangerous type of interference is background sunlight, the effect of which increases the background temperature by $3...5^{\circ}\text{C}$. The influence of sunlight for close areas of the background is strongly correlated with each other and can be weakened when using a two-beam scheme for the construction of detection means. Convective disturbances from thermal household devices take

the form of fluctuating random temperature fluctuations that reach 2...3°C in the frequency range from 1 to 20 Hz with a weak correlation between beams.

Electrical disturbances take the form of short pulses or step functions with a steep front, the applied voltage can be hundreds of times higher than the input signal. The intrinsic noise of the pyroreceiver, corresponding to the signal when the temperature changes by 0.05...0.15°C, lies in the frequency range that overlaps the range of the input signal and increases proportionally to the temperature by about half for every 10°C.

References

1. S. Moroz, A. Tkachuk, V. Zablotskyi, S. Prystupa, V. Lyshuk and V. Talakh, "Analysis of Technical Characteristics of Temperature Sensors for the Design of Medical Thermometers," 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416501.
2. S. A. Moroz, M. V. Khvyshchun, A. A. Tkachuk, V. V. Lyshuk and S. O. Prystupa, "Investigation of Features of Functioning of the Pyroelectric Sensors in Electronic Security Devices," 2021 IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), Lviv, Ukraine, 2021, pp. 27-32, doi: 10.1109/ELIT53502.2021.9501138.
3. Yu Z, Yuan L, Luo W, Feng L, Lv G. Spatio-Temporal Constrained Human Trajectory Generation from the PIR Motion Detector Sensor Network Data: A Geometric Algebra Approach. *Sensors*. 2016; 16(1):43. <https://doi.org/10.3390/s16010043>.
4. A. Zviagintsev, I. Brouk, I. Bloom and Y. Nemirovsky, "Voltage and current integrated readout for uncooled passive IR sensors based on CMOS-SOI-NEMS technology," 2014 IEEE 28th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), Eilat, Israel, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEEI.2014.7005758.
5. Danaci, K.I., Akagunduz, E. A survey on infrared image & video sets. *Multimed Tools Appl* 83, 16485–16523 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15327-8>.
6. Wang, Y., Peng, L., Schreier, J. et al. Silver telluride colloidal quantum dot infrared photodetectors and image sensors. *Nat. Photon.* 18, 236–242 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01345-3>.
7. Pang, X., Wang, Y., Zhu, Y. et al. Non-volatile rippled-assisted optoelectronic array for all-day motion detection and recognition. *Nat Commun* 15, 1613 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46050-z>.
8. T. Salzman and M. Magno, "A Low Power Infrared Sensor for Direction, Speed, Distance Finding for Contextual Intelligence," 2022 IEEE Sensors, Dallas, TX, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS52175.2022.9967162.
9. K. Sureeya, C. Karupongsiri and K. Chetpattananondh, "Implementation of a IR Sensor as a Measurement Device for Smart Farming," 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2021, pp. 742-745, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454671.
10. Q. S. Hamad, M. S. Croock and S. Al Qaraawi, "Efficient infrared sensor and camera based monitoring system," 2013 International Conference on Electrical Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE), Mosul, Iraq, 2013, pp. 20-25, doi: 10.1109/ICECCPCE.2013.6998764.
11. S. A. Daud, S. S. Mohd Sobani, M. H. Ramiee, N. H. Mahmood, P. L. Leow and F. K. Che Harun, "Application of Infrared sensor for shape detection," 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP), Melaka, M, 2013, pp. 145-147, doi: 10.1109/ICP.2013.6687095.
12. S. Singh, B. K. Shukla and S. Moses Santhakumar, "Infra-Red Sensor-Based Technology for Collecting Speed and Headway Data on Highways Under Mixed Traffic Conditions," 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2020, pp. 607-611, doi: 10.1109/SPIN48934.2020.9070829.
13. B. Mustapha, A. Zayegh and R. K. Begg, "Ultrasonic and Infrared Sensors Performance in a Wireless Obstacle Detection System," 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, Kota Kinabalu, Malaysia, 2013, pp. 487-492, doi: 10.1109/AIMS.2013.89.
14. Xu, D., Wang, Y., Xiong, B. et al. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review. *Front. Mech. Eng.* 12, 557–566 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11465-017-0441-2>

Мороз С. А., Ткачук А. А., Лишук В. В., Заблоцький В. Ю., Щавій І. В.
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ДАТЧИК ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті розглядаються детектори інфрачервоного випромінювання, які можуть реєструвати теплове випромінювання живого організму. Тіло людини має температуру в діапазоні від 31°C до 42°C залежно від теплообміну між шкірою та навколишнім середовищем та інфрачервоне випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 4 до 50 мікрон. Проведено аналіз явища піроелектричного ефекту та особливості його використання. Наведено принципи формування теплового випромінювання в зоні виявлення датчика та наведено формули для визначення величини випромінювання теплового потоку. Досліджено процес формування вихідного сигналу під час дії теплової енергії на датчик. Встановлено, що для раціонального використання методів і алгоритмів підвищення завадостійкості інфрачервоного датчика необхідно знати основні параметри сигналу, а саме амплітуду, форму, тривалість, залежність від швидкості руху людини і фонова температура. Наведено експериментальні графіки форми та спектру сигналу на вході піроелектричного датчика за різних умов входу. Проаналізовано вплив температурного контрасту на формування вихідного сигналу датчика.

Ключові слова: чутливий елемент, піроприймач, ІЧ-випромінювання, сигналізація, зона чутливості.

УДК 004.89.658.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-04

Грудецький Р. Я., Маркіна Л. М., Пльотка Б. С., Сацик В. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СМАРТ-СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ДО ПІДРОЗДІЛІВ ОРГАНІЗАЦІЇ

У статті представлено розробку web-додатку, основною частиною якого є модуль прийняття рішень у смарт-системі. На основі проведено огляду та порівняння існуючих технологій, на яких базуються системи контролю доступу; зокрема систем на основі механічних замків, магнітних карток, біометричних систем та систем з використанням RFID-технології, було сформовано архітектуру web-додатку та розроблено алгоритм, на якому базується модуль прийняття рішень. Даний алгоритм роботи розробленого нами додатку базується на запропонованих рішеннях та передбачає використання динамічно генерованих ключів доступу у форматі штрих-кодів, що забезпечує зручність, ефективність і простоту поетапної схеми розробки та впровадження смарт-системи контролю доступу, яка забезпечує напівавтономний, а в разі необхідності і автономний контроль доступу до окремих локацій і ресурсів організації.

Апробацію та тестування результатів дослідження проведено на базі підрозділів Луцького національного технічного університету. Запропоноване рішення також може знайти застосування в організаціях різних форм власності які мають ряд своїх структурних підрозділів, в кампусах, на локаціях масових подій, де виникає потреба в управлінні доступом для співробітників, відвідувачів та учасників.

Ключові слова: контроль доступу, web-додаток, контроль в режимі реального часу.

Постановка проблеми. Сучасні складноструктуровані організації різних форм власності, кампуси, локації масових подій і т.п. стикаються з необхідністю забезпечення високого рівня безпеки, зокрема контролю доступу до окремо взятих підрозділів. Традиційні механічні замки та пропускні системи вже не відповідають вимогам сучасності, як безпековим, так і пропускним можливостям. Ця стаття описує розробку та впровадження смарт-системи контролю доступу до різних підрозділів тої чи іншої організації.

Одним із ключових аспектів системи контролю доступу є забезпечення контролю доступу сторонніх осіб як на регулярній основі, так і на основі одноразових та багаторазових пропусків і абонементів. Організації різних форм власності доволі часто стикаються з необхідністю надання доступу до окремих підрозділів не тільки своїм співробітникам та студентам, а й запрошеним лекторам, відвідувачам, обслуговуючому персоналу та учасникам різних заходів. Такий доступ має бути ретельно контрольованим, щоб запобігти несанкціонованому проникненню та забезпечити безпеку всіх учасників того чи іншого заходу.

Аналіз існуючих рішень. Сучасні системи контролю доступу можуть базуватися на різних технологіях, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Традиційні методи контролю доступу, такі як механічні замки та магнітні картки, вже не задовольняють вимог сучасних складноструктурованих організацій, оскільки вони не забезпечують достатнього рівня безпеки, зручності, адаптивності. Механічні замки можуть бути легко зламані, а магнітні картки часто губляться або підробляються. Це спонукає до пошуку кардинально нових підходів, або інтеграції існуючих сучасних та надійних технологій [1].

Технології контролю доступу включають різноманітні рішення, які відрізняються за рівнем безпеки, вартістю впровадження, зручністю та комфортом використання. Традиційні механічні замки залишаються найпростішим і найдешевшим способом забезпечення доступу, однак вони не забезпечують гнучкості та високого рівня захисту.

Біометричні системи, такі як розпізнавання відбитків пальців чи обличчя, пропонують найвищий рівень безпеки завдяки унікальним фізіологічним характеристикам користувачів. Вони ефективно виключають ризик передачі доступу іншим особам, проте впровадження таких систем потребує значних фінансових витрат на обладнання і може викликати питання конфіденційності серед користувачів. В той же час, варто відмітити, що біометричні системи контролю доступу набирають популярності завдяки їхній високій точності та надійності.

Сучасні дослідження вказують на широке використання відбитків пальців, розпізнавання обличчя та ідентифікації за райдужною оболонкою ока. Ці методи забезпечують унікальну ідентифікацію користувачів, що робить їх важко доступними для зломів.

Не дивлячись на перелічені переваги, біометричні системи, як показує практика, потребують високих витрат на впровадження та сервісне обслуговування, а також викликають питання щодо конфіденційності та захисту персональних даних [2].

RFID-технології (Radio Frequency Identification (радіочастотна ідентифікація)) є ще одним популярним рішенням для контролю доступу, які надають зручність безконтактного зчитування і більш високий рівень безпеки порівняно з механічними замками. Варто відмітити зручність та комфорт RFID-карток у практичному застосуванні, так як вони забезпечують оперативність зчитування та досить високий пропускний потік, що пояснює їх використання у різних організаціях і не тільки в закладах вищої освіти для контролю доступу до бібліотек, лабораторій та адміністративних приміщень [2]. Ряд авторів, таких як Swedberg С. [3], Байдюк А. В. [4] вказують на досить широкий спектр застосування технології радіочастотної ідентифікації починаючи з безконтактної картки проїзду до автоматизації виробничих процесів на потужних підприємствах.

Ще однією перевагою RFID є можливість інтеграції з іншими системами управління, такими як системи відвідуваності та моніторингу.

Проте, ці системи вимагають інвестицій у зчитувачі та обслуговування, а також залишаються вразливими до ризиків втрати або передачі картки іншим особам, що знижує рівень безпеки.

На протигагу біометрії, QR-коди та штрих-коди є економічно ефективними рішеннями, які не вимагають складного обладнання. Вони забезпечують швидкий доступ для відвідувачів завдяки зручності використання смартфонів або простих сканерів, при чому забезпечують достатній рівень захисту та високу пропускну здатність.

Вибір рішення. Перспективи використання QR-кодів та штрих-кодів у системах контролю доступу є привабливими завдяки їх простоті розповсюдження та низькій вартості впровадження і експлуатації. Ці технології дозволяють створювати динамічно генеровані ключі доступу, які легко поширювати за допомогою електронної пошти, мобільних додатків або друкувати на папері. Це робить їх ідеальним рішенням для ситуацій, де потрібен тимчасовий або разовий доступ, наприклад, для гостей закладів освіти чи учасників конференцій.

QR-коди були вперше розроблені в 1994 році японською компанією як метод відстеження виробничих процесів в автомобільній промисловості. Найпоширенішими QR-кодами є 2D-штрих-коди, які можуть зберігати інформацію як горизонтально, так і вертикально. Це дозволяє їм кодувати більше інформації, ніж лінійні штрих-коди, які кодують інформацію горизонтально. QR-коди можна сканувати за допомогою додатків для сканування штрих-кодів на смартфонах. Користувачеві потрібно лише навести камеру на QR-код, щоб отримати доступ до інформації, яка в ньому закодована.

Основні елементи структури QR-коду включають:

- заголовок та область пошуку-спеціальні маркери, які дозволяють сканеру знайти QR-код та визначити його розмір та орієнтацію;
- тайм-маркери знаходяться в кутах QR-коду і вказують на його розмір та напрям;
- область даних, містить саму інформацію (може бути текст, числа, посилання на вебсайт, або інші дані);
- розмітка версії вказує на версію QR-коду, що визначає кількість елементів у структурі даних;
- контрольна сума додається для перевірки правильності декодування інформації.

Код швидкого реагування, який можна скорочено назвати "QR-код", використовується для доступу та зчитування інформації за допомогою простого використання двомірних штрихкодів. QR-код був предметом багатьох систематичних досліджень щодо того, як інформація впорядковується і зберігається шляхом організації QR-кодів у 2D-матриці, разом зі стовпчиками і рядками цієї матриці. QR-коди використовуються в областях, які передбачають передачу текстової інформації, а це поштові повідомлення, номери телефонів, гіперпосилання або інші текстові файли. Це відбувається шляхом захоплення зображення QR-коду, яке потім інтерпретується за допомогою зчитувача QR-кодів або додатків для смартфонів, які підготовлені для цієї мети. QR-код також містить різні шаблони: шаблони пошуку, шаблони вирівнювання, шаблони синхронізації та інші типи, такі як інформація про форматування та часові інтервали, а

також інші змінні. Вони роблять QR-код більш сприйнятливим до розшифрування та виявлення, що дозволяє використовувати QR-коди у простий та ефективний спосіб [5].

Штрих-код – це графічне представлення даних у вигляді послідовності чорних смуг і пробілів, які розташовані у певній комбінації для кодування інформації. Основна мета штрих-коду – забезпечити швидкий і точний доступ до даних за допомогою автоматизованого зчитування. Серед переваг штрих-кодів:

- простота реалізації: штрих-коди мають лінійну структуру, що спрощує їх генерацію та інтеграцію в документи.

- мінімальні вимоги до обладнання: для зчитування штрих-кодів використовується недороге та широко доступне обладнання, що знижує витрати на впровадження.

- ефективність для малих обсягів даних: штрих-коди ідеально підходять для задач, де потрібно закодувати невеликий обсяг інформації, наприклад, унікальний ідентифікатор документа.

- компактність для друку: штрих-коди займають мінімум місця на документі, що особливо важливо для друкованих форм.

- швидкість зчитування: завдяки простій структурі штрих-коди швидко зчитуються сканерами, що прискорює обробку документів.

- відсутність потреби у складній обробці: на відміну від QR-кодів, штрих-коди не вимагають складного алгоритму декодування, що знижує навантаження на систему.

Штрих-коди є оптимальним вибором для простої ідентифікації документів, забезпечуючи високу швидкість, економічність та легкість впровадження [6].

QR-коди та штрих-коди забезпечують швидке і зручне сканування за допомогою доступних пристроїв, таких як смартфони або спеціальні сканери, без значних фінансових витрат на обладнання. Незважаючи на дещо нижчий рівень безпеки порівняно з біометричними системами або RFID-картками, вони можуть слугувати ефективним додатковим рівнем захисту, якщо поєднуються з іншими методами автентифікації. Зокрема, такі методи включають біометричні дані — відбитки пальців чи розпізнавання обличчя, що забезпечують високий рівень захищеності, або RFID-картки, які є зручними для постійних користувачів і дозволяють швидко ідентифікувати особу. Завдяки простоті та економічній ефективності, QR-коди та штрих-коди мають значний потенціал для впровадження в системах контролю доступу закладів освіти, ефективно керуючи потоками відвідувачів та забезпечуючи належний рівень безпеки без значних витрат.

Для забезпечення ефективного контролю доступу сторонніх осіб була розроблена смарт-система, яка передбачає програмну реалізацію для видачі, перевірки та контролю можливості доступу до підрозділів різних організацій. Представлена нами смарт-система вирізняється простотою впровадження та інтеграції в структуру то чи іншої організації.

З метою запобігання підробок, для формування ключів доступу використовуються динамічно генеровані, (змінні з часом) які можуть бути представлені у подвійному форматі: лінійний (штрих-код), та двомірний (QR-код), що переноситься на фізичний носій.

Запровадження таких інтегрованих механізмів дозволяє ефективно контролювати потоки відвідувачів та забезпечувати необхідний рівень безпеки, не утворюючи при цьому зайвих труднощів для легітимних користувачів. У цій статті розглянуто архітектуру та розроблено смарт-систему контролю доступу, методи автентифікації користувачів та можливі напрями її вдосконалення.

Реалізація рішення. Для вирішення поставленої проблеми було реалізовано систему у вигляді web-додатку, що забезпечує управління локаціями, видами та тривалістю доступу; видавати документи, що дозволяють доступ та містять штрих-коди; перевіряти права доступу на основі представлених документів; отримувати звітність завантаженості та потоку відвідувачів в режимі реального часу [7].

Архітектура системи включає кілька основних компонентів: інтерфейс оператора, інтерфейс адміністратора, модуль видачі документів доступу, модуль перевірки документів, сервіс автентифікації користувачів та модуль звітності. Таке розділення дозволяє гнучко розширювати смарт-систему чи окремі її частини.

Інтерфейс оператора забезпечує можливість видачі та перевірки документів доступу шляхом інтеграції з відповідними модулями. Інтерфейс адміністратора включає налаштування підрозділів, правил доступу та управління користувачами, що дозволяє зручно керувати параметрами системи.

Модуль видачі документів доступу відповідає за формування документів відповідно до заданих налаштувань, а модуль перевірки документів забезпечує перевірку прав доступу з логуванням дій для забезпечення прозорості процесів. Базова блок-схема алгоритму перевірки доступів на основі штрих-коду показана на рисунку 1. Сервіс автентифікації визначає доступні користувачам дії та інтерфейси, з прикладом блок-схеми перевірки прав доступу на рисунку 2.

Модуль звітності формує інтерфейси для зручного перегляду та аналізу даних на основі збережених логів, що дозволяє відстежувати й оптимізувати використання системи. Для візуального представлення даних було проаналізовано загальноприйнятті підходи до їх зображення. Серед варіантів візуалізації даних оптимальними формати є таблиці та гістограми [8].

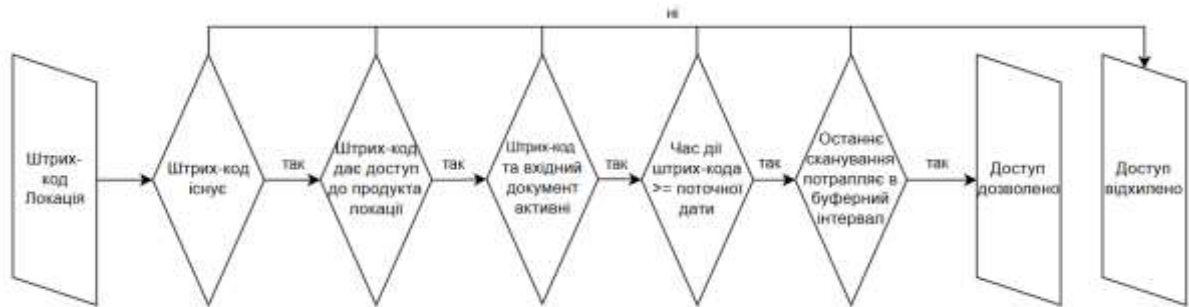


Рисунок 1 - Блок-схема алгоритму перевірки доступу на основі штрих-коду

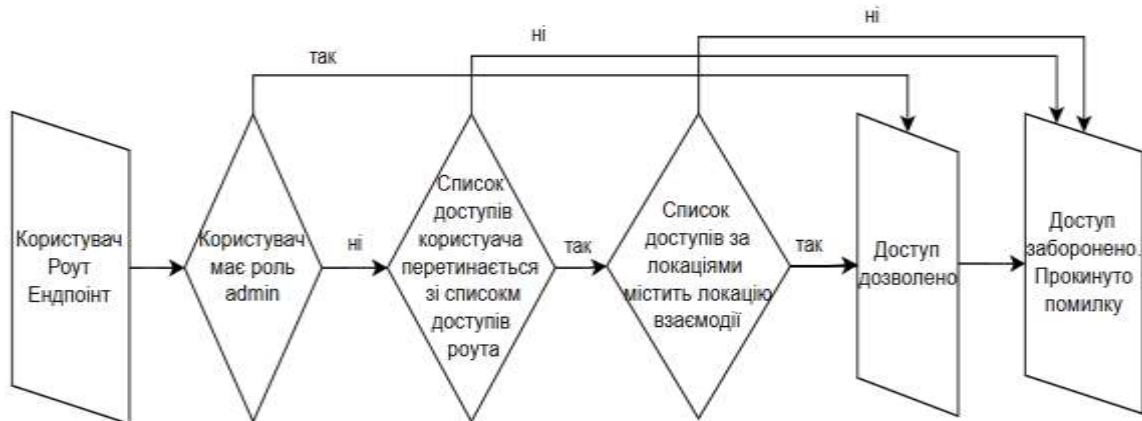


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритму перевірки прав доступу до окремих функцій web-додатку

Звіти, що показують результати роботи в як в режимі реального часу так і за певний період, можуть бути представлені у вигляді графіків чи таблиць. На рисунку 3 зображено приклад звіту, що сформовано в системі з використанням демонстраційних даних, потоку відвідувачів за період з 2024.04.01 по 2024.04.05, який візуалізований у вигляді гістограми. Та на рисунку 4 представлено загальний звіт за вищевказаний період на основі аналогічних даних, що реалізований у виді таблиці.

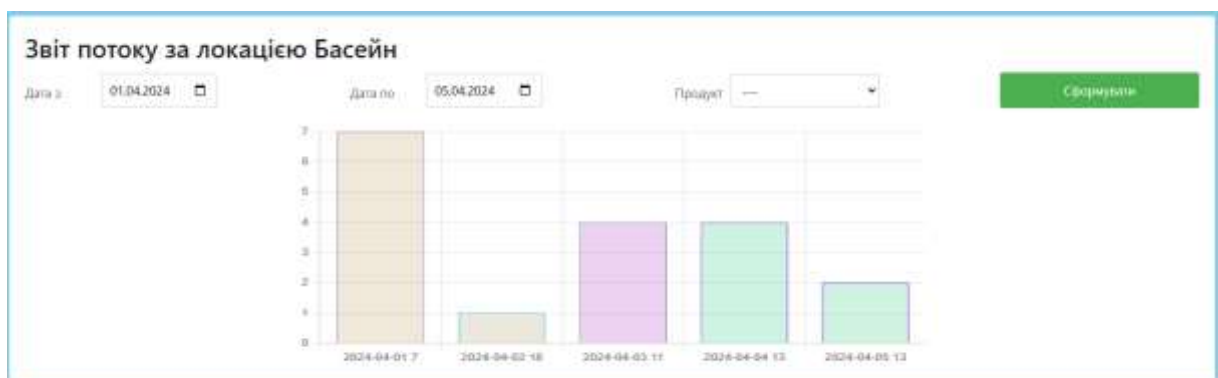


Рисунок 3 - Звіт потоку відвідувачів за період з 2024.04.01 по 2024.04.05

Локація	Продукт	Успішні входи	Не успішні входи
Басейн	Персональні квитки	19	5
Басейн		0	10
Басейн	Разовий квиток	1	1
Басейн	Абонімент	3	2
Басейн	Пропуск на змагання	0	1

Рисунок 4 - Загальний звіт роботи web-додатку

Смарт-система розроблена для роботи під значним навантаженням і підтримує вертикальне масштабування без ускладнень. Для забезпечення можливостей горизонтального масштабування передбачено розподіл монолітного рішення на мікросервіси, що дозволяє оптимально розподіляти навантаження залежно від ключових компонентів. У випадку підвищеного навантаження на базу даних горизонтальне масштабування може бути досягнуто шляхом кластеризації, що розподіляє операції між кількома вузлами в кластері, забезпечуючи надійність і швидкість обробки даних [9].

Реалізація представленої системи може стати модулями для автономної або напівавтономної смарт-системи контролю доступу. Основні напрями для подальшого розширення включають підтримку додаткових носіїв документів доступу, автоматизацію периферійного обладнання, що може доповнити або замінити інтерфейс оператора, а також автоматизовану видачу документів доступу через персональні кабінети для підтверджених відвідувачів. Крім того, передбачено можливість створення публічного інтерфейсу дистрибуції для організації вільного або платного доступу. Подальше вдосконалення системи буде йти шляхом розширення переліку допустимих способів представлення інформації, таких як QR-коди, впровадження додаткових можливостей ідентифікації користувачів та загального покращення безпеки системи з однієї сторони, і підвищення надійності та масштабованості системи з іншої сторони.

Висновки. У роботі проаналізовано різні технології контролю доступу до локацій та підрозділів організацій та методи автентифікації відвідувачів, що дозволило визначити оптимальний варіант для реалізації поставлених завдань та розробити смарт-систему контролю доступу.

У розробленій смарт-системі контролю доступу реалізовано інтеграцію елементів різних існуючих технологій для досягнення балансу між зручністю, комфортом, безпекою та економічною ефективністю. Система використовує динамічні штрих-коди для разових і тимчасових пропусків, що робить її ідеальною для керування доступом гостей і відвідувачів на короткий час.

Розглянута архітектура включає інтерфейс оператора, інтерфейс адміністратора, модуль видачі документів доступу, модуль перевірки документів, сервіс автентифікації користувачів та модуль звітності.

Сформульовано вимоги до web-додатку, на основі яких розроблено рішення, що дозволяє оптимально вирішити поставлені задачі, підвищує ефективність управління доступом і забезпечує належний рівень безпеки.

Модуль прийняття рішень розташований на серверній стороні, що забезпечує централізоване управління всіма процесами автентифікації та доступу, а також дозволяє системі оперативно обробляти запити, зберігаючи записи про відвідування та оптимізувати процеси доступу в режимі реального часу.

Розроблена нами смарт-система дозволяє гнучко реагувати на зміну навантаження та забезпечує можливість без значних ресурсів розширюватися відповідно до динамічних вимог організації, при цьому залишаючи можливість та перспективи подальшого розвитку та вдосконалення відповідно до потреб та викликів організації, одним з напрямків вдосконалення системи є розширення варіантів носіїв для документів ідентифікації користувачів.

Інформаційні джерела

1. Chapple M., Implementing Access Control Systems, Indiana, USA, 2020, pp. 110-135.
2. Dwivedi R., Touchless Fingerprint Recognition Based on Hierarchical Clustering, Brinston, UK, 2021, pp. 78-94.

3. Swedberg C., "CribMaster Updates Its RFID Units' Real-Time Tool Management," [Електронний ресурс]. Available: <https://www.rfidjournal.com/cribmaster-updates-its-rfid-units-real-time-toolmanagement>. (дата звернення: 07.10.2024).
- 4.. Байдюк А. В, Система контролю промислового підприємства на основі технології радіочастотної ідентифікації: Магістерська робота, Київ, Ukraine, 2021, 102 p.
- 5.. Андреев А. С, "QR-коди в науці та техніці," [Електронний ресурс]. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/8a25bd76-cdd1-47b9-90a0-466e2a55b246/content>. (дата звернення: 07.10.2024).
6. Chaudhary A., Sharma A., and Gupta N., "Digital Data Protection Using Barcode & Steganographic Approach," 2022. pp. 11-16.
7. Benantar M., Access Control Systems: Security, Identity Management and Trust Models, Brinston, UK, 2019, pp. 200-230.
8. Healy K., Data Visualization: A Practical Introduction, Princeton University Press, New Delhi, India, 2019, pp. 30-58.
9. Pansara R., Navigating Data Management in the Cloud: Exploring Limitations and Opportunities, Taxes, USA, 2023, pp. 1-9.

Grudetsky R., Markina L., Plotka B., Satsyk V.

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

USING THE DECISION-MAKING MODULE OF THE SMART ACCESS CONTROL SYSTEM FOR ORGANIZATION

The article presents the development of a web application, with its core component being a decision-making module within a smart system.

Based on a review and comparison of existing technologies underpinning access control systems specifically those based on mechanical locks, magnetic cards, biometric systems, and RFID technology the architecture of the web application was designed, and an algorithm for the decision-making module was developed. This algorithm is built on the proposed solutions and incorporates dynamically generated access keys in the form of barcodes. This approach ensures convenience, efficiency, and simplicity in the step-by-step design and implementation of a smart access control system that provides semi-autonomous, and if necessary, fully autonomous access control to specific locations and resources of an organization.

The testing and validation of the research results were carried out within the units of Lutsk National Technical University. The proposed solution is also applicable to organizations of various forms of ownership with multiple structural divisions, campuses, and venues for mass events where managing access for employees, visitors, and participants is essential.

Keywords: *access control, web application, real-time control.*

УДК 681.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-05

Вовк М. А., Гуменюк П. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ БРОДІННЯ ВІНОМАТЕРІАЛУ

Розроблена динамічна модель процесу бродіння виноmaterіалу дозволяє точно відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечує гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту. Модель враховує випадкові збурення температури і рівня цукру, що наближає симуляцію до реальних умов виробництва, де зовнішні фактори можуть змінюватися. Використання даної моделі на практиці може сприяти підвищенню ефективності виробництва та стабільності характеристик виноmaterіалу.

Ключові слова: виноmaterіал, керування, модель, технологічні параметри, мікроконтролер ADAM-5000.

Постановка проблеми. Одним із найважливіших етапів у виноробстві є бродіння виноmaterіалу, оскільки воно визначає кінцевий характер вина, включаючи вміст алкоголю, смак, аромат і текстуру вина. На цій стадії виноградний сік перетворюється на вино. Бродіння може бути природним, тобто обумовленим дією диких дріжджів, присутніх на шкірці винограду та культивованим, коли у сусло додаються певні штами культивованих дріжджів.

У середньому для посіву культурних дріжджів винороби додають 20-30 грамів сухих дріжджів на 100 літрів сусла, тобто приблизно 200-300 грамів на 1000 літрів сусла або виноmaterіалу залежно від сорту винограду та рівня цукру сусла. Дріжджі можна регідратувати в теплій воді (приблизно 35-40 °C) перед додаванням у сусло, що забезпечить кращу активацію та розподіл дріжджів у суслі.

Дріжджі переробляють виноградний цукор на спирт і вуглекислий газ з виділенням тепла. При виробництві виноmaterіалу і звичайних тихих вин вуглекислий газ іде в атмосферу.

Контроль температури важливий для кінцевого профілю смаку вина. Червоні вина зазвичай ферментують при вищих температурах (типово від 22 °C до 30 °C), для отримання яскравішого кольору, насиченості, аромату і терпкості смаку з виноградної шкірки. Нижчі температури (близько 22 °C) дозволяють отримати м'якші смаки вин, тоді як вищі температури (близько до 30 °C) збільшують терпкість та насиченість вина. Білі вина ферментують при нижчих температурах (12-18 °C) для збереження ніжних ароматів.

Тривалість бродіння залежить від температури, вмісту цукру та штаму дріжджів. Для червоних вин первинне бродіння зазвичай триває 5-10 днів. Однак, залежно від того, яке вино бажане на виході, з якою кількістю танінів і насиченістю кольору, бродіння може тривати і до 2-3 тижнів.

Бродіння триває, доки більша частина цукру не буде спожита дріжджами, утворюючи сухе вино з дуже невеликою кількістю залишкового цукру. При виробництві сухих вин весь або майже весь цукор перетворюється на алкоголь, залишаючи вино без помітної солодкості. При виробництві напівсолодких або солодких вин бродіння припиняють раніше, шляхом охолодження сусла або додавання діоксиду сірки, щоб залишилося трохи цукру. Після завершення бродіння дріжджі гинуть і осідають на дні ємності у вигляді осаду.

Для забезпечення точності, послідовності та ефективності виноробного процесу важливе значення має моделювання процесу виробництва виноmaterіалу.

Мета роботи. Метою роботи є розробка динамічної моделі ферментації виноmaterіалу, яка дозволить відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечить гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту.

Викладення основного матеріалу. Завдяки використанню моделей, що описують змінні ферментації, такі як концентрація дріжджів, вміст цукру, температура та рівень алкоголю, винороби отримують прогнозну інформацію для підтримання оптимальних умов [1-2]. Це дозволяє досягати незмінної якості продукції, незалежно від змін сировини чи умов навколишнього середовища, а також оптимізувати використання ресурсів, що знижує витрати та кількість відходів.

Для процесів, де присутні невизначеності, корисним є стохастичне моделювання, оскільки воно враховує випадкові величини, наприклад, коливання температури чи активності дріжджів. У виноробстві це допомагає передбачити фактори, що впливають на ферментацію, зокрема під

час виробництва виноматеріалу. Використання стохастичних моделей надає можливість змоделювати процес ферментації, забезпечуючи стабільну якість продукту навіть при коливаннях зовнішніх факторів [3-4].

Моделювання основних параметрів ферментації у виробництві виноматеріалу є бажаним для забезпечення стабільності, якості та консистенції кінцевого продукту [5].

Для оптимізації ферментації доцільним є використання моделі Міхаеліса-Ментен [6-7]. Ця модель дозволяє описувати кінетику ферментації шляхом встановлення залежностей між концентрацією субстрату (цукру) і швидкістю утворення алкоголю. Параметри моделі, такі як максимальна швидкість реакції (V_{max}) і спорідненість дріжджів до субстрату (K_m), допомагають передбачити розвиток процесу ферментації і уникнути його передчасної зупинки.

Основною метою алгоритму моделювання процесу ферментації є розрахунок кінетики утворення алкоголю в процесі ферментації, використовуючи модель Міхаеліса-Ментен.

Алгоритм моделювання процесу ферментації враховує змінні, що впливають на утворення алкоголю, а саме:

- концентрацію дріжджів,
- рівень цукру,
- температуру,
- коливання зовнішніх умов.

Концентрація дріжджів – цей параметр визначає швидкість та ефективність ферментації, оскільки саме дріжджі перетворюють цукри на спирт і вуглекислий газ. Неправильна концентрація дріжджів може спричинити надмірне утворення піни, неповне бродіння або надмірне накопичення побічних продуктів. Врахування концентрації дріжджів дає змогу передбачити їхню поведінку в умовах процесу, коригувати рівень активності та підтримувати оптимальний баланс, що особливо важливо для стабільного перебігу ферментації.

Рівень цукру – цукор служить головним джерелом живлення для дріжджів, і його концентрація визначає як кінцевий рівень алкоголю, так і загальний ароматичний профіль вина. Врахування вмісту цукру дозволяє точно відстежувати процес його споживання дріжджами та регулювати швидкість ферментації. При зниженні рівня цукру дріжджі можуть знижувати свою активність, що може призвести до «застрягання» процесу ферментації.

Температура – цей параметр має вирішальний вплив на активність і метаболізм дріжджів. Температура ферментації безпосередньо впливає на швидкість процесу, а також на виділення певних ароматичних та смакових компонентів. Наприклад, занадто висока температура може спричинити загибель дріжджів або розвиток небажаних смакових дефектів, а надто низька – значно уповільнити процес.

Рівень алкоголю – важливий параметр, який потребує ретельного контролю. Зі збільшенням концентрації алкоголю дріжджі можуть ставати менш активними або навіть загинути, оскільки високий рівень спирту є токсичним для них. Це особливо важливо для досягнення стабільності вмісту алкоголю, що відповідає стандартам продукту та гарантує консистенцію смакових характеристик.

Моделювання дозволяє передбачити цей момент і вчасно втрутитися для підтримання процесу, зменшуючи ризик втрати продуктивності. Це забезпечує стабільність і дозволяє виноробам виробляти виноматеріал заданої якості та характеристик

Параметри моделі (температура бродіння, початкова кількість дріжджів, константи швидкості, максимальний рівень алкоголю) ініціалізуються відповідно до стандартів та цільових показників якості. Також задаються параметри моделі Міхаеліса-Ментен, такі як максимальна швидкість утворення алкоголю (V_{max}), константа Міхаеліса (K_m), токсичний поріг для дріжджів (A_{tox}), а також величина збурення, що моделює випадкові коливання температури, алкоголю та цукру.

При моделюванні випадкових змінних враховується випадкове коливання температури, що змінюється на основі середньої температури бродіння (T_{brod}) та випадкових збурень. Це дозволяє наблизити модель до реальних умов ферментації, де температура та інші фактори змінюються.

Вміст алкоголю розраховується на основі моделі Міхаеліса-Ментен, яка враховує концентрацію цукру, температуру та концентрацію дріжджів. Алкоголь збільшується поступово, поки не досягне токсичного рівня (A_{tox}).

Концентрація цукру зменшується з часом залежно від швидкості споживання дріжджами, враховуються випадкові коливання для реалістичності.

Кількість дріжджів змінюється залежно від рівня алкоголю – якщо вміст алкоголю перевищує токсичний рівень, дріжджі починають гинути. Цей показник обчислюється для оцінки поточної ефективності ферментації.

В результаті моделювання створюються графіки для відображення кінетики цукру, концентрації дріжджів, рівня алкоголю та швидкості його утворення протягом усього процесу.

Програмна реалізація процесу бродіння використовує бібліотеки NumPy та Matplotlib. Спочатку задаються параметри моделі, такі як середня температура бродіння (T_{brod}), коливання температури (σ_T), початкова кількість дріжджів (N_{drizh}), швидкість споживання цукру (k_2), а також збурення для алкоголю (σ_1) і цукру (σ_2). Далі визначаються параметри для моделі Міхаеліса-Ментен, зокрема максимальна швидкість утворення алкоголю (V_{max}), константа Міхаеліса (K_m), максимальна концентрація алкоголю (A_{max}) та токсичний рівень алкоголю для дріжджів (A_{tox}).

Початкові умови задаються у вигляді масивів: вміст алкоголю (A), що ініціалізується нулями, початковий рівень цукру (S), кількість дріжджів (N), температура (T) та швидкість утворення алкоголю (V), яка також ініціалізується нулями.

У циклі, що імітує час (30 днів), генеруються випадкові значення, які представляють збурення для алкоголю (dW_1), цукру (dW_2) та температури (dW_T). Потім обчислюється поточна температура бродіння (T_{current}), яка оновлюється в масиві температур. На основі цієї температури та інших параметрів обчислюються зміни вмісту алкоголю (dA) та рівня цукру (dS), які відповідно оновлюються в масивах A та S .

Змінюється кількість дріжджів, якщо вміст алкоголю не перевищує токсичний рівень (A_{tox}), обчислюється приріст кількості дріжджів (dN); якщо ж токсичний рівень перевищено, відбувається зменшення кількості дріжджів через токсичність. Ці значення оновлюються в масиві N , при цьому запобігається виникненню негативних значень. Також обчислюється швидкість утворення алкоголю (V), яка залежить від поточних значень цукру, температури та кількості дріжджів.

На завершення, вміст алкоголю в грамах на літр перетворюється на градуси, що відображається у масиві A_{degrees} , який представляє вміст алкоголю у відсотках за обсягом. Для візуалізації результатів будуються графіки, які ілюструють динаміку зміни вмісту цукру, кількості дріжджів, вмісту алкоголю та швидкості утворення алкоголю.

Для проведення моделювання задаємо наступні вхідні дані:

- $T_{\text{brod}} = 20$ – середня температура бродіння в градусах Цельсія;
- $\sigma_T = 1,0$ – коливання температури;
- $N_{\text{drizh}} = 0,3$ – початкова кількість дріжджів;
- $k_2 = 0,05$ – швидкість споживання цукру;
- $\sigma_1 = 0,05$ – збурення для алкоголю;
- $\sigma_2 = 0,05$ – збурення для цукру;
- $dt = 0,1$ – крок часу;
- $\text{time} = \text{np.arange}(0, 30, dt)$ – вектор часу (від 0 до 30 днів з кроком dt);
- $V_{\text{max}} = 0,3$ – максимальна швидкість утворення алкоголю;
- $K_m = 2,0$ – константа Міхаеліса;
- $A_{\text{max}} = 20$ – максимальна концентрація алкоголю;
- $A_{\text{tox}} = 10$ – токсичний рівень алкоголю для дріжджів.

Результати моделювання представлені на наступних графіках.

На рисунку 1 показана зміна концентрації цукру у виноматеріалі.

Отримані дані демонструють загальне зниження рівня цукру протягом часу, що типово для процесу бродіння. Спочатку концентрація цукру становить біля 75 г/л і поступово зменшується приблизно до 53 г/л на 30-й день. Це відповідає типовому процесу перетворення цукру дріжджами на етанол та вуглекислий газ.

На ранніх етапах (до 5-7 днів) вміст цукру знижується особливо швидко через інтенсивну активність дріжджів у сприятливих умовах. Протягом наступних 7-10 днів процес дещо уповільнюється, що, пов'язано зі зменшенням концентрації цукру, зміною рН середовища, накопиченням етанолу або зниженням активності дріжджів.

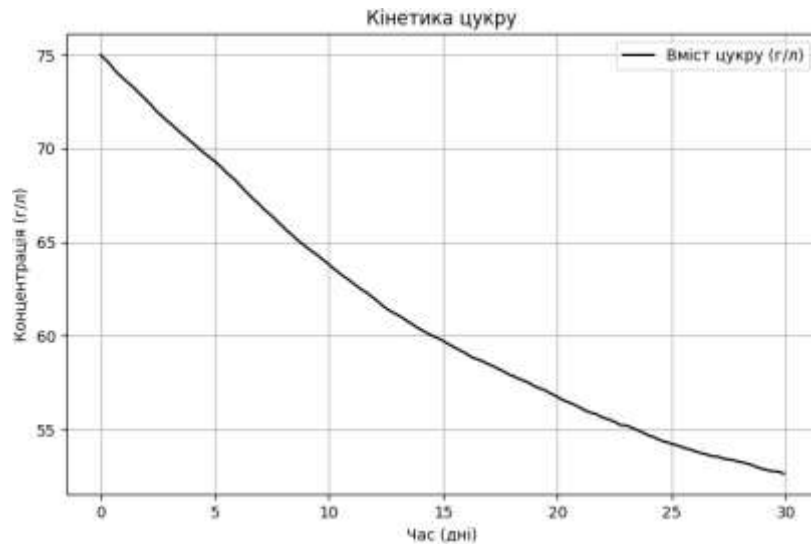


Рисунок 1 – Зміна концентрації цукру у виноматеріалі

З часом швидкість зменшення рівня цукру уповільнюється, наближаючись до асимптотичного значення. Після 30 днів вміст цукру стабілізується на рівні близько 53-54 г/л, що вказує на наявність залишкового цукру, який дріжджі вже не можуть переробити через фізіологічні обмеження або умови середовища.

На рисунку 2 показано зміну концентрації дріжджів у виноматеріалі.

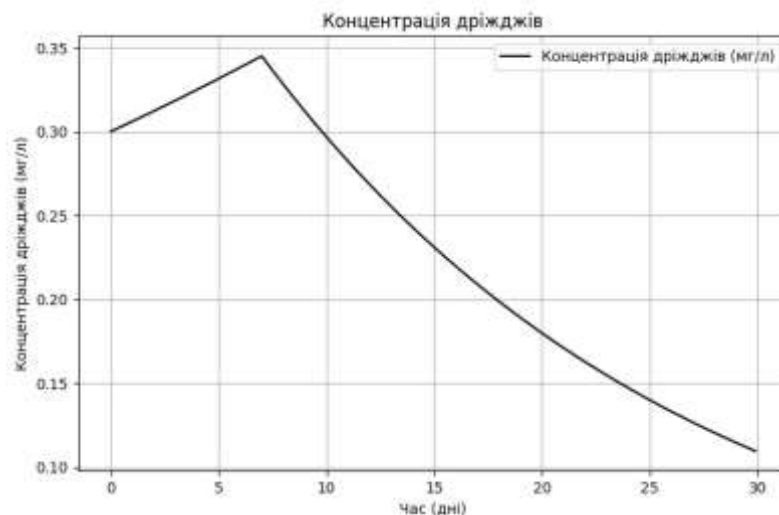


Рисунок 2 – Зміна концентрації дріжджів у виноматеріалі

На початковому етапі ферментації концентрація дріжджів поступово зростає, досягаючи піку на 6-7-й день, після чого знижується. Спочатку концентрація складає приблизно 0,3 мг/л, згодом зростає до максимального значення, після чого спадає. Це початкове розмноження, максимальна активність дріжджів і подальше уповільнення через обмеження ресурсів.

У перші 6-7 днів відбувається активне зростання концентрації дріжджів завдяки оптимальним умовам і наявності великої кількості поживних речовин. На 6-7 день концентрація досягає піку, що вказує на найвищий рівень активності ферментації. Після цього активність дріжджів знижується через виснаження запасів цукру та накопичення етанолу.

Після досягнення піку концентрація дріжджів поступово знижується, наближаючись до асимптотичного рівня до кінця 30-денного періоду, коли дріжджі втрачають здатність до розмноження через обмеження середовища.

На рисунку 3 показано швидкість утворення алкоголю у виноматеріалі.

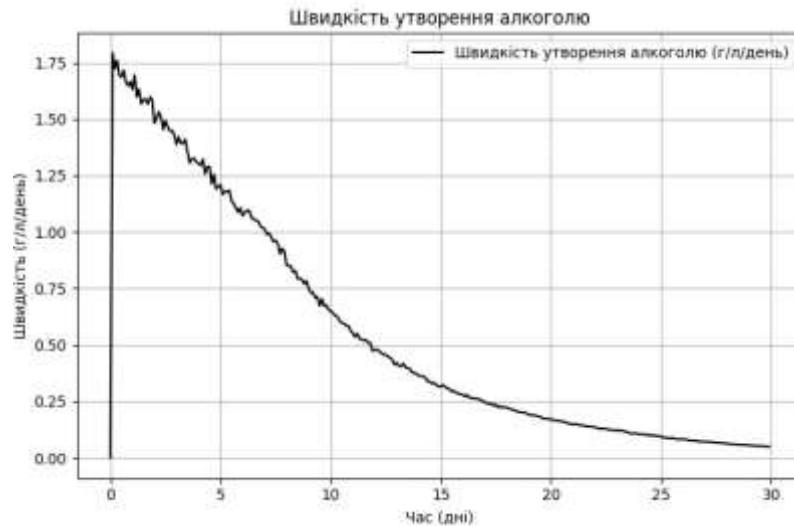


Рисунок 3 – Швидкість утворення алкоголю у виноматеріалі

Швидкість утворення алкоголю на початкових етапах бродіння (перші 5-7 днів) є високою завдяки активному метаболізму дріжджів, що спричиняє значне зростання концентрації алкоголю. Після 7-10 днів швидкість знижується через зменшення кількості цукру, накопичення етанолу та зміни в умовах середовища (рН, температура), що уповільнює активність дріжджів.

Залишковий цукор також впливає на кінцевий вміст алкоголю. При зниженні вмісту цукру до певного рівня (близько 53 г/л) дріжджі можуть не мати змоги переробити весь цукор на алкоголь через фізіологічні обмеження або несприятливі умови.

На рисунку 4 показано динаміку збільшення алкоголю у виноматеріалі.

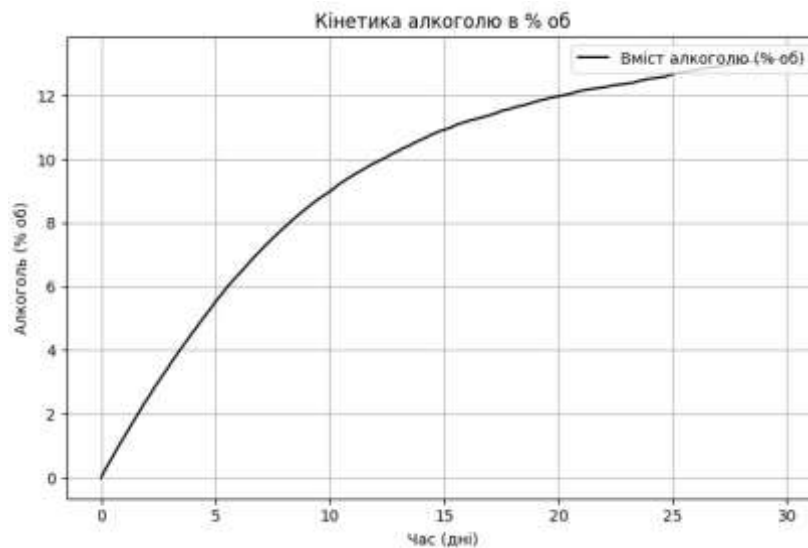


Рисунок 4 – Динаміка збільшення алкоголю

Під час бродіння спостерігається загальна тенденція до зростання вмісту алкоголю. Наприклад, якщо початковий вміст алкоголю становить 0 %, то за 30 днів він може досягти 13 %, що свідчить про ефективний процес перетворення дріжджами цукрів на етанол.

На початку (перші 5-7 днів) вміст алкоголю зростає швидко завдяки високій активності дріжджів. На цьому етапі він може досягати 1-2 %. Проте зі зростанням концентрації етанолу підвищується осмотичний тиск, що може сповільнювати процес бродіння.

Після 7-10 днів темпи зростання алкоголю знижуються. На 15-й день рівень алкоголю може досягати 8 %, а на 30-й – близько 13 %, що пояснюється зменшенням активності дріжджів через накопичення етанолу.

Наприкінці бродіння вміст алкоголю наближається до максимального значення, яке можуть витримати дріжджі, зазвичай близько 14-16 %. У даному прикладі він стабілізується на рівні 12-13 % до 30-го дня, що свідчить про завершення процесу.

Висновки. Розроблена динамічна модель ферментації виноматеріалу дозволяє точно відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечує гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту. Застосування моделі Міхаеліса-Ментен у процесі ферментації дозволило деталізувати взаємозв'язок між субстратом (цукром) та швидкістю утворення етанолу, що сприяло прогнозуванню кінетики процесу. Крім того, використання стохастичних методів для моделювання випадкових змін умов бродіння, таких як коливання температури та активності дріжджів, дозволяє адаптувати модель до реальних умов виробництва, забезпечуючи контроль якості продукту. На основі моделювання показано, що початкова фаза бродіння супроводжується швидким зростанням концентрації алкоголю, поки вміст цукру залишається високим і температура сприяє оптимальній активності дріжджів. З часом, зі зменшенням цукру та накопиченням етанолу, спостерігається зниження активності дріжджів та уповільнення процесу. Модель враховує випадкові збурення температури і рівня цукру, що наближає симуляцію до реальних умов виробництва, де зовнішні фактори можуть змінюватися. Таким чином, використання даної моделі на практиці може сприяти підвищенню ефективності виробництва та стабільності характеристик виноматеріалу.

Інформаційні джерела

1. Miller K. V., Block D. E. A review of wine fermentation process modeling. *Journal of Food Engineering*, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419304273> (дата звернення: 11.10.2024).
2. Sablayrolles J.-M. Kinetics and control of alcoholic fermentation during wine production. URL: https://www.researchgate.net/publication/335847668_Kinetics_and_Control_of_Alcoholic_Fermentation_During_Wine_Production (дата звернення: 11.10.2024).
3. Remedios M., López-Gómez A., Esnoz A. Wine making: Control and Modeling. URL: https://www.researchgate.net/publication/354630276_Wine_making_Control_and_Modeling (дата звернення: 11.10.2024).
4. Colucci R., López-de-la-Cruz J. Dynamics of fermentation models for the production of dry and sweet wine. *Communications on Pure and Applied Analysis*, 2020, № 19(4), pp. 2015-2034. URL: <https://www.aims sciences.org/article/doi/10.3934/cpaa.2020089> (дата звернення: 11.10.2024).
5. Nelson J., Boulton R. Models for Wine Fermentation and Their Suitability for Commercial Applications. *Fermentation* 2024. № 10(6), p. 269. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation10060269> (дата звернення: 11.10.2024).
6. Gunawardena J. Some lessons about models from Michaelis and Menten. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3279381/> (дата звернення: 11.10.2024).
7. Michaelis-Menten models. URL: <https://onlinehelp.certara.com/phoenix/8.3/topics/mmmmodelcalc.htm> (дата звернення: 11.10.2024)

Vovk M., Humeniuk P.

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

DYNAMIC MODEL OF THE WINE MATERIAL FERMENTATION PROCESS

The developed dynamic model of the wine material fermentation process allows you to accurately reproduce the processes that occur during fermentation and provides flexibility in controlling the variables that affect the final quality of the product. The model takes into account random disturbances in temperature and sugar levels, which brings the simulation closer to real production conditions where external factors can change. The use of this model in practice can help to improve production efficiency and the stability of wine material characteristics.

Keywords: wine material, control, model, technological parameters, microcontroller ADAM-5000.

УДК 004.91

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-06

Грудецький Р. Я., Турич В. Ю., Сацик В. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ERP СИСТЕМИ “ODOO” У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ПРИКЛАДІ ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

У статті розглядається роль та можливості які надає використання автоматизованої системи управління ресурсами (АСУР) у закладах вищої освіти (ЗВО) для оптимізації адміністрування, поліпшення якості обслуговування здобувачів та спрощення процесів управління. Також в статті наводиться порівняльний аналіз рішень, таких як “ERP SAP”, “ERP NEXT” та “ERP Odoo”, і оцінюються їхні можливості та обмеження в контексті використання в закладах вищої освіти. Досліджуються ключові переваги впровадження АСУР на основі “ERP Odoo” та потенційні виклики, зокрема питання інтеграції даної системи з електронним кабінетом студента, підготовки персоналу та забезпечення безпеки даних. Окремо виділено процес впровадження “ERP Odoo” для вирішення поточних адміністративних потреб закладів вищої освіти на прикладі розробленого рішення для Луцького національного технічного університету.

Ключові слова: автоматизоване управління, система управління ресурсами, ERP.

Постановка проблеми. Сучасні заклади вищої освіти стикаються з необхідністю підвищення ефективності управлінських процесів та покращення якості обслуговування здобувачів. У цій статті розглядається роль та впровадження АСУР, яка покликана значно спростувати процеси адміністрування. Впровадження АСУР, як показує практика, гарантовано забезпечує спрощення процедур адміністрування, управління фінансами, контролю за виконанням навчальних планів, організації підтримки вирішення та стимулювання процесу індивідуального навчання здобувачів.

Аналіз існуючих рішень. У статті розглядається ряд ERP-систем, які можуть бути використані для автоматизації ресурсного планування в навчальних закладах. Основну увагу зосереджено на таких рішеннях, як “ERP SAP”, “ERP Next” та “ERP Odoo”. Кожна з цих систем пропонує своєрідний підхід до управління ресурсами та має ряд своїх недоліків та переваг, які проявляються в залежності від структури та потреб організації.

“ERP SAP” пропонує потужну інфраструктуру для великих організацій і має модулі, що спеціально адаптовані для сфери бізнесу. Однак SAP є комерційним продуктом, і вартість його впровадження та обслуговування може бути значною, що робить його менш доступним для університетів з обмеженим бюджетом.

“ERP NEXT” є системою з відкритим кодом, яка надає функціональність для управління ресурсами в організаціях. Система також пропонує модулі для навчальних закладів, однак її функціонал менш адаптований до потреб великих університетів і вимагає додаткового налаштування для відповідності академічним процесам.[1]

“ERP Odoo” на відміну від вище розглянутих систем є одним з найпопулярніших безкоштовних ERP-рішень з відкритим кодом, яка широко підтримується розробниками - волонтерами, різними організаціями, завдяки чому досягається максимальна ефективність використання системи, гнучкість впровадження та її масштабованість. “ERP Odoo” дозволяє легко налаштовувати систему під конкретні потреби університету та надає широкий спектр модулів, таких як:

- Employee – для створення структури університету (декан-куратор-студент) з можливістю перегляду ієрархії груп та курсів, кафедр, факультетів, структурні підрозділи.
- Website та Helpdesk – створення онлайн-порталу зворотного зв'язку здобувача з ЗВО, де здобувачі можуть подати запит на підтримку з будь-яких питань, пов'язаних з навчанням.
- Sales та Invoicing – для автоматизації процесів фінансового управління, укладання контрактів (здобувач-університет), створення рахунків згідно контрактів та контролю за платежами.

Вибір рішення. Серед доступних рішень для автоматизованого управління ресурсами (ERP-систем) було розглянуто кілька платформ, зокрема “ERP SAP”, “ERP Next” та “ERP Odoo”. Кожна з цих систем має свої переваги, однак для автоматизації освітніх процесів університету

найбільш оптимальним варіантом було обрано як вказано вище “ERP Odoo”. Основні передумови даного вибору:

- відкритий код та безкоштовна версія – “ERP Odoo” доступний у вигляді Community Edition, яка є безкоштовною, а також має відкритий код, що дозволяє знизити витрати на ліцензування та модифікувати систему відповідно до власних потреб;
- “ERP Odoo” надає розширені можливості для кастомізації, розробки додаткових модулів та інтеграції. Це особливо важливо для ЗВО, який має специфічні вимоги до автоматизації процесів, таких як управління контрактами здобувачів та формування платіжних зобов’язань;
- “ERP Odoo” підтримує API для інтеграції з іншими інформаційними системами університету, такими як електронний кабінет студента, що дозволяє автоматично оновлювати дані здобувачів, груп, курсів, кафедр, факультетів.
- “ERP Odoo” дозволяє впровадити процес стимулювання науково-дослідної роботи індивідуального підходу здобувача;
- простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє легко адаптувати систему для використання різними групами користувачів: від здобувачів, викладачів до адміністративного персоналу.

Окрім того, “ERP Odoo” – це сучасна модульна ERP (Enterprise Resource Planning) система яка призначена для автоматизації бізнес-процесів у різних галузях. Вона відома своєю гнучкістю, широким спектром функціональних можливостей і доступністю як для малого, так і великого бізнесу та різного роду організацій і ЗВО зокрема. Варто відмітити, що даною системою також користується Товариство Червоного Хреста України, інші громадські організації. Система дозволяє інтегрувати всі аспекти діяльності організації в єдину платформу, сприяючи підвищенню ефективності та прозорості управління. “ERP Odoo” виникла як результат прагнення до створення універсального рішення для автоматизації бізнес-процесів. Її історія починається в 2005 році, коли була заснована компанія Tiny Sprl, яка згодом змінила свою назву на Odoo S.A.

Сьогодні “ERP Odoo” є однією з найбільш популярних ERP-систем у світі. Вона використовується тисячами компаній у різних галузях, від малого бізнесу до великих корпорацій. Odoo продовжує розвиватися, додаючи нові модулі і удосконалюючи вже існуючі. Завдяки активній спільноті розробників, система залишається в центрі уваги для користувачів, що шукають гнучке, масштабоване та економічне рішення для автоматизації бізнес-процесів.

Одним із ключових аспектів розвитку “ERP Odoo” є постійне оновлення та покращення версій. З 2014 року “ERP Odoo” випускає нові версії щорічно, що дозволяє покращувати функціональність та зручність користування. У жовтні 2024 року було випущено “ERP Odoo 18”, яка принесла нові можливості для інтеграції, управління даними та налаштувань.

Впровадження систем ERP, таких як Odoo, пропонують значні переваги, включаючи можливість генерувати фінансові звіти в режимі реального часу та відстежувати грошові потоки відповідно до логістичної діяльності компанії.[3]

Основні характеристики “ERP Odoo”:

- модульність: “ERP Odoo” пропонує понад 30 основних додатків (включаючи CRM, бухгалтерію, управління проектами, склад, закупівлі, маркетинг) і тисячі додаткових модулів, створених спільнотою. Це дозволяє адаптувати систему до потреб конкретної організації;
 - гнучкість та налаштованість: “ERP Odoo” підналаштовується до будь-якої галузі: торгівлі, виробництва, освіти, охорони здоров’я, тощо. Завдяки відкритому коду, система дозволяє розробляти кастомізовані рішення, що відповідають специфічним вимогам;
 - система інтегрованість: всі модулі “ERP Odoo” взаємопов’язані, що забезпечує безперервну динамічність процесів і обмін даними між різними департаментами;
 - відкритий код: наявність Community Edition з відкритим кодом робить “ERP Odoo” привабливим для малого бізнесу і стартапів, які прагнуть автоматизувати свою діяльність із заощадженням ресурсів;
 - доступність: “ERP Odoo” має веб-інтерфейс, який забезпечує можливість активності незалежно від часу, простору та пристрою;
 - спільнота та підтримка: велика спільнота розробників і користувачів активно працює над покращенням системи, створенням нових модулів і вирішенням технічних питань.
- Впровадження АСУР на базі “ERP Odoo” гарантовано забезпечує наступні переваги:
- автоматизація адміністративних процесів – скорочення обсягу рутинної роботи для працівників університету завдяки автоматичному збору, аналізу та обробці даних;

- покращення обслуговування здобувачів, які отримують можливість використовувати особистий кабінет для отримання інформації про контрактні зобов'язання, терміни платежів, а також для подачі запитів на підтримку;

- прозорість фінансових операцій – завдяки інтеграції модулів Sales та Invoicing автоматизується облік фінансів, формування рахунків та контроль оплати;

- підтримка ієрархічної структури університету – модуль Employee дозволяє відтворити структуру закладу з урахуванням ієрархії груп, курсів, кафедр, факультетів [4].

Архітектура рішення для “ERP Odoo” ґрунтується на клієнт-серверній моделі, що забезпечує централізоване управління даними та розподіл ресурсів.

Детальний опис основних компонентів архітектури та її переваг:

- клієнтська частина. Веб-додаток: “ERP Odoo” забезпечує веб-інтерфейс, доступний через будь-який сучасний веб-браузер. Це дозволяє користувачам з різних пристроїв (комп'ютери, ноутбуки, планшети, смартфони) підключатися до системи без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення;

- серверна частина. Сервер “ERP Odoo” - центральний сервер, на якому розгортається Odoo, відповідає за обробку запитів, управління базами даних та виконання бізнес-логіки. Він може бути розгорнутий на локальних серверах або в хмарі;

- база даних PostgreSQL: “ERP Odoo” використовує PostgreSQL для зберігання даних. Ця реляційна база даних забезпечує високу продуктивність, надійність і гнучкість у роботі з великими обсягами інформації.

- REST API інтеграція: Odoo має вбудоване API, що дозволяє інтегрувати його з іншими системами, такими як CRM, електронна пошта, платіжні системи, тим самим розширюючи можливості автоматизації бізнес-процесів.

- масштабування: завдяки модульній архітектурі Odoo користувачі можуть легко додавати нові модулі або налаштовувати існуючі відповідно до специфічних потреб.

Процес взаємодії основних компонентів архітектури наведено на рисунку 1.

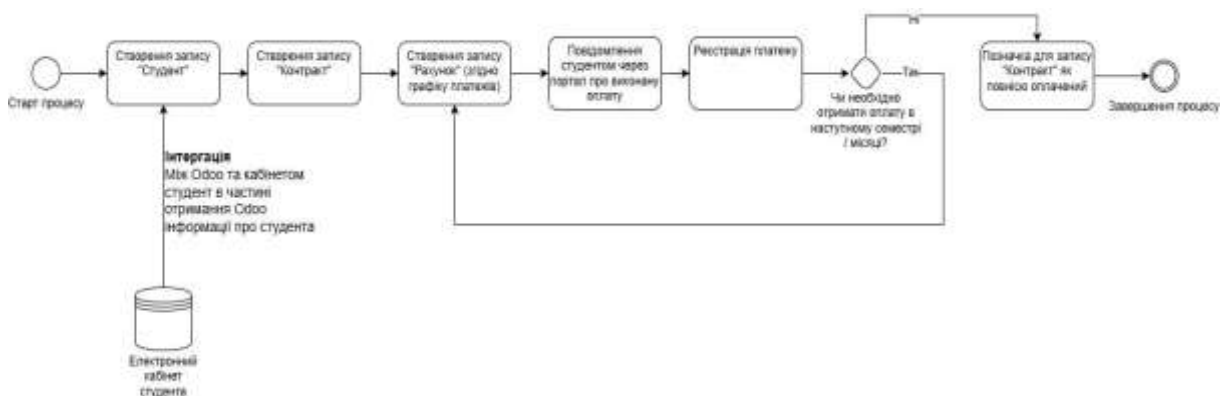


Рисунок 1 – Діаграма основного процесу роботи з контрактом

Реалізація рішення. Процес впровадження ERP-системи Odoo складався з декількох етапів, що забезпечує поступовість налаштування та оптимізації системи відповідно до потреб організації:

- підготовка серверного середовища та налаштування інфраструктури: система набуває стану розгорнутості після встановлення операційної системи Linux Ubuntu 24.04, веб-сервера NGINX та бази даних PostgreSQL 14, що забезпечує надійність та безпеку роботи платформи;

- налаштування основних модулів: у відповідності до інсталяції встановлено стандартні модулі “ERP Odoo” управління веб сайтом, контрактами, управлінсько-адміністративним обліком, службою підтримки та іншими функціями. Модулі були обрані таким чином, щоб охопити основні освітні та адміністративні процеси університету, включаючи обробку контрактів зі студентами та науково-дослідної роботи індивідуального підходу здобувача;

- інтеграція з електронним кабінетом студента: на основі REST API здійснено налагодження обміну даними системи з електронним кабінетом студента, що дозволило в свою чергу синхронізувати інформацію про здобувачів, групи, курси, кафедри факультети, структурні підрозділи і тим самим забезпечити автоматизацію лівової частки ручної роботи та уникнути помилок у веденні документації;

- розробка кастомних функцій: для реалізації специфічних функцій університету були розроблені та інтегровані додаткові модулі. Наприклад, було створено модуль для обробки заявок на підтримку від користувачів (студентів, викладачів та адміністрації), що полегшує спілкування та вирішення технічних питань;

- тестування та навчання персоналу: після початкового налаштування була проведена серія тестів для перевірки коректності роботи всіх модулів і процесів. Також було проведено навчання користувачів, що дало змогу персоналу університету ознайомитись із можливостями системи та налаштувати її під повсякденні потреби;

- запуск у тестовому режимі та збір зворотного зв'язку: після завершення локального налаштування системи, проводиться її апробація. Протягом даного періоду аналізуються отримані зауваження, пропозиції від користувачів, які дозволяють удосконалити функціонал та інтерфейс системи;

- остаточне впровадження: після успішного завершення тестування та внесення кореляційних поправок до системи, вона буде введена в повну експлуатацію, що дозволить університету автоматизувати ключові адміністративні процеси та підвищити ефективність роботи;

- сервісне обслуговування та масштабування: в ході поточної роботи системи є можливість в разі виникнення необхідності здійснювати покращення функціоналу системи на основі отриманих пропозицій та потреб університету.

Функції “ERP Odoo”, які адаптовані до потреб Луцького національного технічного університету. “ERP Odoo” який одночасно забезпечує комплексний набір стандартних функцій, що охоплюють різноманітні аспекти діяльності освітньої установи разом з тим, сприяє підвищенню ефективності комунікаційної взаємодії між учасниками освітнього процесу.

Основні функції, що використовуються у діяльності університету, включають:

- управління інформацією про здобувачів: “ERP Odoo” дозволяє зберігати та організувати дані про актуальну інформацію здобувачів: групу, курс, кафедра, факультет, форму навчання тощо. Це дає змогу адміністрації університету зручно отримувати актуальну інформацію про слухачів в режимі реального часу, що сприяє кращому управлінню освітнім процесом;

- облік контрактів між університетом та здобувачами: завдяки модулю для управління контрактами система надає можливість створювати та відстежувати договори між університетом і здобувачами на надання освітніх послуг, що дозволяє здійснювати контроль за укладанням договорів, моніторингом їх виконання, а також забезпечує прозорість фінансових операцій;

- фінансове управління та платіжні рахунки: “ERP Odoo” автоматизує процес формування та відправлення платіжних рахунків здобувачам, що значно зменшує навантаження на бухгалтерію. Здобувачі можуть підтверджувати здійснені платежі та завантажувати квитанції через особистий кабінет, що забезпечує зручність і прозорість фінансових операцій;

- модуль Helpdesk для підтримки запитів: система надає можливість студентам створювати запити щодо різноманітних аспектів навчального процесу, адміністративних або технічних питань. Це дає змогу адміністрації оперативно реагувати на проблеми та запити, покращуючи рівень підтримки здобувачів та забезпечуючи зворотній зв'язок;

- управління доступом та безпекою: “ERP Odoo” включає функцію управління доступом для різних категорій користувачів — здобувачів, викладачів, керівників структурних підрозділів та адміністрації. Це дозволяє регулювати доступ до чутливої інформації та внутрішніх ресурсів університету, що забезпечує належний рівень безпеки даних;

- управління навчальними процесом: система дозволяє адміністраторам університету в разі необхідності створювати та редагувати на даній платформі навчальні програми та відслідковувати їх виконання. Викладачі можуть отримувати інформацію про студентів, їх успішність, відвідуваність та участь у навчальних заходах, що сприяє поліпшенню моніторингу навчального процесу;

- інтеграція з іншими системами та модулями: “ERP Odoo” має можливість інтеграції з іншими зовнішніми системами через API, що дозволяє підключати додаткові інструменти для управління навчальним процесом, інформацією про студентів, а також для автоматизації інших аспектів діяльності університету.

Ці функції роблять систему “ERP Odoo” важливим інструментом для університетів, оскільки вони забезпечують оптимізацію внутрішніх процесів, автоматизацію адміністративних завдань і покращення взаємодії з усіма учасниками освітнього процесу. Використання “ERP

Одоо” дозволяє підвищити ефективність і прозорість роботи університету, що є ключовим для сучасної освітньої установи.

Інтерфейс користувача. Інтерфейс рішення складається з таких розділів:

1. Головна сторінка внутрішнього користувача (рисунок 2).

2. Модуль «Контракти»:

- управління «освітніми послугами» (рисунок 3);
- управління цінами та варіативність послуг (рисунок 4);
- створення контракту (рисунок 5);
- налаштування вартості послуг (рисунок 6);
- список послуг (рисунок 7).

3. Модуль «Виставлення рахунків»:

- створення рахунку до контракту (рисунок 8);
- реєстрація оплати за навчання (рисунок 9).

4. Модуль «Працівники»:

- управління працівниками (рисунок 10);
- створення працівників (рисунок 11).

5. Користувачі:

- керування користувачами (рисунок 12);
- сторінка користувача (рисунок 13).

6. Портальний доступ:

- головна сторінка (рисунок 14);
- сторінка користувача (рисунок 15);
- сторінка створення запиту до підтримки (рисунок 16).

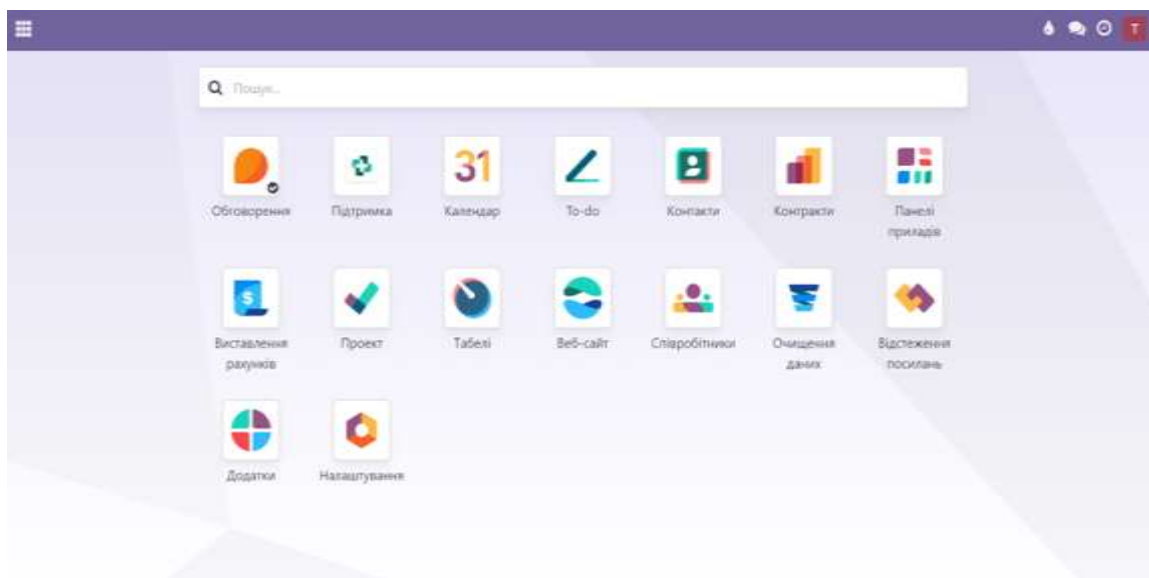


Рисунок 2 – Головна сторінка внутрішнього користувача

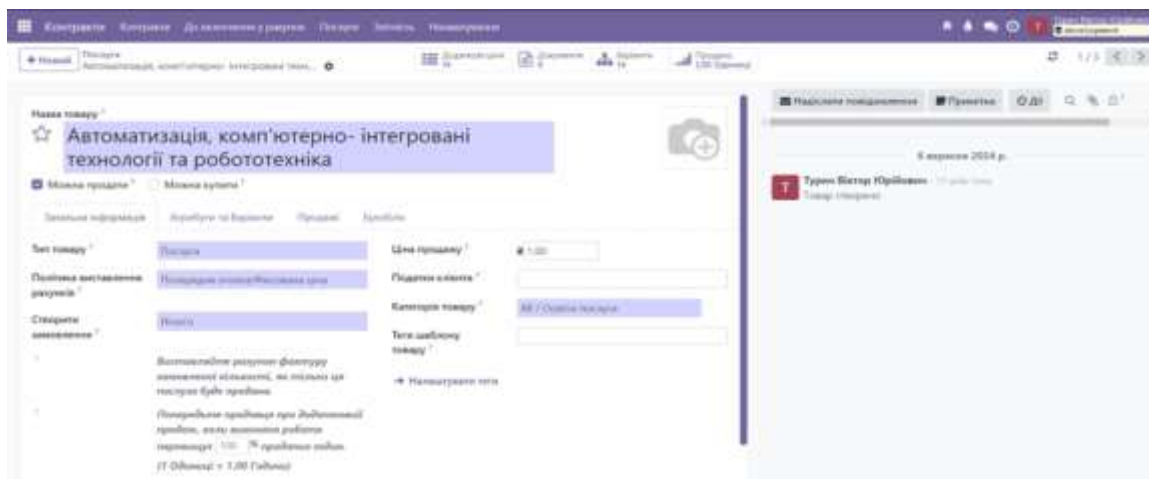


Рисунок 3 – Управління освітніми послугами. Загальні налаштування

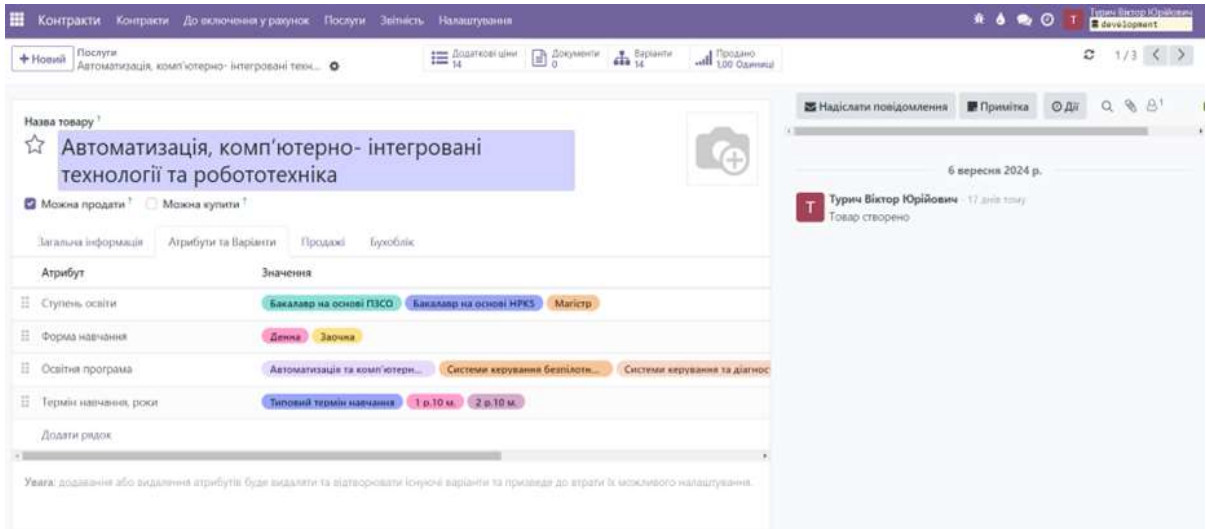


Рисунок 4 – Управління освітніми послугами. Варіативність

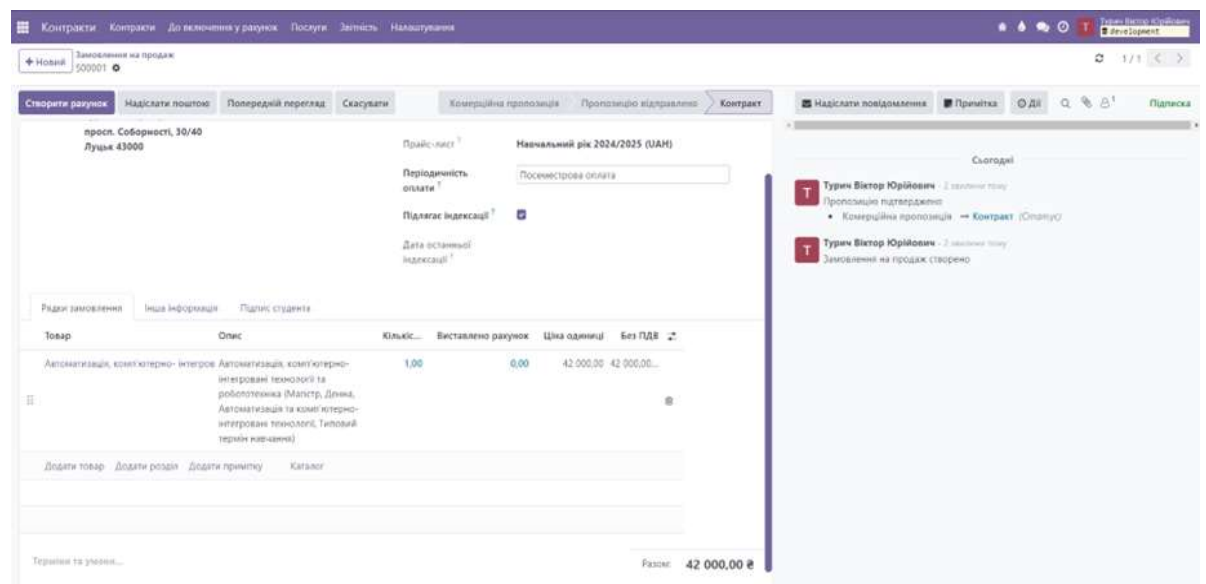


Рисунок 5 – Створення контракту

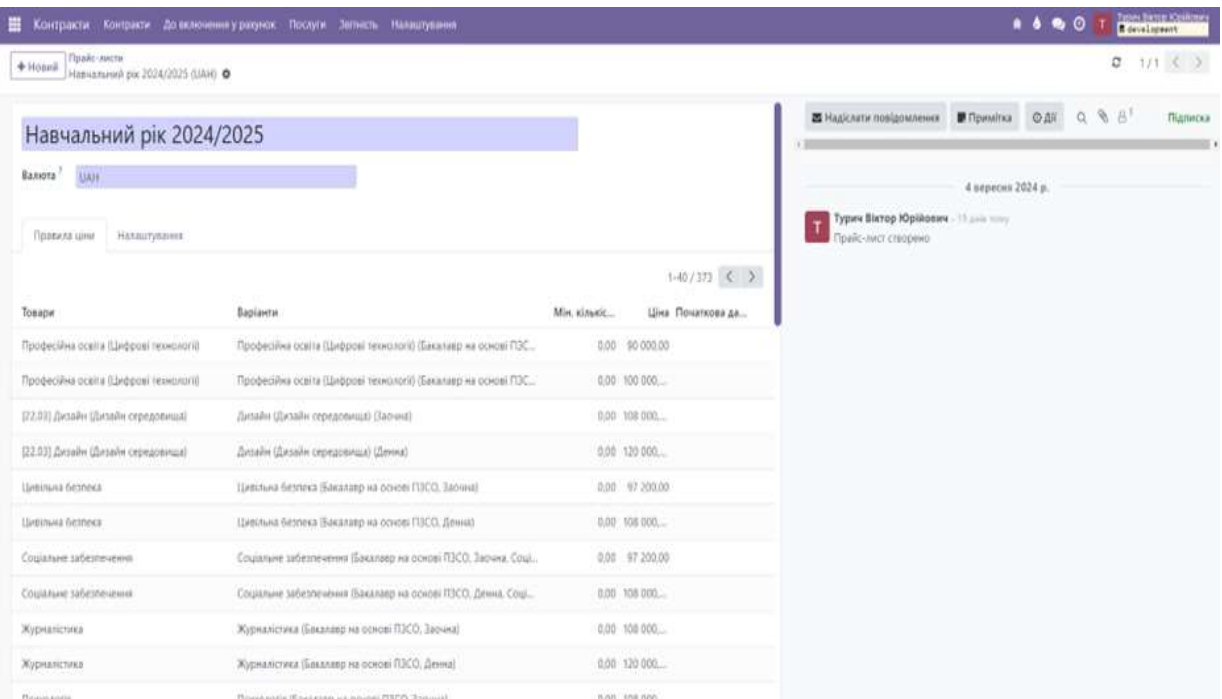


Рисунок 6 – Налаштування вартості послуг

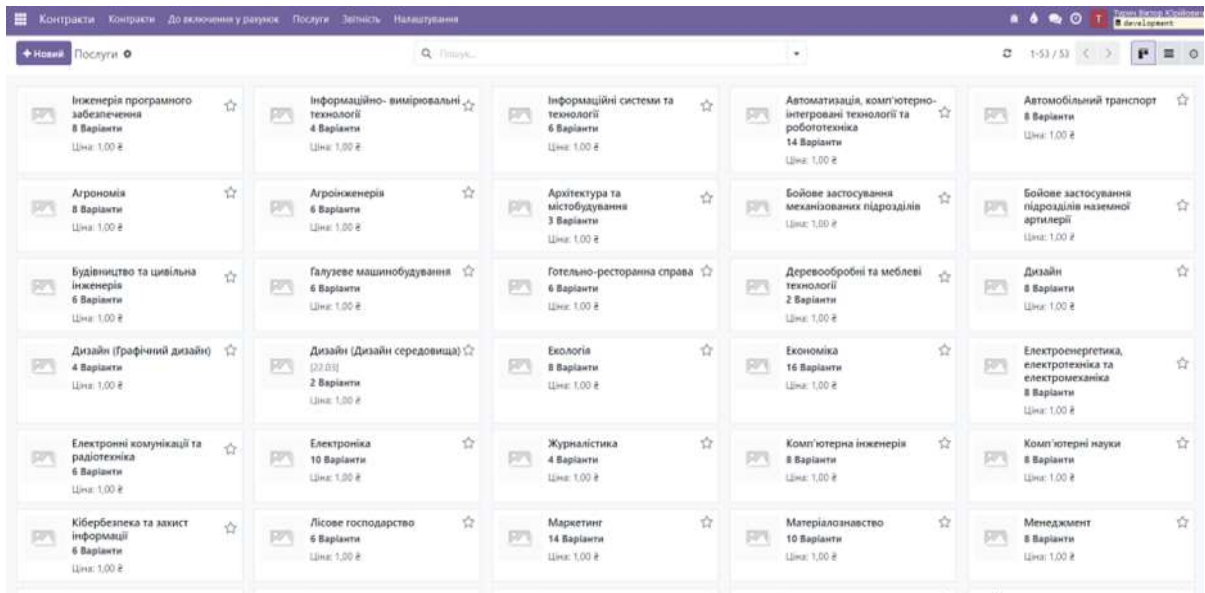


Рисунок 7 – Список послуг

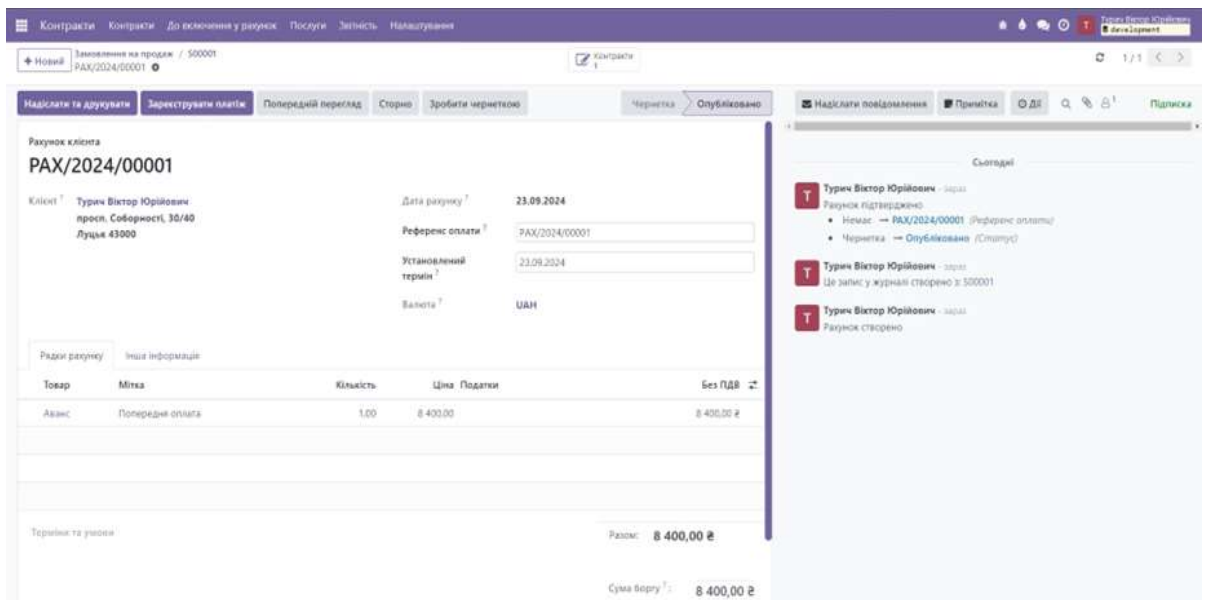


Рисунок 8 – Створення рахунку

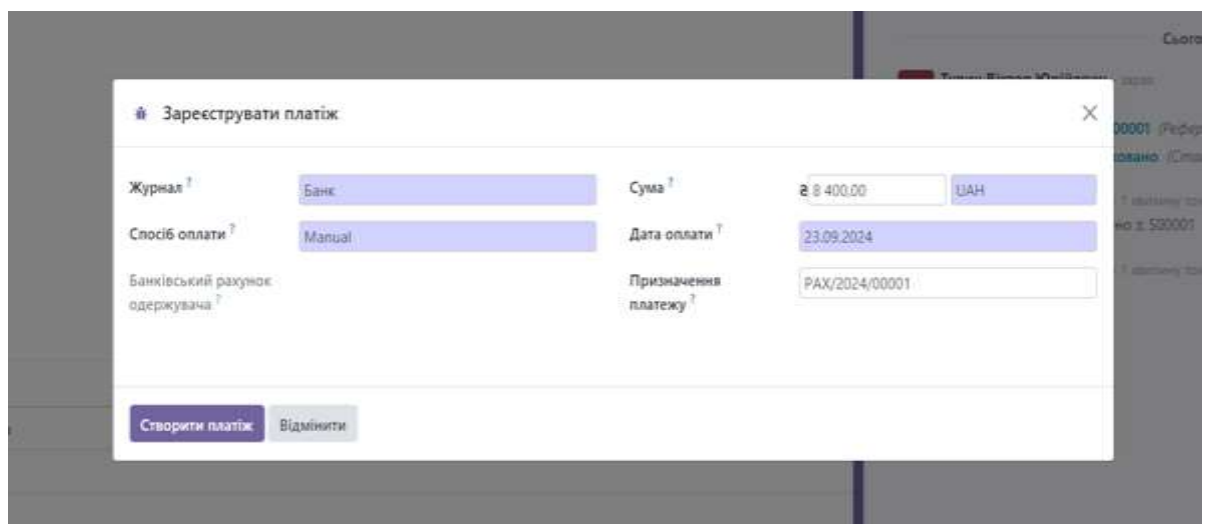


Рисунок 9 – Реєстрація оплати за навчання

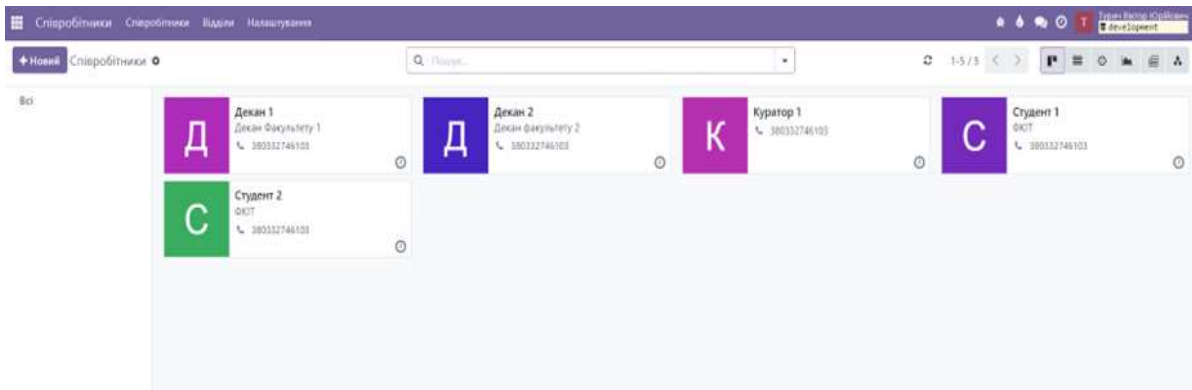


Рисунок 10 – Список працівників університету / здобувачів

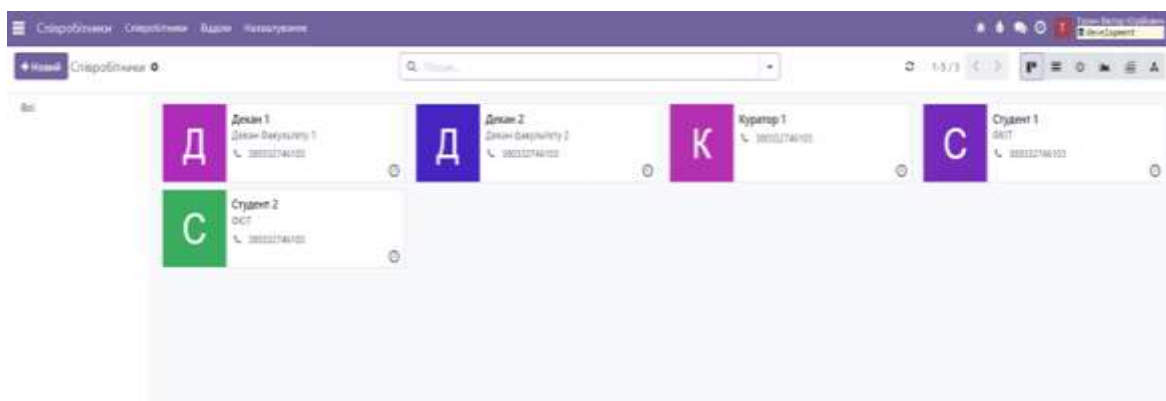


Рисунок 11 – Форма створення запису про студента

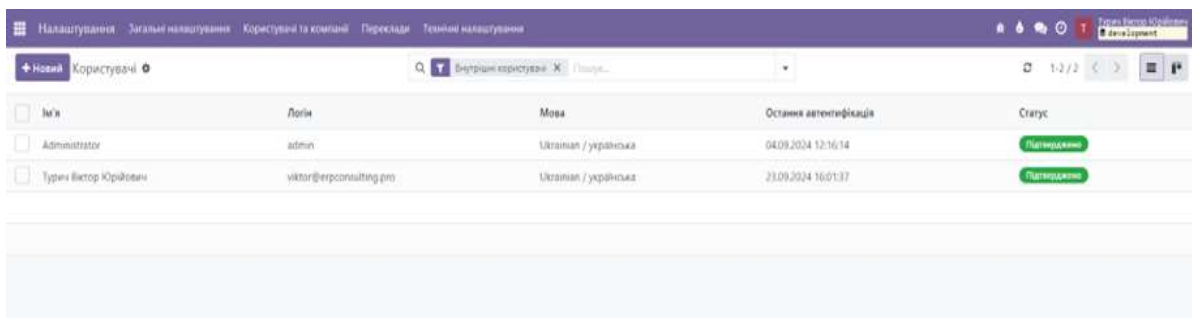


Рисунок 12 – Список користувачів

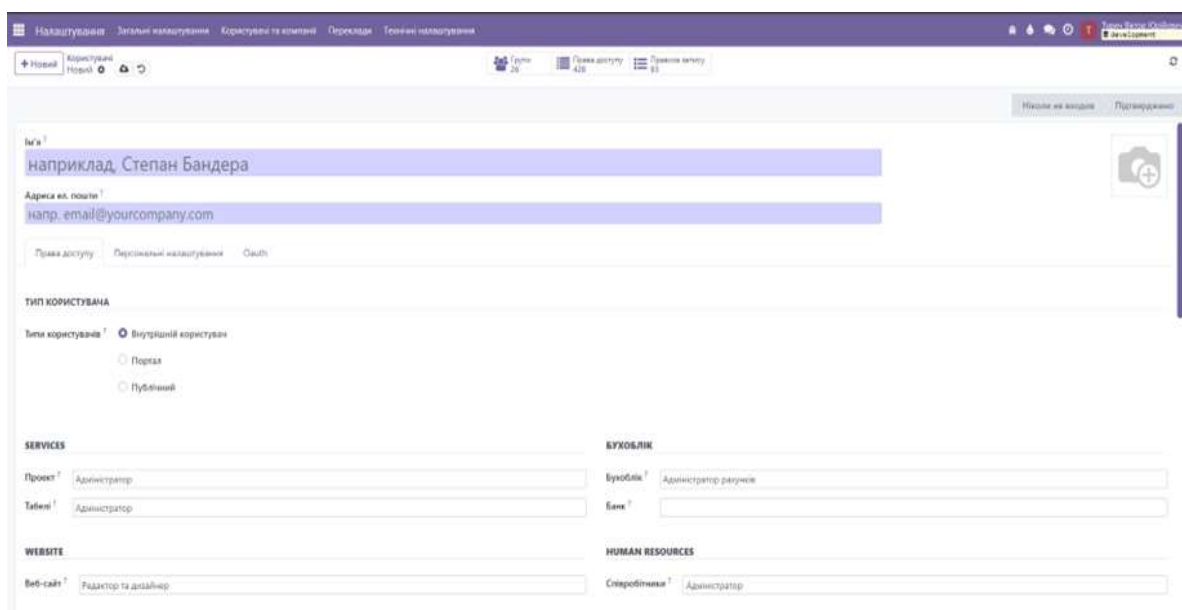


Рисунок 13 – Створення нового користувача

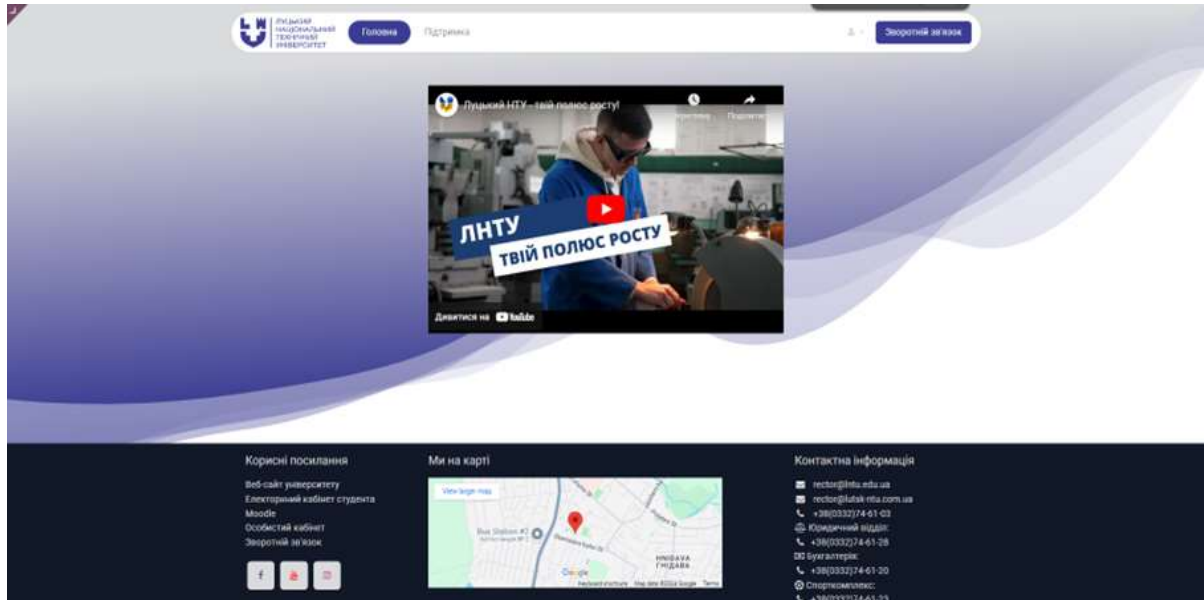


Рисунок 14 – Головна сторінка веб-порталу здобувача

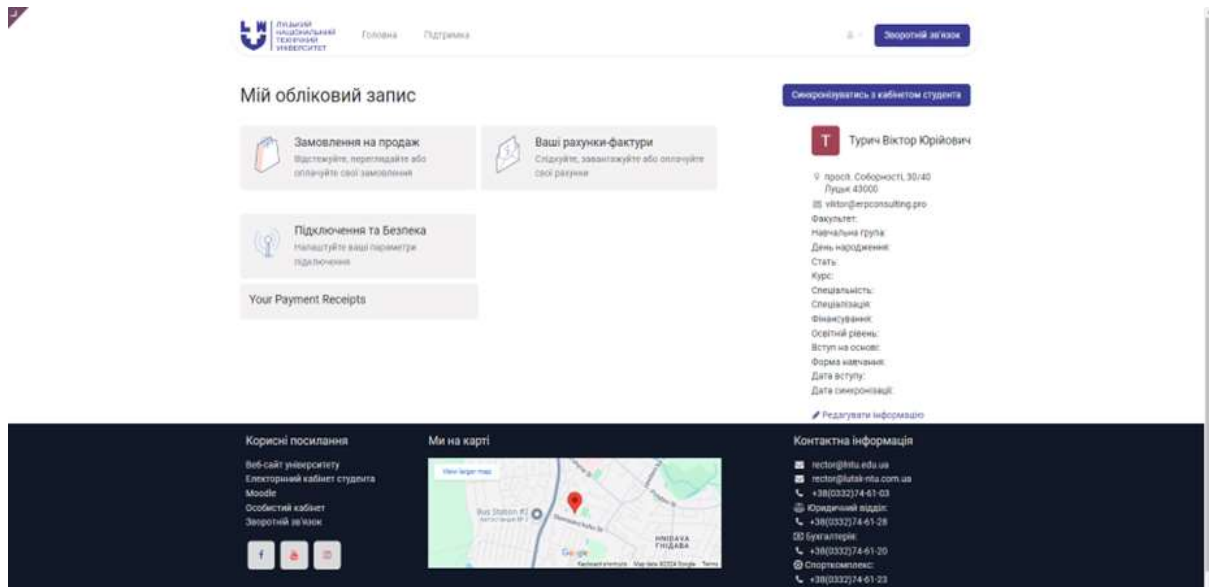


Рисунок 15 – Сторінка здобувача

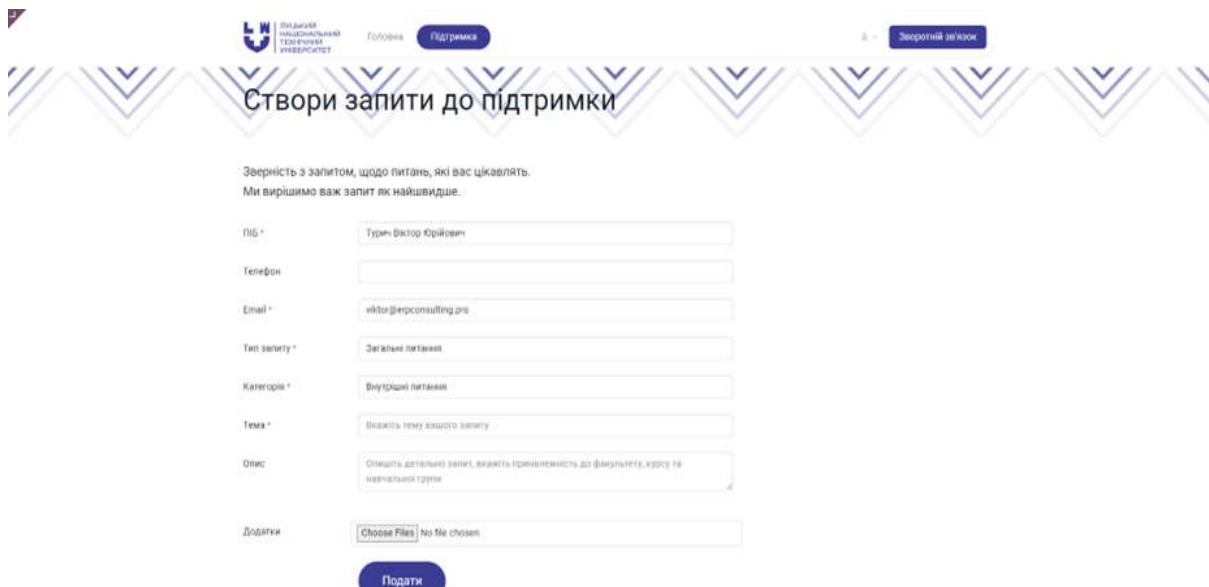


Рисунок 16 – Веб-сайт. Сторінка створення запиту до підтримки

Висновки. В даній статті розглянуто автоматизовані системи управління ресурсами, які мають великий потенціал для підвищення ефективності та покращення якості обслуговування у закладах вищої освіти. На основі проведеного детального аналізу систем “ERP SAP”, “ERP NEXT” та “ERP Odoo” було визначено, що кожна з цих систем пропонує своєрідний підхід до управління ресурсами та має ряд своїх недоліків та переваг, які проявляються в залежності від структури та потреб організації. Виходячи з проведеного аналізу був здійснений обґрунтований вибір на користь “ERP Odoo”, як найбільш оптимального рішення для структурних підрозділів закладу вищої освіти, так як система забезпечує значні переваги, включаючи можливість генерувати фінансові звіти в режимі реального часу та відстежувати грошові потоки відповідно до укладених контрактів.

Впровадження “ERP Odoo” для Луцького національного технічного університету має ряд позитивних переваг, а саме:

- управління інформацією про здобувачів: “ERP Odoo” дозволяє зберігати та організовувати дані про актуальну інформацію здобувачів: групу, курс, кафедра, факультет, форму навчання тощо. Це дає змогу адміністрації університету зручно отримувати актуальну інформацію про слухачів в режимі реального часу, що сприяє кращому управлінню освітнім процесом;

- облік контрактів між університетом та здобувачами: завдяки модулю для управління контрактами система надає можливість створювати та відстежувати договори між університетом і здобувачами на надання освітніх послуг, що дозволяє здійснювати контроль за укладанням договорів, моніторингом їх виконання, а також забезпечує прозорість фінансових операцій;

- фінансове управління та платіжні рахунки: “ERP Odoo” автоматизує процес формування та відправлення платіжних рахунків здобувачам, що значно зменшує навантаження на бухгалтерію. Здобувачі можуть підтверджувати здійснені платежі та завантажувати квитанції через особистий кабінет, що забезпечує зручність і прозорість фінансових операцій;

- модуль Helpdesk для підтримки запитів: система надає можливість студентам створювати запити щодо різноманітних аспектів навчального процесу, адміністративних або технічних питань. Це дає змогу адміністрації оперативно реагувати на проблеми та запити, покращуючи рівень підтримки здобувачів та забезпечуючи зворотній зв'язок;

- управління доступом та безпекою: “ERP Odoo” включає функцію управління доступом для різних категорій користувачів — здобувачів, викладачів, керівників структурних підрозділів та адміністрації. Це дозволяє регулювати доступ до чутливої інформації та внутрішніх ресурсів університету, що забезпечує належний рівень безпеки даних;

- управління навчальними процесом: система дозволяє адміністраторам університету в разі необхідності створювати та редагувати на даній платформі навчальні програми та відслідковувати їх виконання. Викладачі можуть отримувати інформацію про студентів, їх успішність, відвідуваність та участь у навчальних заходах, що сприяє поліпшенню моніторингу навчального процесу;

- інтеграція з іншими системами та модулями: “ERP Odoo” має можливість інтеграції з іншими зовнішніми системами через API, що дозволяє підключати додаткові інструменти для управління навчальним процесом, інформацією про студентів, а також для автоматизації інших аспектів діяльності університету.

Ці функції роблять систему “ERP Odoo” важливим інструментом для університетів, оскільки вони забезпечують оптимізацію внутрішніх процесів, автоматизацію адміністративних завдань і покращення взаємодії з усіма учасниками освітнього процесу. Використання “ERP Odoo” дозволяє підвищити ефективність і прозорість роботи університету, що є ключовим для сучасної освітньої установи.

Представлено діаграму основного процесу роботи з контрактом на якій представлено взаємодію основних архітектурних елементів розробленої системи “ERP Odoo” в Луцькому національному технічному університеті.

На рисунках представлених в роботі лаконічно відображено основні елементи графічного інтерфейсу користувача через які останній взаємодіє з системою.

Розроблена система на базі “ERP Odoo” для Луцького національного технічного університету є наглядним прикладом того, як АСУП забезпечують автоматизацію рутинних процесів, удосконалення аналітичної можливості в частині управлінського обліку, обліку контрактів між університетом та здобувачами, моніторингу здійснення вчасної оплати здобувачами за надані освітні послуги та дозволяє впровадити процес стимулювання науково-дослідної роботи індивідуального підходу здобувача тощо.

Подальше сервісне обслуговування та масштабування в ході поточної роботи системи забезпечують можливість, в разі виникнення необхідності, здійснювати покращення функціоналу системи на основі отриманих пропозицій та потреб університету.

Інформаційні джерела

1. Порівняльний аналіз ERP систем на базі Odoo та SAP на офіційному веб-сайт odoo.com. URL: <https://www.odoo.com/page/odoo-vs-SAP-business-on> (дата звернення: 10.11.2024).
2. Офіційний веб-сайт “ERP Odoo”. URL: <https://www.odoo.com> (дата звернення: 10.11.2024).
3. ERP System, unraveling the evolution and transformative impact on pt. xyz URL: <https://journal.ipm2kpe.or.id/index.php/COSTING/article/view/12775> (дата звернення: 10.11.2024).
4. Daudi H., Parth G. (2024). Odoo Development Cookbook: Build effective business applications using the latest features in Odoo 17 5th ed. Edition. pp. 12-40, 178-194.
4. Автоматизація обліку. URL: <https://buhgalter911.com/uk/programmy/avtomatizaciya-ucheta> (дата звернення: 10.11.2024).
5. Хімич С. (2023). Впровадження ERP-систем: вдосконалення управління цифровізацією бізнес процесів підприємства, 51-56. <https://doi.org/10.32689/2523-4536/72-8>.

Grudetsky R., Turych V., Satsyk V.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

PROSPECTS OF USING THE ERP SYSTEM “ODOO” IN HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS ON THE EXAMPLE OF LUTSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

The article examines the role and opportunities provided by the use of an automated resource management system (ASUR) in higher education institutions (HEIs) to optimize administration, improve the quality of service to applicants and simplify management processes. The article also provides a comparative analysis of solutions such as “ERP SAP”, “ERP NEXT” and “ERP Odoo”, and assesses their capabilities and limitations in the context of use in higher education institutions. The key advantages of implementing ASUR based on “ERP Odoo” and potential challenges are explored, in particular the issues of integrating this system with the student’s electronic office, staff training and ensuring data security. The process of implementing “ERP Odoo” to address the current administrative needs of higher education institutions is separately highlighted using the example of the solution developed for Lutsk National Technical University.

Keywords: *automated management, resource management system, ERP.*

УДК 658.328.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-07

Дашковська О. П., Книш О. І., Дзюба С. В.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

КОНТРОЛЬ ВЕЛИЧИНИ ПЕРЕХІДНИХ ОПОРІВ НУЛЬОВОГО ПРОВОДА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖІ

Проведений аналіз причин 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, яка своєчасно не пройшла обстеження. Розглянутий вплив обриву нульового провідника на аварійну ситуацію в електромережі, що може призвести до перевантаження одних електромереж та зменшення напруги в інших, як наслідок - зростання температури провідників електромережі, що приводить до загоряння оточуючих будівельних конструкцій та виникнення пожежі. Розглянута поведінка нульового провідника на врівноваженість системи та протікання компенсаторного струму по нульовому провіднику та вплив різних факторів, які можуть призвести до аварійної ситуації. Обґрунтована необхідність подальших пошуків технічних рішень для захисту електричних мереж від великого перехідного опору внаслідок обриву нульового проводу.

Ключові слова: пожежа, електричне джерело займання, нейтраль, електрообладнання; нульовий провід; великий перехідний опір, асиметрія фазових напруг.

Постановка проблеми. Використання електричної енергії для функціонування адміністративних установ, навчальних закладів та забезпечення комфорту в наших оселях стало настільки звичними, що ми нерідко забуваємо про безпеку, яку вона може викликати при недотриманні правил безпеки експлуатації споживачами електричних мереж та приладів. Особливу небезпеку представляють електромережі, які експлуатуються в житлових та адміністративних будівлях історичної забудови наших міст.

Як показують статистичні дані 43,4% пожеж в Україні трапляються саме внаслідок порушення правил улаштування і експлуатації електромереж, особливо в житловому секторі.

Якщо усі пожежі прийняти за 100%, то відповідно до статистичних даних про пожежі в Україні, пожежі від електроустановок у середньому складають 25%. У різних країнах світу, у залежності від особливостей ведення статистичного обліку пожеж, відсоток коливається від 20 % до 30 %.

Згідно Звіту «Про основні результати діяльності Державної служби України надзвичайних ситуацій ДСНС у 2023 році», яка реалізує державну політику у сфері цивільного захисту, населення і територій від надзвичайних ситуацій та запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятувальної справи, гасіння пожеж, пожежної та техногенної безпеки у 2023 році її основні зусилля наряду з ліквідацією наслідків збройної агресії росії проти України та наданні допомоги населенню, були зосереджені на гасінні пожеж та рятуванні людей; забезпечення нормальних умов життєдіяльності населення [1].

В 2023 році в Україні зареєстровано 67 934 пожеж. Унаслідок пожеж загинуло 1472 людини, у тому числі 40 дітей; 1551 людина отримали травми, у тому числі 145 дітей. Кількість дітей і підлітків до 18 років, які загинули внаслідок пожеж, збільшилася на 11,1%; кількість дітей і підлітків до 18 років, травмованих на пожежах, – на 18,9%. В середньому щодня в Україні виникало 186 пожеж, матеріальні втрати від яких становили 226 млн 76 тис. гривень; щодня внаслідок пожеж гинули 4 людини та 4 людини отримували травми; вогнем знищувалося або пошкоджувалося 78 будівель (споруд) і 15 одиниць техніки. Матеріальні втрати від пожеж становили 80 млрд 517 млн 865 тис. грн.

До основних причин виникнення пожеж електротехнічного характеру може бути: виникнення електричної дуги, коротке замикання, великий перехідний опір, іскріння, перехід електричного струму на металеві заземлюючі конструкції, перехід електричного струму на слаботочні електричні лінії (радіо, телефони), теплова дія електронагрівальних приладів, теплова дія електричних ламп накалювання (їх аварійний режим та проплавлення колб), аварійний режим роботи люмінесцентних світильників, перевантаження електричної мережі.

Аналіз літературних даних. При порушенні правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок джерелом запалювання являються аварійний режим роботи.

основних причин виникнення аварійних режимів роботи електромережі відносяться: перевантаження, коротке замикання, великі перехідні опори, які можуть виникати внаслідок багатьох причин, в тому числі і за рахунок наявності ділянок з великими перехідними опорами (ВПО) в нульовому проводі чотирьох провідної трьохфазної електромережі з глухо заземленою нейтраллю. ВПО виникають за рахунок втрати щільності контактних з'єднань, старіння, окислення металу, механічного пошкодження жили провідника, при надмірних та тривалих перевантаженнях. [2].

Найбільш надійний електричний ланцюг – це ланцюг з мінімальним числом розривів та з'єднань. Будь-який додатковий вузол контакту знижує загальну надійність всього контуру. Контактні з'єднання є невід'ємними ланками будь-яких ланцюгів: освітлювальних, і розеткових, і живлення апаратів, й просто лініями зв'язку між найближчою підстанцією та споживачами. Проявляється це зазвичай як нагрів провідників у місцях приєднання, а у основі такого явища лежить перехідний електричний опір. При цьому перехідний контактний опір завжди безпосередньо пов'язаний з рівнем аварійності об'єкта, тому необхідно домогтися найменшого перехідного опору та зберегти цей ефект на максимально можливий термін.

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 [3].

В роботі [4] в лабораторних умовах проведено моделювання великих перехідних опорів пожежонебезпечного режиму, що виникає в електротехнічних пристроях при протіканні електричного струму через так званий «поганий контакт». Сліди процесів, які протікають в неякісних контактних сполученнях в умовах великих перехідних опорів також були змодельовані в лабораторних умовах та досліджені різними методами: оптичної мікроскопії, металографії, растрової електронної мікроскопії. Встановлено, що найбільш інформативним методом виявлення характерних для ВПО слідів є растрова електронна мікроскопія (РЕМ). Показано, що поверхня контактів, яка зазнала вплив процесів, які виникли при проходженні електричного струму через ВПО, може мати сліди множинних іскрових мікророзрядів.

Порушення правил пожежної безпеки при експлуатації електроустановок, наявністю великої кількості старих електромереж не розрахованих на значну кількість електрообладнання з великою споживаною потужністю, висока ступінь зношеності будівель їх конструктивних елементів та інженерних мереж, особливо в будівлях історичної забудови, значно підвищує ризик виникнення пожеж. До середини 90 - х років в будівлях громадського і житлового призначення використовувалися алюмінієві провідники, а потужність електрообладнання були незначними [4].

Дуже важливо встановити причину пожежі, адже від цього залежить не тільки подальша робота електричної мережі, але і термін її служби. Тому огляд з місця пожежі для встановлення причини виникнення пожежі необхідно починати не тільки з приміщення, де почалася пожежа від електрообладнання, а необхідно обстежити стан всієї електричної мережі, починаючи від джерела живлення – трансформаторної підстанції - до найбільш віддалених споживачів електроенергії, які знаходяться на об'єктах пожежі.

В роботі [5] 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 роботі [6]. проводиться удосконалення вимог до вогнестійкості кабельних ліній живлення та управління систем протипожежного захисту будинків і споруд для подальшої їх реалізації в національних стандартах та будівельних нормах України. Якщо такі кабелі мають функціонувати в умовах пожежі протягом більше ніж 1 хв, то вони повинні бути вогнестійкими в умовах випробування за стандартом температурного режиму.

Метою дослідження [7] є підвищення електробезпеки мереж з ізольованою нейтраллю, що включають частотні перетворювачі, за рахунок контролю активного опору ізоляції відгалуження змінної частоти.

У європейських гармонізованих нормативних документах [8-10] встановлено вимоги щодо використання в системах електропроводки (кабельних лініях) будинків і споруд.

Незалежна оцінка стану використання пристроїв виявлення дугових замикань (AFDD) у Норвегії проведена в роботі [11]

У роботі [12] представлено та оцінено вплив споживаної споживачами потужності на значення показників коефіцієнта несиметрії нульової напруги у компенсованих електричних мережах середньої напруги із заземленою через індуктивність (котушку Петерсена) нейтраллю.

У роботі [13] пропонується технологія придушення неврівноваженого перенапруги та придушення дуги напруги на основі гнучкого керування напругою нульової послідовності розподільчої мережі.

Кожна методика має певні переваги та недоліки. Проте жодна з методик, що наведена вище, не дозволяє розрахувати ймовірність виникнення пожежі.

Постановка задачі та її розв'язання. Наша держава на сьогоднішній день знаходиться у стані війни, а наші вітчизняні електромережі знаходяться під постійними ракетними обстрілами, атаками БПЛА та постійним позачерговим ремонтом, тому вихід електромережі із ладу можливий в любую хвилину, а стрибок напруги – цілком типова ситуація, яка може призвести і до перегорання з'єднань провідників, до виникнення великих перехідних опорів і не тільки вивести із ладу любе обладнання, а й призвести до загорання.

Збільшення великих перехідних опорів ділянки електричного нульового проводу може виникати з різних причин та може бути викликано різними передумовами. Найбільш розповсюджені з них в електромережах будівель наступні: неякісний початковий монтаж; відсутність поточного обслуговування; асиметрія навантаження в розподільчому щиті відповідного під'їзду будівлі; вік електропроводки тощо. Слід відмітити, що ранжувати дані причини по важливості неможливо, тому що кожна з них через деякий час після монтажу майже з однаковою ймовірністю може привести до збільшення ВПО, або обриву загального нульового провідника. Частіше всього одноразове співпадіння декількох передумов, може прискорити той момент, коли провідник, який відводить електричний струм буде повністю відключений, тобто ВПО ділянки стане безкінечним.

На етапі монтажу поверхового щита, або під'їзної шафи, електрики могли виконати неякісне закріплення провідної жили в клемнику, що в подальшому могло проковувати постійне нагрівання.

Відсутність поточного обслуговування є логічним продовженням попереднього погано змонтованого з'єднання, якщо воно ніколи не перевірялось та не підтягувалося, окисли та іржа не очищалися з контактних площадок, в результаті чого нульовий провідник просто відгорів або від'єднався від своєї клема.

Збільшення ВПО ділянки електричного нульового проводу може виникати з різних причин та може бути викликано різними передумовами.

Так як в Україні на сьогоднішній день відбуваються воєнні дії, дуже багато сімей покинули свої квартири та виїхали за кордон, тому дуже часто одна квартира споживає більше електроенергії, друга значно менше (так як залишилися тільки люди похилого віку), а третя зовсім не споживає. В результаті цього по нульовому провіднику протікає компенсаторний струм, який термічно впливає на якість металу жили та через деякий час може привести до повного вигорання нуля.

Всі будівлі історичної забудови мають високий ступінь зношеності конструктивних елементів та інженерних мереж, а саме, головне те, що вся електромережа їх просто не була розрахована на рівень навантаження сьогодення. Тому старий нульовий провід, який страждає від часу та від надмірних навантажень неминуче розрушується, особливо в місцях з'єднань.

Електроенергія подається до споживача за лінійними кабелями. Нульовий провідник (нейтраль) використовується в електромережі для повернення струму від споживача назад до генеруючої станції. Нейтраль у нормальному стані виступає у ролі захисту та не має напруги.

Від трансформаторної підстанції електроенергія передається споживачеві за трьохфазною мережею. Вона складається з трьох провідників з робочою напругою, а також нульового та заземлюючого провідників. Пара робочих провідників мають між собою лінійну напругу $U_{л}=380$ В. Робочий провідник та нуль у парі мають напругу фазу $U_{ф}=220$ В.

За допомогою нульового провідника відбувається також саморегулювання навантаження у трьохфазній мережі. При нерівномірному навантаженні на фазах струм перерозподіляється через нульовий провід, що дозволяє системі автоматично врівноважуватись. Якщо ж електричний опір нульового провідника перевищує допустимі значення або виникає його обрив, то виникає аварійна ситуація в електромережі фазної напруги $U_{\phi}=220$ В в наслідок якої може виникати перевантаження одних електромереж та зменшення напруги в інших.

В однофазній мережі електричний струм I_{ϕ} тече по робочому провіднику до споживача та виходить у нейтраль. Напруга у нормальній ситуації між ними $U_{\phi} = 220$ В. У разі, коли опір нульового провідника R_0 збільшується, або стає безкінечним, то по мірі збільшення опору електромережі споживачів будуть переходити до підключення за схемою «зірка» без нульової магістралі». Це означає, що кожний споживач отримає не фазну стабільну напругу в $U_{\phi} = 220$ В, а лінійну $U_{\text{л}}=380$ В, яка, розподіляється між послідовно попарно з'єднаними споживачами. Із-за нерівномірного навантаження в електромережах різних споживачів, напруга на них може змінюватись в діапазоні від $U_{\text{л}} = 0$ В до $U_{\text{л}} = 380$ В. Коли напруга в електромережі споживача U_{ϕ} перевищує допустимі значення виникає аварійний режим роботи електромережі, зростає температура провідників електромережі, що приводить до загоряння оточуючих будівельних конструкцій та виникнення пожежі.

При обриві нейтралі (у ситуації з великим перехідним опором) лінійна напруга $U_{\text{л}}=380$ В розподіляється між послідовно з'єднаними споживачами різних фазних електричних мереж. Лінійна напруга перевищує фазну, тому при послідовному з'єднанні споживачів розподіл напруги на елементах проходить обернено пропорційно потужності споживачів. Перевищення падіння напруги $U_{\phi} = 220$ В на споживачі виходить більша напруга, яка й провокує вихід з ладу техніки.

З іншого боку, коли напруга зменшується (U_{ϕ} менше 198 В) погіршується або припиняється робота електричних приладів.

Як приклад, розглянемо три споживачі, які підключені до різних фаз (рисунок 1), а саме:

- споживачі підключені до першої фази електромережі $U_{\phi 1}$ використовують потужні електроприлади;
- споживачі підключені до другої фази електромережі $U_{\phi 2}$ залишили у режимі очікування деяку техніку малої потужності;
- споживачі підключені до третьої фази електромережі $U_{\phi 3}$ відключили свої електроприлади та не використовують електричну енергію так як квартира залишаються без господаря.

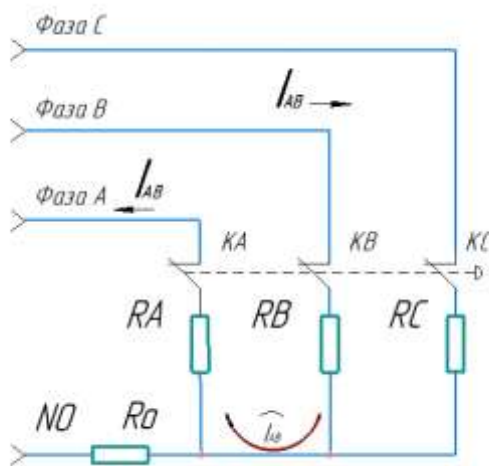


Рисунок 1 – Приклад підключення споживачів до різних фаз

У випадку, коли в мережі постачання опір нульового провідника R_0 наближається до безкінечності, а лінійна напруга $U_{\text{л}} = 380$ В виникає аварійний режим: асиметрія напруг фаз, в результаті чого, в одних споживачів напруга U_{ϕ} збільшується, а в інших зменшується, а саме:

- у споживачів підключених до першої фазної електромережі $U_{\phi 1}$ напруга на споживачах буде зменшуватись до 50...100 В, тому у споживачів першої фазної електромережі техніка буде працювати зі збоями, або припинить роботу тому, що напруга зменшиться;

- у споживачів підключених до другої фазної електромережі $U_{\phi 2}$ напруга на споживачах буде збільшуватись до 300...350 В підключені прилади вийдуть з ладу, а від теплової дії електричної енергії можливо виникне пожежа;

- у споживачів третьої фазної електромережі $U_{\phi 3}$ напруга на споживачах збільшиться до 300...350 В, проте споживачі третьої фазної електромережі відімкнені від електромережі, тому вони не постраждають.

Висновки. Таким чином для запобігання пожежам від теплової дії електричної енергії у будинках історичної забудови окрім контролю дотримання правил їх експлуатації, технічного стану електричного обладнання, електричних систем та приладів на наявність пошкоджень, використання безпечних електроприладів необхідно регулярно проводити контроль електричного опору нульового проводу провідника постачальної електромережі R_0 та наявність його пошкодження.

Величина R_0 відображає якість провідників та є гарантією безпеки електромережі. Величина перехідного опору нульового проводу не повинна перевищувати опір неушкодженого провідника більше як на 10 %. Це є одним з найважливіших показників стану електричної мережі.

Терміни перевірки нульового провідника постачальної електромережі R_0 на наявність великих перехідних опорів, які не відповідають технічним вимогам, що регулюють експлуатацію електричних мереж та електроустановок визначаються в відповідності до вимог нормативних документів. Періодичність вимірювання опору R_0 залежить від типу та категорії електроустановки, а також від умов її експлуатації. Зазвичай, цей термін встановлюється відповідно до вимог безпеки, ефективності та економічної доцільності.

Особливу увагу необхідно звернути на визначення R_0 прихованої проводки для визначення необхідних заходів для підтримання надійності та безпеки електричних мереж підвісних стель.

Для зниження ризику обриву нуля та інших аварійних ситуацій рекомендується дотримуватись наступних правил експлуатації трифазних електричних мереж:

1. Дотримання нормативів та стандартів. Усі роботи з монтажу та обслуговування електричних мереж повинні проводитись відповідно до чинних нормативів, вимог та стандартів. Це стосується як вибору матеріалів, так і методів монтажу та підключення обладнання.

2. Періодичне проведення діагностичних перевірок стану електропроводки, з'єднань, контактів та захисних пристроїв дозволить виявити потенційні проблеми на ранній стадії.

3. Навчання та підготовка персоналу. Електрики, що обслуговують, повинні бути навчені правильної експлуатації та обслуговування електричних мереж, а також заходам реагування на аварійні ситуації.

4. Планові заміни та модернізації. Електричне обладнання, що має ознаки зношування, слід замінювати планово, не чекаючи його виходу з ладу. Модернізація системи з використанням сучасних технологій також сприяє підвищенню надійності та безпеки роботи мережі.

Інформаційні джерела

1. ЗВІТ про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2023 році.

2. НАПБ А.01.001-2014. «Правила пожежної безпеки в Україні».

3. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Видавництво «Індустрія», 2017. 736 с.

4. Гудим В. І. Аналіз існуючої бази методів дослідження причетності аварійних режимів електромережі до виникнення пожежі // В. І. Гудим, О. Б. Назаровець // Техногенна безпека: теорія, практика, інновації: Зб. тез II Міжнар. наук.-практ. конф. – Л.: ЛДУ БЖД, 2011. С. 67–69.

5. Nazarovets O., Rudyk Y., Pererva R. Експериментальне дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань в електропроводах. April 2024. Journal of Scientific Papers Social development & Security 14(2):161-178. DOI:10.33445/sds.2024.14.2.15

6. Ігнатко А.І., Гулик Ю.Б. Про стан розроблення стандартів з питань пожежної безпеки міжнародними, регіональними та національними організаціями із стандартизації Зб. наук. праць ЛШПБ. Л: Сполом, 2001. №1. С. 60-62.

7. Василець К.С., Василець С.В. Контроль стану ізоляції відгалуження електричної мережі з перетворювачем частоти. Зб. наук. праць V Всеукр. наук.-техн. конф. Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень (АКУ-2019)» в м. Покровську 21-22 травня 2019 р. - Покровськ, ДонНТУ, 2019. С. 69-72.

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. Вибір та монтаж 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. Вибір та монтування електричного устаткування. Системи безпеки).

11. Status of the use of arc fault detection devices in Norway. IFE, Institute for Energy Technology. 25 March 2022.

12. Grzegorz Hołdyński, Zbigniew Skibko, Andrzej Borusiewicz. Analysis of the Influence of Load on the Value of Zero-Voltage Asymmetry in Medium-Voltage Networks Operating with Renewable Energy Sources. *Energies* (2023), 16(2), 580; <https://doi.org/10.3390/en16020580/>

13. Duyaο Zhou, Shilong Li, Xueneng Su, Shihang Sun, Xiaohan Liu, Xiangjun Zeng. New Technology of Three-phase Unbalanced Overvoltage Suppression and Voltage Arc Suppression Based on Distribution Network. *Journal of Physics: Conference Series* 2479 (2023) 012018 doi:10.1088/1742-6596/2479/1/012018

Dashkovska O., Knysh O., Dzyuba S.

Odesa State Academy of Construction and Architecture

CONTROL OF THE VALUE OF TRANSIENT RESISTANCES OF THE NEUTRAL WIRE OF THE ELECTRIC NETWORK TO PREVENT FIRE

The article analyzes the causes of emergency operation of electrical networks in old buildings, where the saturation of premises with technical life support systems has increased significantly, resulting in an increased load on electrical networks that exceeds the calculated values and causes frequent emergency shutdowns of the electrical network that has not been inspected in a timely manner. The article examines the effect of a break in the neutral conductor on an emergency situation in the electrical network, which can lead to an overload of some electrical networks and a decrease in voltage in others, as a consequence - an increase in the temperature of the electrical network conductors, which leads to ignition of surrounding building structures and a fire. The article examines the effect of the neutral conductor on the balance of the system and the flow of compensatory current through the neutral conductor and the influence of various factors that can lead to an emergency situation. The need for further searches for technical solutions to protect electrical networks from high transition resistance as a result of a break in the neutral conductor is substantiated.

Key words: fire, electrical ignition source, neutral, electrical equipment; zero wire; high transition resistance, phase voltage asymmetry.

УДК 621.3.049.76

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-08

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ І ПРОЄКТУВАННЯ АКТЮАТОРІВ ДИСКРЕТНОЇ ДІЇ

В статті описано застосування термобіметалевих актюаторів дискретної дії в конструкціях сучасних електротехнічних пристроїв. Встановлено, що термобіметалеві актюатори дискретної дії є відповідальними елементами цих пристроїв, так як від їх роботи залежить функціонування всієї системи. Термобіметалеві елементи деформуються нелінійно, прокладаючи при досягненні критичної температури. При аналізі актюаторів визначається їхня робоча характеристика, тобто залежність між величиною, що характеризує зміну геометричної форми і температурою навколишнього середовища. Завдання аналізу біметалевого актюатора дискретного дії полягає у визначенні його пружної характеристики, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури, при відомих конструктивних параметрах. Особливістю даної характеристики є стрибкоподібна зміна форми елемента при досягненні критичної температури. При цьому нова робоча точка потрапляє на верхню стабільну частину характеристики і при охолодженні до критичної температури реалізується зворотний перескок. Запропоновано методика чисельного аналізу і синтезу термобіметалевих актюаторів дискретної дії, що дозволяє удосконалювати існуючі і створювати нові конструкції актюаторів з заданими параметрами.

Ключові слова: актюатор дискретної дії, біметалевий актюатор, переміщення, аналіз, сигнал, керування, методика, розрахунок.

Постановка проблеми. В даний час мікроелектромеханічні системи (МЕМС) набули широкого поширення в техніці. Вони використовуються в автомобілебудуванні, авіакосмічній промисловості, енергетиці, хімії, фармакології, медицині. Для інноваційно-технологічного розвитку України роботи в області МЕМС є дуже значущими.

Будь-яка керуюча система здійснює контроль над об'єктом за допомогою керуючих сигналів, відповідна взаємодія здійснюється за допомогою сигналів зворотного зв'язку. МЕМС мають аналогічну структуру: сенсорна підсистема, актюаторна підсистема і підсистема аналізу інформації та прийняття рішень. Сенсорна підсистема служить для вимірювання стану контрольованого об'єкта. Це здійснюється за допомогою передачі електричного сигналу у відповідь на зміну будь-якої величини в системі. Актюаторна підсистема, навпаки, здійснює вплив на об'єкт управління: при підведенні до системи енергії реалізує керований рух [1].

Проблема дослідження. Залежно від виду перетворюваної енергії вибирають різні типи актюаторів: п'єзоелектричні, електромагнітні, електростатичні, біметалеві, термо-пневматичні, з ефектом пам'яті форми. Деформація біметалевих актюаторів обумовлена біметалевим ефектом. Їх область застосування різноманітна і включає в себе: термомеханічні перемикачі, реле, запобіжники, мікродзеркала, мікрозахвати, мікроперемикачі і маніпулятори тощо [1, 2].

До багатьох чутливих елементів сучасних технічних виробів пред'являються вимоги дискретного спрацьовування при монотонно змінному зовнішньому впливі. Добре відомі біметалеві актюатори куполоподібної форми, які змінюють напрямок кривизни на зворотний, прокладаючи при досягненні критичної температури. Незважаючи на простоту виготовлення, такі актюатори мають і ряд недоліків: нестабільна температура спрацьовування, обмежена величина реалізованих переміщень.

Таким чином, актуальність роботи визначається необхідністю вирішення важливого прикладного науково-технічного завдання, присвяченого розрахунку та проєктування актюаторів дискретної дії, що застосовуються у конструкціях електротехнічних пристроїв, поліпшенням їх якості та споживчих властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актюатори, що засновані на біметалевому ефекті складаються з двох шарів, виконаних з матеріалів із різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення (КЛТР) і міцно з'єднаних один з одним. Шар біметалу з більшим КЛТР називають активним, з меншим – пасивним. При нормальній температурі шари мають однакову довжину. При впливі температури шари подовжуються. Активний шар подовжується інтенсивніше, ніж пасивний. Тому шар з більшим КЛТР піддається стискаючим зусиллям, а шар

з меншим КЛТР – розтягуючим (рис. 1). Напруження, які виникають в перерізі біметалу розподіляються нерівномірно, тому виникають деформації і актюатор згинається в бік пасивного шару (на рисунку 2 чорний шар має менший КЛТР, ніж сірий).

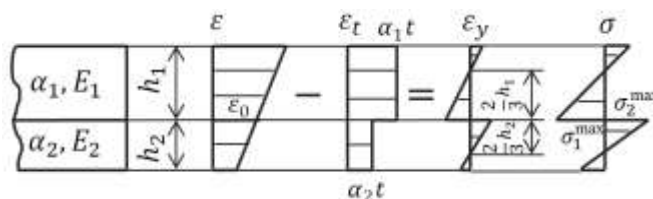


Рисунок 1 – Розподіл деформацій і напружень в біметалі



Рисунок 2 – Біметалевий актюатор у формі консольної балки

(А – недеформований стан, Б – деформований стан актюатора після нагрівання)

Прогини біметалевих стержнів значно перевищують прогини однорідних пластин. Порівняємо переміщення, одержувані при нагріванні однорідного стержня і біметалевої пластини з однаковим лінійним розміром (завдовжки 100 мм) на однакову температуру (100 °С). Стержень зі сплаву 75ГНД з високим КЛТР подовжується на 0,3 мм, що в 70 разів менше прогину біметалевої пластини марки ТБ2013 зі складовими 75ГНД і 36Н товщиною 1 мм (21 мм) [3].

Дешевий і доступний кремній є основним матеріалом, що використовується для виготовлення МЕМС. Технології мікроелектромеханіки орієнтовані на базові технології мікрообробки кремнію. Кремній має хороші термо-електроізоляційні властивості, високий коефіцієнт лінійного теплового розширення, більший, ніж у звичайних металів. Його електрофізичні характеристики стабільні протягом тривалого часу. Всі ці фактори вказують, що кремній є ідеальним матеріалом для створення актюаторів з великими переміщеннями і меншими витратами енергії [4].

Компенсування балансу хронометра за допомогою біметалу з латуні (коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha=18,7 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і сталі ($\alpha=13 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) є першим практичним застосуванням термобіметалів (1769 р.). Однак цей біметал не отримав широкого поширення через малу різницю КЛТР шарів.

Іншим прикладом одного з перших практичних застосувань біметалів є використання біметалу зі срібла ($\alpha=19,5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і платини ($\alpha=9 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) для термоелемента термометра у вигляді спіральної пружини (1817 р.).

Важливий для виробництва точних інструментів і приладів сплав інвар був відкритий в 1899 р. Ш. Гійомом, за що в 1920 р. шведсько-французький фізик отримав Нобелівську премію. Інвар на 36% складається з нікелю ($\alpha=13 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і на 64% з заліза ($\alpha=12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). В інтервалі температур від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ у інвару виникає ефект зникнення теплового розширення – сплав має мале значення ТКЛР ($\alpha=1,2 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

Аналіз нелінійного деформування біметалів стає особливо актуальним у зв'язку з появою актюаторів нового покоління, що використовують ефект проклацування. Для аналізу таких елементів потрібно визначити робочу характеристику, тобто залежність між зміною температури і величиною, що характеризує зміну геометричної форми елемента, а також напруження в конструкції. Ці задачі вперше були вирішені Віларсо. Також необхідно здійснювати синтез таких елементів для спрацьовування при заданій температурі.

Відомі аналітичні методики для аналізу тонкостінних оболонкових конструкцій [2] не дозволяють в повній мірі і з необхідною точністю врахувати всі особливості процесу нелінійного деформування сучасних біметалевих актюаторів, а також аналогічних виконавчих елементів, виготовлених з неметалевих матеріалів. Виявляється недостатнім досліджувати процес деформування тільки у докритичній області або розглядати задачу в лінійній постановці. Процес деформування виконавчих елементів і біметалевих актюаторів нових конструкцій є суттєво нелінійним, що залежать від багатьох параметрів, тому рішення, як правило, виявляється багатозначним і чутливим до малих збурень. Процес розрахунку і проектування подібних

елементів вимагає створення уточнених методик з використанням підходів багатокритеріальної оптимізації. Необхідно здійснити перехід від рішення задач аналізу до вирішення завдань синтезу раціональних конструкцій.

Використання для чисельного дослідження даного класу прикладних задач сучасних кінцево-елементних комплексів (ANSYS, Abaqus тощо) пов'язане зі значним часом розрахунку на ЕОМ і, по суті, є не зовсім придатним для вирішення завдань синтезу. У ряді випадків використання методу кінцевих елементів (МКЕ) важкозатратне і нераціональне, оскільки вимагає багаторазового перестроювання сітки при варіюванні геометричних параметрів конструкції [5].

Мета роботи полягає у розробці методики розрахунку та проектування складного багатопараметричного процесу нелінійного деформування актюаторів дискретної дії.

Викладення основного матеріалу. Актюатори у вигляді тонких біметалевих елементів активно використовуються в сучасних технічних пристроях. Найбільшого поширення набули біметалеві актюатори в формі ламелі, пластинки, диска з отвором в центрі або без нього (рис. 3).



Рисунок 3 – Біметалеві актюатори

Біметалевий актюатор є відповідальним елементом у великому спектрі електротехнічних пристроїв. Тому до чутливих елементів пред'являються високі вимоги за точністю і стабільністю роботи в будь-яких експлуатаційних умовах. Щоб уникнути поломки всього пристрою або аварійної ситуації, актюатор повинен бути правильно спроектований. У зв'язку з розвитком інформаційних технологій, систем автоматичного регулювання та робототехніки потрібно вдосконалювати існуючі та створювати нові конструкції біметалевих актюаторів. Тому необхідно розробити методику аналізу та синтезу таких елементів з урахуванням наявності великих переміщень і можливості дискретної зміни вихідної геометрії.

Термобіметалеві актюатори використовуються в термозапобіжниках, терморегуляторах, термореле, датчиках температури, термоелектричних перемикачах, термовимикачах, термоклапанах для контролю і регулювання температури, а також для захисту теплоенергетичних об'єктів від перегріву.

Дія таких приладів заснована на властивості актюаторів у формі пологих оболонок стрибкоподібно змінювати напрямок прогину (прокладувати) при досягненні критичної температури, забезпечуючи релейну характеристику процесу. На рисунку 4 показано принцип роботи теплового перемикача з термобіметалевим чутливим елементом [3]. Переміщення точок зовнішнього контуру осесиметричного актюатора або характерної точки актюатора складної форми передається безпосередньо або за допомогою важільної системи пристрою, що формує вихідний сигнал. Нагрівання біметалевих актюаторів може здійснюватися теплообміном з середовищем і внаслідок проходження електричного струму через актюатор. Якщо струм досягає критичної величини, оболонка втрачає стійкість, прокладує вниз і ланцюг струму, що йде через закріплені на краях оболонки контакти, розривається. При охолодженні оболонка прокладує назад. У деяких приладах перемикач включається натисненням кнопки.

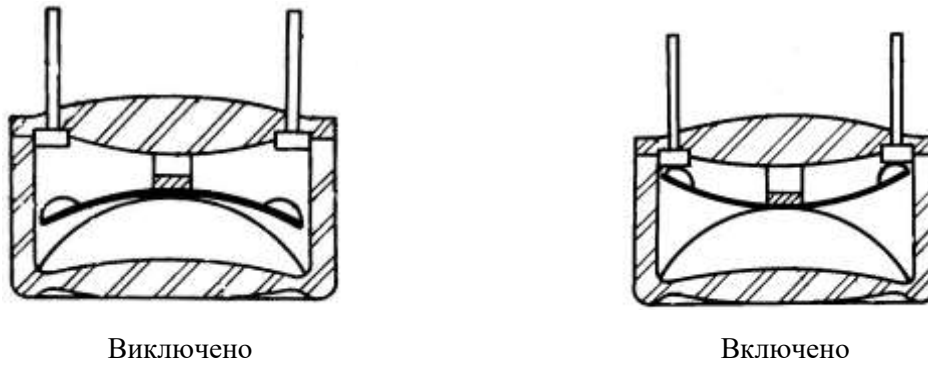


Рисунок 4 – Принцип роботи теплового перемикача з термобіметалевим чутливим елементом

Реалізація руху є основною властивістю актюаторів, що використовують принцип керованої деформації. Деформаційні процеси повинні забезпечувати великі переміщення, співмірні з характерними розмірами конструкції [3]. Тому розрахунки в рамках припущення малих переміщень та принципу незалежності початкових розмірів виявляються не застосовними.

Задача аналізу полягає у визначенні робочої характеристики термобіметалевого елемента, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури T , при відомих конструктивних параметрах. На рисунку 5 зображені положення термобіметалевої оболонки до і після проклацування.

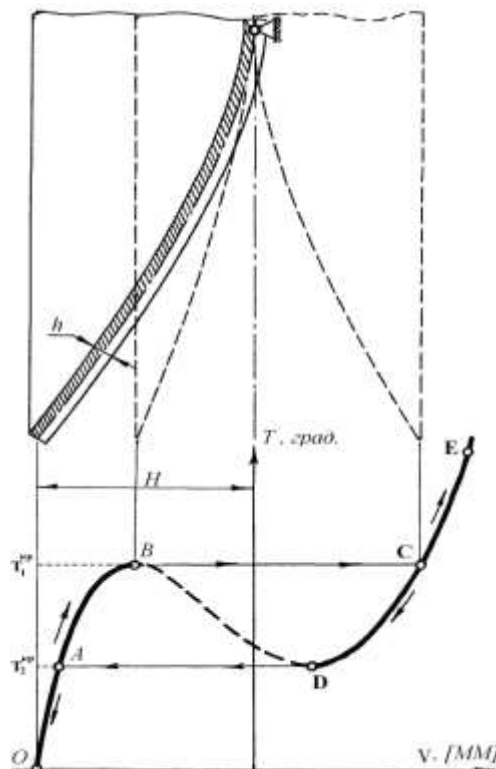


Рисунок 5 – Робоча характеристика чутливого елемента температурного перемикача

При підвищенні температури актюатор починає деформуватися. У точці В (верхнє критичне навантаження) актюатор миттєво змінює напрямок прогину, проклащуючи при прогині v_B . Нова робоча точка С потрапляє на верхню стабільну частину характеристики. При зниженні температури елемент проклащує в точці D (нижнє критичне навантаження). Тобто релейна частина характеристики термобіметалевого диска визначається різницею переміщень $v_C - v_B$, а зона нечутливості за температурою дорівнює $T_1^{kp} - T_2^{kp}$.

Проектовані конструкції повинні задовольняти традиційним вимогам міцності,

довговічності, надійності, поряд зі специфічними вимогами швидкодії, забезпечення необхідних контактних зусиль і відсутності брязкоту [3, 4, 5]. Завдання синтезу полягає в підборі оптимальних конструктивних параметрів для реалізації необхідної нелінійної характеристики. На властивості термометалевого актюатора впливають фактори, які залежать:

- від властивостей термометалів (товщини шарів, модулі пружності шарів, коефіцієнти Пуассона шарів, КЛТР шарів);
- від конструкції актюатора (форма термометалевої оболонки, її радіус кривизни, висота підйому купола, умови закріплення);
- від технології виготовлення;
- від умов експлуатації (температурні і механічні навантаження на елемент, величина попереднього підтискання).

Експериментальний підбір раціонального поєднання параметрів представляється надзвичайно трудомістким завданням, тому що для його здійснення потрібно виготовити велику кількість типорозмірів у металі [5]. Тому розробка методики чисельного аналізу і синтезу термометалевих актюаторів розглянутого класу є актуальною задачею.

При деякому значенні зовнішнього тиску (критичне значення) сферична форма оболонки виявляється нестійкою і на ній з'являються вм'ятини [5]. Критичний тиск сферичної оболонки визначається за формулою:

$$Q_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h}{R_m} \right)^2, \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу оболонки,

ν – коефіцієнт Пуассона,

h – товщина оболонки,

R_m – радіус кривизни сферичної оболонки.

Можливість врахувати нелінійність процесу деформування оболонки і отримати аналітичний опис процесу втрати стійкості при прокладуванні і закритичної поведінки з'явилася після отримання К. Маргерром диференціальних рівнянь тонких пружних оболонок. Е. Рейсснер запропонував уточнену систему диференціальних рівнянь [2].

Незважаючи на прогрес в області розрахунків, було помічено, що теоретичні значення критичних навантажень для оболонок виявлялися більше експериментальних. Залежність критичних навантажень від параметра тонкостінних b :

$$b = \sqrt[4]{1-\nu} \frac{r}{\sqrt{R_m h}}, \quad (2)$$

де r – радіус опорної поверхні сферичної оболонки.

Тому потрібно було оцінити вплив початкових недосконалостей форми купола і уточнити характер процесу нелінійного деформування, в тому числі в закритичній області [2].

На рисунку 6 зображена залежність безрозмірного прогину центральної точки пологої сферичної оболонки:

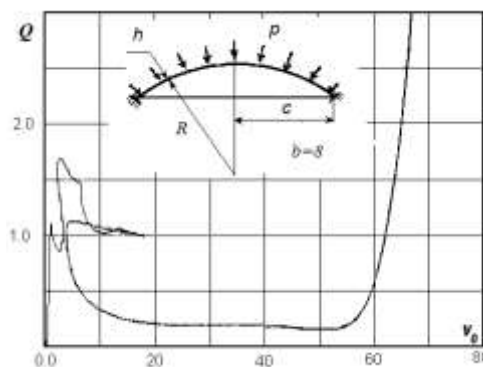


Рисунок 6 – Залежність прогину центральної точки пологої сферичної оболонки від безрозмірного параметра тиску Q

$$v_0 = \frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}\nu(0)}{h}, \quad (3)$$

де $v(0)$ – розмірний прогин центральної точки) від безрозмірного параметру тиску $Q \left(Q = \sqrt[4]{12(1-v^2)} \frac{pR^2}{4Eh^2} \right)$.

При аналізі осесиметричної деформації купола вирішується крайова задача для системи диференціальних рівнянь 6-го порядку, тому рішення задачі Коші при відомих умовах навантаження і закріплення визначається значеннями трьох невідомих компонент початкового вектора і параметром навантаження.

Висновки. Термобіметалеві актюатори дискретної дії є відповідальними елементами пристроїв, так як від їх роботи залежить функціонування всієї системи. Термобіметалеві елементи деформуються нелінійно, прокладаючи при досягненні критичної температури. Найбільшого поширення отримали біметалічні актюатори в формі ламелі, пластинки, диску з отвором в центрі або без нього.

При аналізі актюаторів визначається їхня робоча характеристика, тобто залежність між величиною, що характеризує зміну геометричної форми і температурою навколишнього середовища. Завдання аналізу біметалічного актюатора дискретної дії полягає у визначенні його пружної характеристики, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури T , при відомих конструктивних параметрах. Особливістю даної характеристики є стрибкоподібна зміна форми елемента при досягненні критичної температури T_1^{kp} . При цьому нова робоча точка потрапляє на верхню стабільну частину характеристики і при охолодженні до критичної температури T_2^{kp} реалізується зворотний перескок.

Інформаційні джерела

1. Філяшкін М. К. Мікроелектромеханічні системи: навч. посібн. Київ: НАУ, 2019. 276 с.
2. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. Київ: НАУ, 2017. 528 с.
3. Теслюк В. М., Кривий Р. З., Мельник М. Р. Автоматизація проектування MEMS з використанням системи COMSOL: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2016. 216 с.
4. Боровий М. О., Куницький Ю. А., Каленик О. О., Овсієнко І. В., Цареградська Т. Л. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої: навч. посіб. Київ: Інтерсервіс, 2015. 350 с.
5. Денисюк В. Ю. Дослідження методів проектування і розрахунку актюаторів дискретної дії. «Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів»: зб. наук. праць VII Міжнар. наук.-техн. конф. м. Луцьк, 28-30 трав. 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 172-173.

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

METHOD OF CALCULATION AND DESIGN OF DISCRETE ACTION ACTUATORS

The article describes the use of thermobimetallic actuators of discrete action in the designs of modern electrical devices. It has been established that thermobimetallic actuators of discrete action are the responsible elements of these devices, as the functioning of the entire system depends on their operation. Thermobimetallic elements deform non-linearly, cracking when a critical temperature is reached. When analyzing the actuators, their operating characteristics are determined, that is, the dependence between the value characterizing the change in geometric shape and the ambient temperature. The task of analyzing a bimetallic actuator of discrete action is to determine its elastic characteristics, that is, the dependence between the movement of a characteristic point and a change in temperature, with known design parameters. A feature of this characteristic is a sudden change in the shape of the element when the critical temperature is reached. At the same time, the new operating point falls on the upper stable part of the characteristic, and upon cooling to the critical temperature, a reverse jump is realized. A method of numerical analysis and synthesis of thermobimetallic actuators of discrete action is proposed, which allows to improve existing and create new designs of actuators with given parameters.

Key words: discrete action actuator, bimetallic actuator, movement, analysis, signal, control, technique, calculation.

УДК 543.3, 628.1

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-09

Дорожинська Г. В.

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

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОНІКИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

У даній роботі розглядається застосування плазмонних сенсорів для оцінки ефективності процесів очищення води після фільтрації. Особлива увага приділяється перевагам цього методу порівняно з традиційними підходами, а також можливості його впровадження для моніторингу у реальному часі. Отримані результати показали ефективність очищення водопровідної та питної артезіанської води фільтруючими пристроями на основі активованого вугілля та іоннообмінних смол. Резонансний кут для води питної артезіанської після фільтрації змінився у 2,5 рази та для водопровідної води після фільтрації майже в 7 разів. Зменшення солей в зразках підтверджено зменшенням електропровідності. В результаті експериментальних досліджень виявлено, що після фільтрації водопровідної води відбулось збільшення кількості амонію в 2 рази, що може бути пов'язане з тим, що у зразку з часом накопичилось багато органічних або неорганічних речовин, які створюють умови для бактеріальної активності. Це свідчить про те, що необхідно застосовувати додаткове очищення води від мікроорганізмів, окрім хлорування. Перспективність досліджень полягає у використанні сенсорів на основі плазмонного резонансу для оцінки ефективності очищення води та контролю після застосування різних методів знезараження.

Ключові слова: сенсор, плазмонний резонанс, кінетика, фільтри, очищення води.

Постановка проблеми. В умовах зростання антропогенного впливу та збільшення забруднення природних водних ресурсів, виникає необхідність у впровадженні технологій, що дозволяють ефективно оцінювати якість води та контролювати процеси її очищення від небажаних домішок. Традиційні методи контролю якості води як от хімічний аналіз чи мікробіологічний аналіз на визначення присутності патогенних мікроорганізмів часто потребують тривалого часу на проведення аналізів. Для багатьох методів потрібна складна підготовка зразків, дорогі хімічні реагенти, використання складного лабораторного обладнання (наприклад, хроматографів). Водночас, сучасні фізико-хімічні методи, такі як плазмоніка, пропонують нові перспективи у швидкому та точному моніторингу якості води. Плазмоніка базується на явищі поверхневого плазмонного резонансу, яке дозволяє виявляти навіть незначні зміни у складі води, що робить цей метод перспективним для оцінки ефективності систем очищення.

Завдання, аналіз літературних джерел та одержані результати роботи. Метою роботи є дослідження можливостей використання методів плазмонного резонансу для моніторингу та оцінки якості очищення води.

Оптичні сенсори на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) отримали широке застосування завдяки високій чутливості, можливості в реальному часі спостерігати за процесами хімічних та біологічних взаємодій на поверхні чутливого елемента, що дає можливість з отриманих кінетик вимірювань досліджувати динаміку процесів, стабільність та тривалість взаємодій, визначати швидкість асоціації та дисоціації молекул, точніше характеризувати параметри взаємодій, здійснювати швидкий аналіз без необхідності міток, що спрощує процес підготовки зразків та дозволяє спостерігати взаємодії в їхньому початковому стані [1]. При наявності селективного шару метод ППР може виявляти навіть слабкі взаємодії між молекулами, що робить цей метод незамінним для вивчення білково-білкових, білково-ДНК або інших біомолекулярних комплексів [2].

Сенсори на основі ППР можуть визначати присутність у воді різноманітних токсичних забруднювачів, таких як важкі метали (наприклад, свинець, кадмій, ртуть), пестициди, органічні сполуки та інші хімічні речовини [4]. Завдяки можливості працювати в режимі реального часу, сенсори можуть швидко реагувати на зміни у складі води. Особливістю ППР-сенсорів у порівнянні з оптичними рефрактометрами є можливість визначати домішки в колоїдних та дисперсних середовищах при малих концентраціях. В роботі [4] експериментальні результати показали високу чутливість методу ППР ($840 \text{ кут. хв} \cdot \text{мкг}^{-1} \cdot \text{мл}$) до малих концентрацій синтетичних алмазних нанопорошків розміром менше одного мікрона у водній суспензії. У

роботі [5] наведено можливість детектування за допомогою ППР-сенсора малих концентрацій нанодисперсних водних суспензій не лише наночастинок алмазів, а й діоксиду кремнію SiO_2 , заліза Fe і його оксиду Fe_2O_3 , оскільки вони найбільш часто присутні в питній воді, якість якої необхідно контролювати. Метод ППР також був використаний для вивчення процесу очищення водопровідної води при її виморожуванні [6].

Сенсори на основі ППР працюють на основі явища резонансу між падаючим світлом та електромагнітними хвилями, що виникають на поверхні тонкого шару металу, що є чутливим елементом. Серед металів для ППР-сенсорів зазвичай обирають золото через його виняткову хімічну інертність та високу електропровідність [3]. При будь-яких змінах в досліджуваному середовищі на поверхні чутливого елемента, змінюються умови резонансу, що фіксується у вигляді зміни кута відбиття світла. В результаті вимірювання інтенсивності випромінювання при зміні кута падіння його на чутливий елемент отримується характеристика відбиття, на якій реєструється резонансний кут мінімуму ППР θ_{min} .

В роботі використано ППР-сенсор побудований на геометрії Кречмана, що містить призму для забезпечення повного внутрішнього відбиття, на яку нанесено плазмон-носійний шар металу, який контактує з досліджуванним середовищем. Основні характеристики приладу на основі ППР, що використаний в дослідженні, наведені в роботі [4]. Для збудження поверхневих плазмонів використано монохроматичне джерело світла з довжиною хвилі випромінювання 650 нм, використана призма з оптичного скла марки К8 та плазмон-носійна плівка золота товщиною 53 нм. Було визначено чутливість ППР-сенсора при заміщенні дистильованої деіонізованої води (опір 18 МОм) розчином хлориду натрію (концентрація 9 мг/мл). Чутливість визначали як відношення зміни резонансного кута до зміни показника заломлення. Показники заломлення вимірювали на рефрактометрі ИРФ-454, що має похибку вимірювання $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. Виміряні значення показника заломлення становили: $1,3330 \pm 0,0002$ для дистильованої води та $1,3345 \pm 0,0002$ для розчину хлориду натрію. Методом ППР виміряно часову залежність резонансного кута при заміщенні дистильованої води на розчин хлориду натрію (рис. 1), де відгук сенсора становив 0,15 кутових градусів.

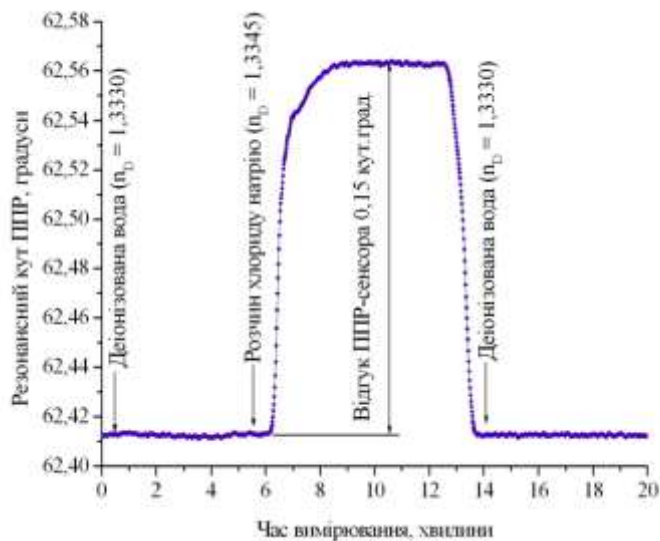


Рисунок 1 – Виміряна кінетика відгуку ППР-сенсора для дистильованої води та для розчину хлориду натрію

Розрахована чутливість становила 100 град./RIU (RIU (refractive index unit) - позасистемна одиниця вимірювання показника заломлення). При цьому межа детектування ППР-сенсора обмежується рівнем шумів вихідного сигналу, який має значення 0,0005 кут. град., та становить $5 \cdot 10^{-6}$ RIU.

Для очищення зразків води використано фільтруючий пристрій [7], який включає гранули активованого вугілля. Гранульований сорбент всередині використовується для видалення хлору, хлорорганічних сполук. В очисному катриджі також розміщена іонообмінна смола для пом'якшення води за допомогою заміни іонів кальцію та магнію та волокнистий сорбент з іонообмінними властивостями, який ефективно очищує воду від важких металів. Також часто присутні антибактеріальні добавки для захисту від мікробного забруднення. Фільтр містить сітки зроблені з нетканого матеріалу для усунення нерозчинних та великих за розмірами частинок.

Сітчастий матеріал складається з двох типів сполучених між собою волокон: гідрофільні та гідрофобні волокна. Рідина, яку потрібно очистити, протікає через отвори кришки та сітку, потім через гранульований матеріал і нижню сітку та виходить через отвори в нижній частині основного корпусу. Проведено повний хімічний аналіз води водопровідної до та після фільтрації та води питної артезіанської. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження зразків води

Показник	Водопровідна вода до фільтрації	Водопровідна вода після фільтрації	Вода питна артезіанська
Загальна жорсткість, ммоль/дм ³	2,6	0,05	1,5
Загальна лужність, ммоль/дм ³	3,5	2	4,5
Кальцій, мг/дм ³	72,14	2	18
Магній, мг/дм ³	19,44	0	4
Калій, мг/дм ³	72,14	8,5	2,5
Натрій, мг/дм ³	22,3	75,7	96
Фтор, мг/дм ³	0,033	0,02	0,2
Сухий залишок, мг/дм ³	366	167	250
Каламутність, мг/дм ³	1,09	1,1	-
Водневий показник, рН	7,8	7,1	-
Загальний вміст солей, мг/дм ³	376	191	-
Нітрати, мг/дм ³	6,05	1,73	-
Амоній, мг/дм ³	0,34	0,65	-
Сульфати, мг/дм ³	82	0,27	-
Кремній, мг/дм ³	4,25	2,85	-

З таблиці 1 видно, що після фільтрації відбулось збільшення кількості амонію після фільтру у водопровідній воді, що може бути пов'язане з тим, що фільтр накопичив багато органічних або неорганічних речовин, які створюють умови для бактеріальної активності, яка перетворює органічний азот у амоній або ж у зразку води з часом збільшилась концентрація мікроорганізмів, які фільтр не здатний усунути. Збільшення амонію обумовлене наявністю у хлорованій водопровідній воді деяких мікроорганізмів, що можуть бути стійкими до хлорування або навіть виживати в умовах з низькою концентрацією хлору.

Методом ППР виміряно часову залежність резонансного кута при заміщенні дистильованої води на воду після двох фільтрів (рис. 2) та водопровідну воду до очищення.

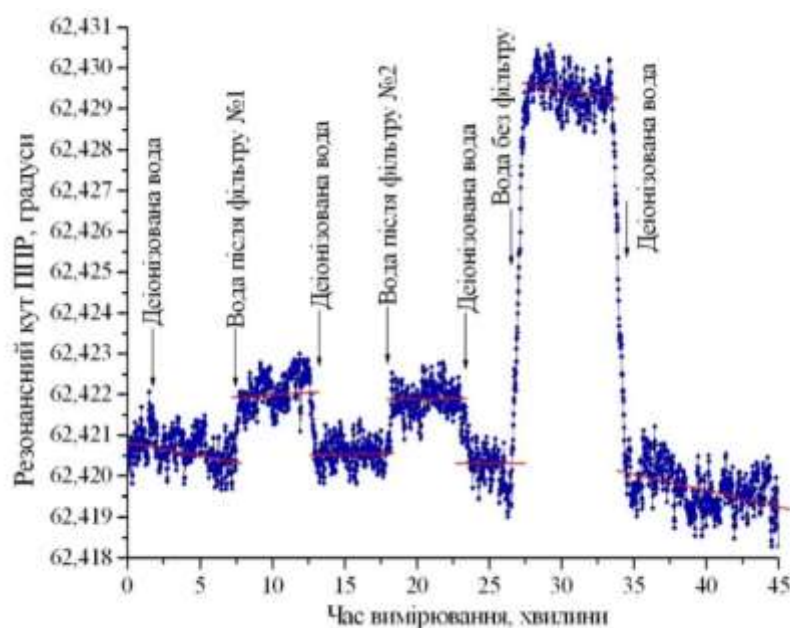


Рисунок 2 – Виміряна кінетика відгуку ППР-сенсора для дистильованої деіонізованої води та для зразків водопровідної води до та після фільтрування

Зміщення резонансного кута для двох типів фільтрів однакове. Результати експерименту з використанням кондуктометричного методу та методу ППР зразків води питної артезіанської та водопровідної води до та після фільтрації подано в таблиці 2. Зсув резонансного кута $\Delta\theta_{\min}$, це різниця резонансного кута θ_{\min} досліджуваного зразка та резонансного кута θ_{\min} для зразка дистильованої води, що визначались в кутових градусах (кут. град.). Дослідження зразків води проводилось при температурі вимірювання 16 °С.

Таблиця 2 – Результати дослідження зразків води

Зразки дослідження	Електропровідність, мкСм/см	Зсув резонансного кута $\Delta\theta_{\min}$, кут. град.
Вода питна артезіанська	504	0,01
Вода питна артезіанська після фільтрації	354	0,004
Водопровідна вода	540	0,0095
Водопровідна вода після фільтрації	270	0,00138

Резонансний кут для води питної артезіанської після фільтрації змінився у 2,5 рази та для водопровідної води після фільтрації майже в 7 разів. Зменшення солей в зразках підтверджено зменшенням електропровідності.

Висновки. Отримані результати показали ефективність очищення водопровідної та питної артезіанської води фільтруючими пристроями на основі активованого вугілля та іоннообмінних смол. Для контролю очищення води після фільтрації необхідно використовувати високочутливі методи контролю як от метод ППР, який дозволяє розуміти механізми хімічних процесів, що відбуваються на поверхні сенсора. В результаті експериментальних досліджень виявлено, що після фільтрації відбулось збільшення кількості амонію у водопровідній воді, що може бути пов'язане з тим, що у зразку з часом накопичилось багато органічних або неорганічних речовин, які створюють умови для бактеріальної активності, яка перетворює органічний азот у амоній. Тобто у зразку води з часом збільшилась концентрація мікроорганізмів, які фільтр не здатний усунути. Збільшення амонію обумовлене наявністю у хлорованій водопровідній воді деяких мікроорганізмів, що можуть бути стійкими до хлорування або навіть виживати в умовах з низькою концентрацією хлору. Дослідження показало, що необхідно застосовувати додаткове очищення. Для додаткового очищення води від мікроорганізмів, окрім хлорування, можна використовувати різні методи знезараження, наприклад, ультрафіолетове знезараження, кип'ятіння води тощо.

Інформаційні джерела

1. Homola J., Yee S., Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review. *Sensors and Actuators B*, 1999, 54, 3-15.
2. Клестова З. С., Ющенко А. Ю., Блоцька О. Ф., Маслов В. П., Ушенін Ю. В., Дорожинський Г. В., Кравченко С. О., Дорожинська Г. В. Експериментально - теоретичне обґрунтування розробки експрес методу виявлення ентеровірусів у воді методом поверхневого плазмонного резонансу. *Innovative Biosystems and Bioengineering*. 2019, 3 (1), 52-60.
3. Дорожинська Г. В., Ляпін О. М., Дорожинський Г. В., Маслов В. П. Стан та проблеми розробки чутливих елементів приладів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу. *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2017, 52, 37-49.
4. Dorozinska H., Maslov V., Dorozinsky G. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water suspensions. *Functional Materials*. 2018, 25 (1), 158-164.
5. Dorozinska H., Maslov V., Dorozinsky G. Modeling the SPR-sensor response. to low concentrations of water nanosuspensions. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*. 2017, 3 (8), 2007-2011.
6. Безрук З. Д., Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинський Г. В., Дорожинська Г. В., Конченко А. В. Дослідження закономірностей очищення водопровідної води методом виморожування. *Науковий вісник Харківського політехнічного інституту*, 2016, 50, 137-141.
7. Filtervorrichtung. DE Patent 112005000643 B4. Published: 2008-07-24.

Dorozinska H.

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

APPLICATION OF PLASMONICS FOR ASSESSING WATER PURIFICATION EFFICIENCY

This paper examines the use of plasmonic sensors for evaluating the efficiency of water purification processes after filtration. Particular attention is given to the advantages of this method compared to traditional approaches, as well as the possibility of its implementation for real-time monitoring. The results demonstrated the effectiveness of filtration devices based on activated carbon and ion-exchange resins in purifying tap and artesian drinking water. The resonance angle for artesian drinking water after filtration changed by a factor of 2.5, and for tap water after filtration, it changed by nearly 7 times. The reduction in salts in the samples was confirmed by a decrease in electrical conductivity. Experimental studies revealed that after filtering tap water, the ammonium content increased twofold, which may be associated with the accumulation of organic or inorganic substances in the sample over time, creating favorable conditions for bacterial activity. This finding indicates the need for additional water purification methods targeting microorganisms, beyond chlorination. The research highlights the potential of using plasmon resonance-based sensors to evaluate water purification efficiency and to monitor the effects of various disinfection methods.

Key words: sensor, plasmon resonance, kinetics, filters, water purification.

УДК 621.822

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-10

Ковальов В. Д.¹, Васильченко Я. В.¹, Міхєєв А. О.¹, Четвержук Т. І.²¹Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ТРАЄКТОРНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ВЕРСТАТА НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ПІДШИПНИКАХ

Стаття присвячена підвищенню точності та продуктивності важкого верстатного обладнання шляхом розробки і застосування адаптивних гідростатичних шпиндельних підшипників. Здійснено огляд літературних джерел та доведено актуальність пошуку нових шляхів підвищення точності, зокрема за рахунок застосування прогресивних конструкцій опорних вузлів. Основним напрямком досліджень обрано пошук шляхів підвищення точності обробки на важких токарних верстатах за рахунок адаптивного керування параметрами технологічної системи. Встановлено, що застосування гідравлічних опор з рідинним тертям є дуже перспективним у верстатобудуванні, а для важких верстатів такі опори на сьогоднішній день є, в ряді випадків, єдиним конструктивним варіантом, що забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики вузлів – високу несучу здатність, довговічність, жорсткість, точність і т.д. Показана можливість використання методик розрахунку, заснованих на реалізації методу кінцевих елементів. Надані конкретні рекомендації до розрахунку і проектування гідростатичних шпиндельних вузлів.

Ключові слова: гідростатичний підшипник, точність, продуктивність, верстат, шпиндельний вузол.

Постановка проблеми. Підвищення вимог до точності розмірів і форми деталей, поява нових матеріалів, які складно піддаються обробці, а також широке впровадження автоматизації технологічних процесів і створення автоматичних верстатів із системами керування та регулювання висуває все більш жорсткі вимоги до конструкцій опорних вузлів металорізальних верстатів.

Механічна обробка відбувається при безперервній зміні зовнішніх умов та пов'язана з точністю верстата, яка характеризує ступінь впливу різноманітних похибок верстата (геометричних, кінематичних, пружних, температурних та динамічних) на точність деталей, що виготовляються.

Процес обробки на важких верстатах відрізняється від обробки на верстатах середньої та легкої групи значною масою та габаритами оброблюваних деталей, підвищеними зусиллями різання, тепловими та пружними деформаціями, які виникають у вузлах верстата. Усе це призводить до зниження точності верстата та, внаслідок цього, до зниження якості виробів.

Підвищення точності верстата обумовлює суттєві труднощі при розробці конструкції обладнання та технології його виготовлення. Вирішення задачі традиційними шляхами приводить до значного здорожчання верстатів. Особливо це характерно для важкого верстатного обладнання, для якого подальше покращення показників точності стає неможливим при застосуванні традиційних підходів до розробки конструкцій. Таким чином, пошук нових шляхів підвищення точності, зокрема за рахунок застосування прогресивних конструкцій опорних вузлів, є актуальною проблемою у сучасному верстатобудуванні.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз розглянутих шляхів підвищення точності обробки дозволяє розділити їх на три основні групи. Перша полягає у підвищенні якості технологічної системи (жорсткості, міцності, геометричної та кінематичної точності, зносостійкості, вібростійкості та ін.), друга – у зменшенні дії технологічних факторів, від яких залежать похибки обробки, третя – у компенсації їх впливу шляхом керування ходом технологічного процесу. При цьому показано, що останній шлях є найбільш ефективним. Основним напрямком досліджень обрано пошук шляхів підвищення точності обробки на важких токарних верстатах за рахунок адаптивного керування параметрами технологічної системи. При цьому виникає важлива задача раціонального вибору групи керованих параметрів технологічної системи для ефективного підвищення точності обробки. Визначено, що для цього можливе застосування гідростатичних шпиндельних опор з адаптивною системою керування, яка реагує на зміну положення виконавчого органу зміною експлуатаційних характеристик опор за рахунок керування пружними та тепловими деформаціями, що виявляють найбільш істотний вплив на точність та

працездатність верстата. У галузі вдосконалення опорних вузлів нині проводиться велика кількість досліджень [1-23]. При функціонуванні гідравлічних опор відбувається робочий процес, зумовлений пружними деформаціями елементів конструкції під впливом зовнішніх силових факторів і тисків, що виникають у шарі рідини, перетіканням мастила між контактуючими поверхнями опор, і тепловими явищами, зумовленими в'язким тертям і перекачуванням мастила під тиском. Для визначення раціональних і оптимальних конструктивних параметрів опор необхідно спільно розглядати вищезазначені явища та їх взаємний вплив.

Технологічна система (верстат, пристосування, інструмент), як правило, не має адаптивного елемента, здатного комплексно компенсувати різного роду зміни умов обробки. Виняток становлять адаптивні системи ЧПУ, оснащені датчиками активного контролю, які коригують початкову програму обробки за результатами поточних вимірювань. Однак, такі системи, будучи дуже складними і дорогими, не мають достатньої універсальності і реагують на зміну лише певних факторів.

Як адаптивний елемент технологічної системи можна використовувати опори рідинного тертя рухомих вузлів верстата, що виконують формоутворюючі рухи (супортів, шпинделів, столів, кареток) [8]. Завдяки наявності між контактуючими поверхнями опори, шару мастильного матеріалу, параметрами якого можна керувати, опора рідинного тертя може змінювати свої характеристики (навантажувальну здатність, жорсткість) і здійснювати мікропереміщення для компенсації геометричних похибок і відхилень, які виникають унаслідок неточностей виготовлення, температурних і силових деформацій, а також демпфувати виникаючі коливання [1]. Опорні вузли мають визначальне значення під час забезпечення точності формоутворення, оскільки вони є внутрішнім джерелом інформації у верстаті, а отже, траєкторія переміщення робочих органів є результатом копіювання форми опорних вузлів. Опори змішаного тертя (навіть із застосуванням новітніх антифрикційних матеріалів) або опори кочення не дають змоги компенсувати похибки та деформації, ефективно демпфувати вібрації [8]. Крім того, ці типи опор є додатковим джерелом виникнення коливань через стрибки сили тертя і пульсації тіл кочення [6]. Застосування опор кочення має певну межу, оскільки джерелами зміщень (порушень) заданої траєкторії руху є геометричні похибки доріжок і тіл кочення, зміни розподілу сил у підшипнику внаслідок зміни положення тіл кочення відносно лінії дії зовнішнього навантаження, а також через наявність деформацій як самих тіл кочення, так і контактуючих із ними поверхонь деталей. У разі збільшення натягу в опорах кочення точність обертання підвищується тільки до деякої межі. Така ж картина спостерігається і для лінійних підшипників кочення. До того ж, у важких верстатах із ЧПУ напрямні кочення не набули широкого розповсюдження внаслідок високої вартості великогабаритних роликів підшипників і дуже високих вимог, що висуваються до точності установчих поверхонь для підшипників. Для верстатів надпрецизійної точності застосування опор кочення також стає неприйнятним. Наприклад, кулько-гвинтова пара, що застосовується як кінцева ланка підвищеної точності, має межу забезпечення точності переміщень, що іноді робить неможливим її використання.

Аналізуючи результати, отримані в процесі експлуатації нових важких металорізальних верстатів, у вузлах яких застосовано гідростатичні опори, можна зробити такі висновки:

- точність траєкторії переміщень перевищує точність контактуючих поверхонь;
- практично відсутнє зношення поверхонь ковзання;
- значно полегшені установчі рухи на заданий розмір;
- у всьому діапазоні швидкостей, включаючи швидкості, близькі до нуля, спостерігається плавність переміщень;
- рівень складності обслуговування не зріс;
- експлуатаційні витрати у споживача або знизилися, або залишилися на рівні, як і для верстатів, у яких не застосовані гідростатичні опори.

Отже, можна стверджувати, що застосування гідравлічних опор з рідинним тертям доволі перспективне у верстатобудуванні, а для важких верстатів такі опори на сьогоднішній день є, в ряді випадків, єдиним конструктивним варіантом, що забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики вузлів – високу несучу здатність, довговічність, жорсткість, точність і т.д.

Опори з рідинним режимом тертя мають низку виняткових переваг [5, 6, 7, 12]:

- дають змогу отримати високу точність траєкторії переміщень, яка значно перевищує точність виготовлення несучих деталей опори і зберігається необмежено довго;
- забезпечує лінійну характеристику тертя, і, що особливо важливо, в діапазоні малих швидкостей, під час переходу від спокою до руху і під час реверсу, що дає змогу отримати необмежено високу плавність і точність переміщень;

- опори можуть бути вібростійкими і жорсткими;
- забезпечують у з'єднанні порівняно великий зазор і виключають люфт;
- дають змогу контролювати навантаження і полегшують реалізацію самоналагоджувальних систем у верстатах.

Крім того, можна створити опори для будь-якого режиму експлуатації, причому зміна цього режиму допускається в широких межах. При цьому стає можливим керувати вихідними параметрами опор, наприклад жорсткістю, демпфуванням, точністю.

Необхідно зазначити, що гідравлічні опори мають і недоліки, що перешкоджають їх широкому впровадженню [16]. Для мащення опор потрібне джерело тиску – гідростанція порівняно високої потужності, опори є джерелом виділення тепла навіть за відсутності ковзання опорних деталей, причому тепловиділення зростають зі збільшенням швидкості ковзання, під час використання опор необхідно запобігати, наприклад фільтрацією, потраплянню в змащення на вході в опору часток, розмір яких більший від зазору в опорі, ущільнення мають забезпечувати збирання та повернення до джерела живлення порівняно великих потоків змащення, опорні деталі навантажені тиском змащення, а також деформаціями.

Незважаючи на простоту і доступність конструкції, в опорах з рідинно-основним режимом тертя мають місце складні процеси, що поряд зі специфічними властивостями опор вимагає високої культури проектування, виготовлення та експлуатації. Одна з основних переваг гідравлічних опор – це можливість підвищення точності обробки – як розмірної точності, так і зменшення похибок форми.

В роботі [7] рекомендується застосування гідравлічних опор для підвищення точності верстатів за всіма критеріями працездатності – підвищення жорсткості, довговічності, зменшення температурних деформацій, підвищення вібростійкості, точності позиціонування і рівномірності повільних переміщень. Серед основних конструктивних заходів щодо підвищення точності верстатів: зменшення сил тертя і особливо їхньої змінності як джерела теплоутворення і температурних деформацій, стрибкоподібності подачі, похибки позиціонування; перехід на рідинне, гідродинамічне або гідростатичне мастило. Заміна зовнішнього тертя внутрішнім. У гідростатичних парах коефіцієнт тертя спокою доводять до однієї «мільйонної». Застосування гідростатичних підшипників для компенсації похибок. У гідростатичних підшипниках вплив похибок шпинделя на некрутлість виробу зменшується майже на один порядок при забезпеченні некрутлості виробу до 0,1-0,2 мкм. Зазначається важливість забезпечення досконалих видів тертя для підвищення довговічності (збереження точності в експлуатації), оскільки витрати на ремонт верстатів, віднесені до року експлуатації, становлять 10-15% їхньої початкової вартості. Для цього потрібно використання гідродинамічного і, особливо, гідростатичного мастила за необхідності особливо точного руху.

Для зменшення шкідливих температурних деформацій (особливо для прецизійних верстатів, де температурні деформації можуть мати переважаче значення) – зменшення нерівномірного нагріву верстатів від внутрішніх джерел шляхом підвищення ККД механізмів, переходу від напіврідинного змащення до рідинного. Для підвищення вібростійкості – збільшення жорсткості і демпфуючої здатності шпиндельного вузла застосуванням гідростатичних підшипників дає змогу збільшити граничну за вібростійкістю глибину різання до 2 разів. Для підвищення точності позиціонування і рівномірності повільних переміщень – застосування гідростатичних напрямних і спеціальних приводів точних мікропереміщень, які дають змогу здійснити керовані мікропереміщення.

Зазначається можливість підвищення точності практично всіх типів верстатів шляхом застосування опор рідинного тертя в шпиндельних опорах, напрямних, люнетах. Для великих, важких і унікальних верстатів застосування гідростатичних опор рекомендується як загальний спосіб удосконалення конструкцій і збереження точності. Економічна доцільність застосування гідростатичних опор у шпиндельних вузлах токарних верстатів проілюстрована в [8]. Зокрема, у цій роботі йдеться про те, що гідростатичні підшипники позбавлені від недоліків підшипників кочення і гідродинамічних. Гідростатичні підшипники мають велике демпфування, підвищення жорсткості цих підшипників не призводить до зниження їхнього демпфування, як це має місце в опорах кочення. Гідростатичні підшипники не схильні до зношення і не потребують ремонту. Межа швидкохідності гідростатичних підшипників визначається тільки втратами не тертя. Застосування гідростатичних підшипників дає змогу на одному верстаті виконувати чорнове і чистове оброблення, при цьому відпадає потреба у фінішних верстатах і у витратах на транспорт і проміжне складування, що з надлишком компенсує витрати на придбання та встановлення гідростатичних підшипників.

Мета роботи – підвищення точності та продуктивності важкого верстатного обладнання шляхом розробки і застосування адаптивних гідростатичних шпindelних підшипників.

Викладення основного матеріалу. Основні величини, що характеризують експлуатаційні параметри опорних вузлів, можуть бути знайдені лише в тому разі, якщо чисельно визначено поля розподілених навантажень у досліджуваних ділянках, тобто, розв'язано в них рівняння Рейнольдса з відповідними граничними умовами. Для розглянутого класу опор цілком прийнятна методика, що вважає течію мастильного матеріалу між недеформованими контактуючими поверхнями ізотермічною з температурою, що дорівнює середній величині температур на його вході в досліджувану ділянку і виході з неї. Шар мастила має товщину у багато разів меншу, ніж його розміри в двох інших напрямках. Потік мастильного матеріалу приймається ламінарною. Тиск вважається постійним за товщиною мастильного шару. Напруження в рідині пропорційні швидкостям деформації, тобто мастило розглядається як Ньютонівська рідина. Ковзання на межі між твердим тілом і в'язкою рідиною відсутнє.

З метою єдиного представлення алгоритму пошуку полів тисків у розглянутих областях і знаходження інших величин, необхідних під час розрахунку опор рідинного тертя, незалежно від їхніх геометричних форм і співвідношень, виправдано подати рівняння Рейнольдса в циліндричній системі координат:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = -6\mu UR \frac{\partial h}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

де R – радіус поверхонь, що сполучаються;

φ – кутова координата, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$,

U – швидкість у напрямку φ .

При цьому граничні умови запишуться як:

$p=0$ на $0 \leq \varphi R \leq 2\pi R$ при $z=0$,

$0 \leq \varphi R \leq 2\pi R$ при $z=L$,

$p=p_{0j}$ на $\varphi_{1j}R \leq \varphi R \leq \varphi_{2j}R$ при $z=b_l j$,

$$\varphi_{1j}R \leq \varphi R \leq \varphi_{2j}R \quad (2)$$

при $z = b_l j$,

$b_{1j} \leq z \leq b_{2j}$ при $\varphi = \varphi_{1j}$,

$b_{1j} \leq z \leq b_{2j}$ при $\varphi = \varphi_{2j}$.

При цьому в більшості випадків для забезпечення прочитання відповідних залежностей j вважають рівним 0 ($j=0$).

Під час приведення рівняння (1) до безрозмірного вигляду вводять такі позначення:

$$\bar{z} = \frac{z}{R\Phi}, \text{ де } 0 \leq \bar{z} \leq D = \frac{L}{R\Phi} = \frac{L}{2\pi R},$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi}{\Phi}, \text{ де } 0 \leq \bar{\varphi} \leq 1 \text{ (} \Phi = 2\pi \text{),}$$

тут Φ – кут охоплення цапфи (вала) втулкою, $\Phi = 2\pi$;

L – довжина втулки – лінійний розмір опори ковзання в напрямку координатної осі Z ;

$\bar{h} = \frac{h}{\Delta}$, де $\Delta = (R_{\text{втулки}} - R_{\text{цил. напрямної}})$ – радіальний зазор;

$\bar{p} = \frac{p}{c}$, де $c = \frac{6\mu UR}{\Delta^2} + p_c$.

Рівняння для розглядуваного випадку циліндричних опор у безрозмірній формі:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{\varphi}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{\varphi}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = -\Omega \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{\varphi}}, \quad (3)$$

Де $\Omega = \frac{6\mu UR^2}{\Delta^2 c}$ – безрозмірна величина, що характеризує параметри досліджуваної циліндричної опори.

При цьому $0 \leq \Omega \leq 1$ – для гідростатичних і гідростатодинамічних опор;

$\Omega = 1$ – для гідродинамічних опор.

Дослідження і розрахунок гідростатичних опор є непростою проблемою, оскільки доводиться розв'язувати пов'язану задачу: розрахунок параметрів шару мастила між контактуючими поверхнями, пружних і теплових деформацій елементів. Ці явища описуються системою диференціальних рівнянь II порядку в приватних похідних, яка аналітично в тривимірній постановці не вирішується. Тому для моделювання та розрахунку треба використовувати чисельні методи скінченних різниць і скінченних елементів, що дають змогу з допустимою точністю визначити експлуатаційні характеристики опорних вузлів.

Розглянемо прямий метод побудови рівнянь, що пов'язують ці чинники в межах кінцевого елемента, у припущенні лінійної постановки.

1. Поле переміщень A в межах елемента (для просторової задачі) $\Delta = [u, v, w]$ за допомогою інтерполяційних функцій (у так званих ізопараметричних скінченних елементах, які використовуються, зокрема, у COSMOSWorks, зведених у матрицю $[N]$, виражається через вузлові переміщення $\{\Delta\}$. Суть інтерполяційних функцій полягає в тому, щоб, знаючи величини, наприклад, переміщень у вузлах, отримати їхні значення в будь якій точці елемента залежно від координат. У матричному вигляді співвідношення мають вигляд: $\Delta = N \cdot \{\lambda\}$. Для просторової задачі, $\{\lambda\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k]$, де k - число вузлів кінцевого елемента.

2. Поле деформацій ε виражається через ступені вільності $\{\Delta\}$ за допомогою диференціювання поля переміщень (а, фактично, інтерполяційних функцій) згідно зі співвідношеннями, які зібрано в матрицю $[D]$ і які пов'язують деформації з переміщеннями $s = [D] \cdot \{\Delta\}$.

3. З урахуванням рівнянь стану, в основі яких лежить закон Гука і коефіцієнти яких утворюють матрицю $[E]$, встановлюється зв'язок спочатку між полем напружень і полем деформацій $\sigma = [E] \cdot \varepsilon$, а потім і між напруженнями та ступенями свободи у вузлах: $\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{\lambda\}$.

4. Формулюються вираження для сил $\{F\}$, що діють у вершинах елемента, залежно від поля напружень σ , для чого використовується матриця перетворення напружень у вузлові сили $[A]$: $\{F\} = [A] \cdot \sigma$.

5. Зв'язуються вирази для вузлових сил і переміщень у вузлах: $\{F\} = [k] \cdot \{\Delta\}$, де $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$ – матриця жорсткості кінцевого елемента.

6. Для надання матриці $[k]$ властивості симетрії добиваємося заміни матриці перетворення жорсткості матрицею, транспонованою до матриці перетворення переміщень у деформації $[D]$. Тоді: $[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D]$.

За наведеним алгоритмом було проведено розрахунок шпindelного вузла важкого токарного верстата мод. 165. Дані математичного моделювання представлені на рис. 1. За результатами розрахунку верстата мод.165 було знайдено «небезпечні місця» шпindelного вузла і з застосуванням цих даних було розроблено конструктивні варіанти шпindelних вузлів важкого токарного верстата (рис. 2,3). Значний вплив на роботу гідростатичних шпindelних підшипників має спосіб регулювання зазору між шпindelом і втулкою. У спроектованих верстатах використовуються дроселювальні пристрої із саморегулювальними характеристиками, що дає змогу шпindelю встановлюватися в центрі підшипника автоматично, без регулювання. Слід розуміти, що час установлення шпindelної групи на вісь після увімкнення верстата визначається масою шпинделя, величиною зазорів у підшипниках і параметрами дросельних пристроїв. Для важких верстатів тривалість точного встановлення шпинделя на вісь у гідростатичних підшипниках (після тривалої зупинки верстата) становить 1...3 хвилини.

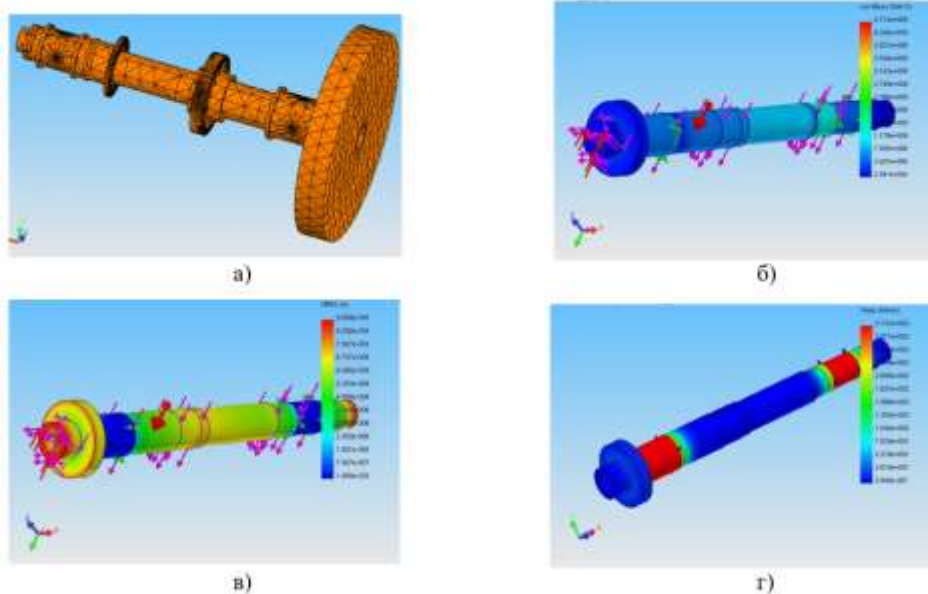


Рисунок 1 – Розрахунок шпindelного вузла важкого токарного верстата мод. 165 методом скінченних елементів: а) сітка скінченних елементів; б) розподіл напружень; в) деформований стан з урахуванням переміщень; г) термічний аналіз

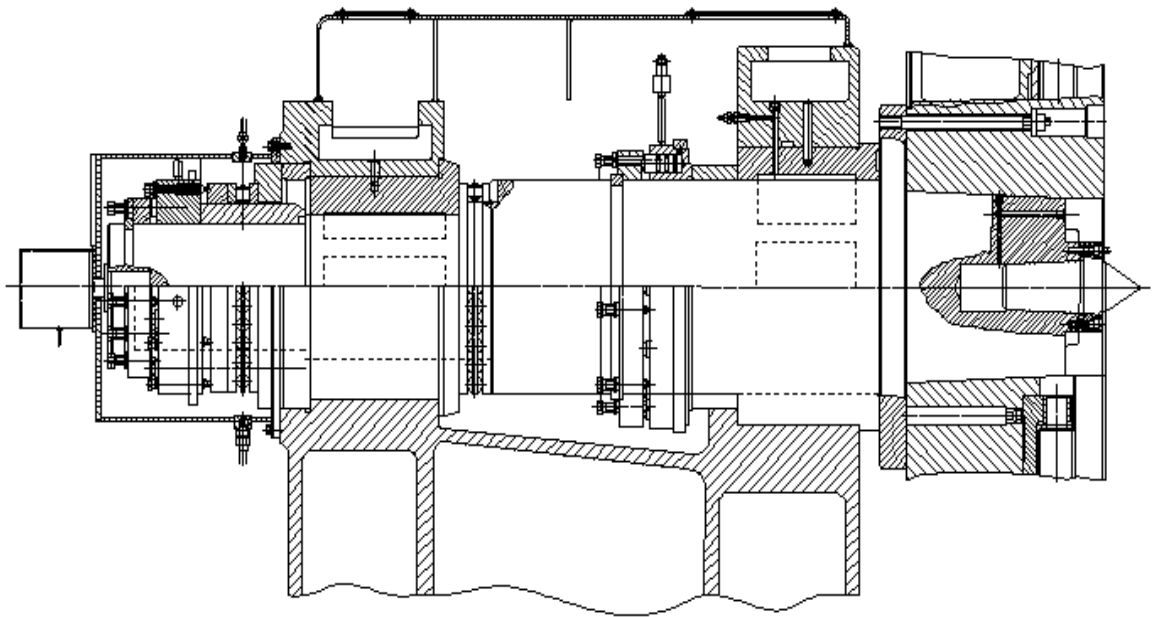


Рисунок 2 – Шпиндельний вузол важкого токарного верстата з радіальними гідростатичними підшипниками й упорними підшипниками фірми FAG

Така схема (рис. 2) дає змогу отримати всі переваги гідростатичних опор, а саме забезпечити високу точність обертання, високу демпфуючу здатність, що підвищує вібростійкість шпиндельного вузла, гарантує високу довговічність і, водночас, не ускладнює систему живлення гідростатичних опор.

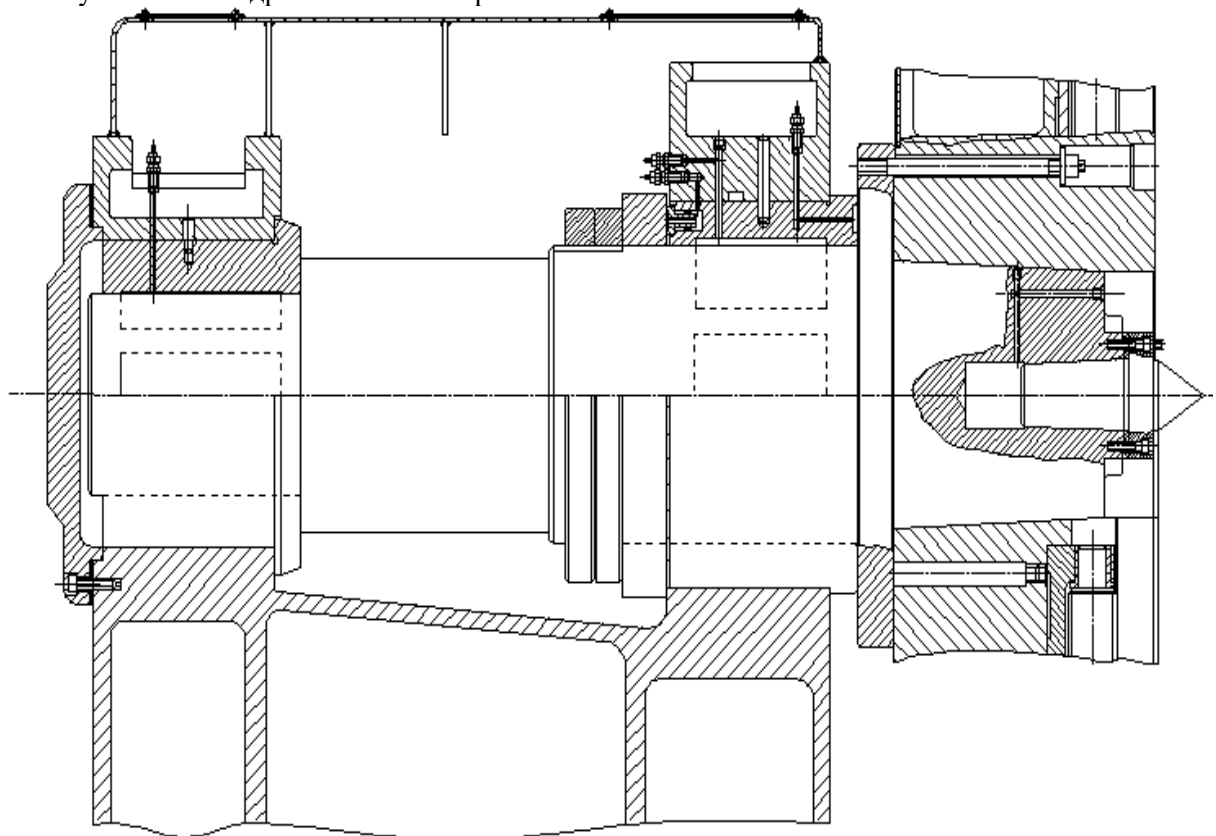


Рисунок 3 – Шпиндельний вузол важкого токарного верстата з радіально-упорними гідростатичними підшипниками

Шпиндельний вузол важкого токарного верстата з радіально-упорними гідростатичними підшипниками було розраховано за допомогою методу скінченних елементів. Дані моделювання представлено на рис.4.

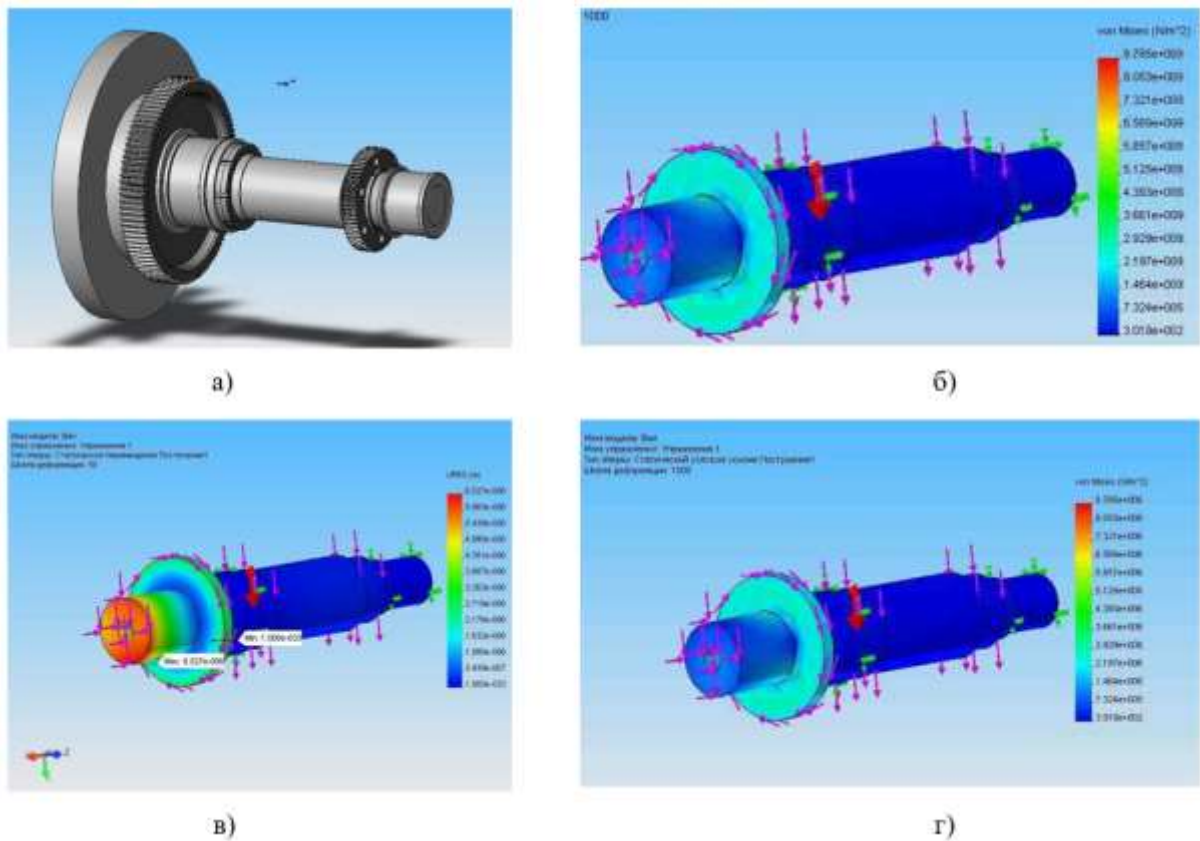


Рисунок 4 – Розрахунок шпиндельного вузла важкого токарного верстата з радіально-наполегливими гідростатичними підшипниками методом скінченних елементів: а) 3-D модель шпиндельного вузла; б) розподіл напружень; в) деформований стан з урахуванням переміщень; г) перевірка запасу міцності

Проведено чисельні параметричні дослідження залежностей експлуатаційних характеристик від конструктивних параметрів опор різних форм (рис. 5), при цьому особливу увагу приділяли жорсткості. Параметричні дослідження проводили за різних відносних ексцентриситетів $\varepsilon=0,1...0,9$. Рекомендовано співвідношення конструктивних параметрів опор і систем їх живлення для верстатних вузлів тертя різних форм і типів, які забезпечують високу точність переміщень, жорсткість, безумовно рідинний режим тертя.

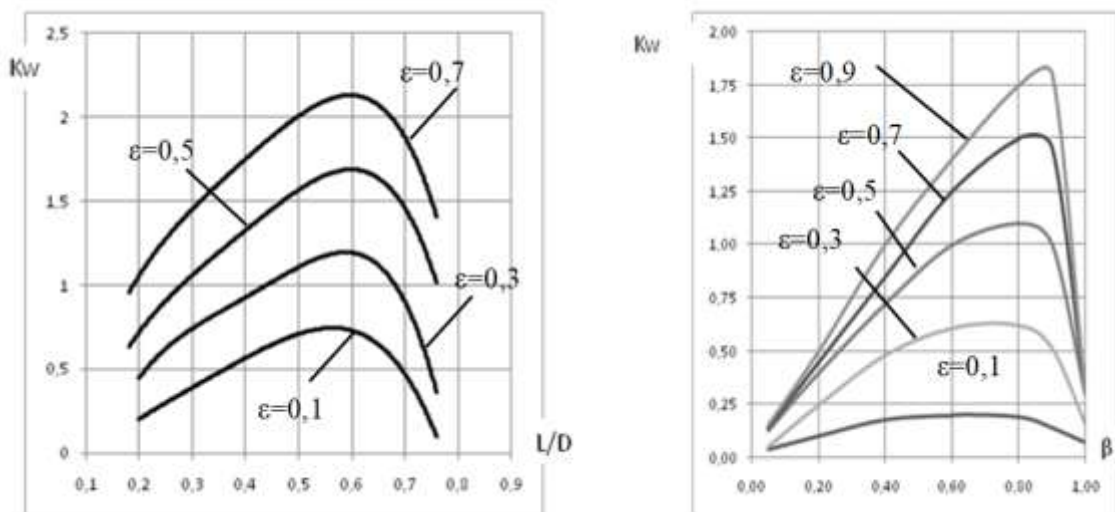


Рисунок 5 – Залежності експлуатаційних характеристик від конструкційних параметрів за різних ексцентриситетів: а) зміна безрозмірного коефіцієнта, що характеризує несучу здатність залежно від геометричних параметрів опори б) зміна безрозмірного коефіцієнта, що характеризує несучу здатність залежно від $\beta = p_{oj}/p_c$

Експериментальні дослідження проводилися на верстаті-стенді для випробувань гідростатичних шпindelних опор. Стенд призначений для експериментальних досліджень шпindelних опорних вузлів натурних розмірів, додаткових гідростатичних опор, установлених під планшайбу. Стенд виготовлено на базі передньої бабки токарного верстата з діаметром оброблення $D_{max}=1000$ мм, у якій шпindelні опорні підшипники кочення замінено гідростатичними.

Висновки. Розбіжності між даними теорії та експерименту не перевищують 9% за тиском у кишенях, і 14% за витратою мастильного матеріалу, 12% за потужністю, що витрачається на тертя, 9% за середньою температурою мастильного матеріалу як у разі нерухомих з'єднань поверхонь опор, так і в разі їх взаємного переміщення зі швидкістю до 2 м/с.

При дослідженнях жорсткості розбіжності склали 6-11% за товщиною шару мастила, 8-19% за жорсткістю шару мастильного матеріалу у вертикальному напрямку.

Результати експериментальних досліджень свідчать про суттєвий вплив типу і параметрів компенсаторів, а також геометричних параметрів вкладишів на деформацію шпindelного вузла за малого тиску в системі живлення опор.

Подальше вдосконалення опорних вузлів рідинного тертя для важких верстатів має йти в напрямі адаптивного керування характеристиками опорних вузлів для підвищення точності траєкторії переміщення виконавчих органів верстатів. Для забезпечення високої точності шпindelного вузла необхідна наявність автоматичних регуляторів витрати золотникового типу (нескінченна жорсткість шару мастила в опорі).

Інформаційні джерела

1. Antonenko Y., Kovalov V., Vasylenko Y., Shapovalov M., Malyhin N. (2023). An Increase in Heavy Machines' Accuracy by Controlling the Carrier System Parameters. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_8
2. Dong W., Li B., Guo W., & Zhou Q. (2019). Deformation analysis of hydrostatic guideways based on the cantilever plate bending calculation method. Tribology Transactions, 62(6), 1142-1154.
3. Du X. (2019). Parameter design of adjustable oil film clearance hydrostatic and hydrodynamic bearing, precise. Precise Manufacturing & Automation, 4, 6-10.
4. Guo A., Li M., Wang F., Ma X. (2020). Analysis of the support characteristics of the oil film of ultra-precision hydrostatic guideway. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 9, 57-66.
5. Hu C., Xiong W., Sun W., & Shuai Y. (2019). Research on the mechanism of improving hydrostatic spindle rotating accuracy with controllable restrictor. Journal of Mechanical Engineering, 55(11), 160-168.
6. Hua, X. L. (2014). The analysis and optimization of ram of large floor boring and milling machine. Soochow University.
7. Kovalov V., Klymenko G., Vasylenko Y., Shapovalov M., Sherbakova A., Kovalenko A. Methods of increasing reliability of cutting tools for heavy machine tools (2024) Procedia Structural Integrity, 59, pp. 779-785. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.111>
8. Li X., Qiu Y., Su X., Wei W., Li J., Yang H. (2020). Hydrostatic guideway system with active controllable oil film thickness. Sichuan Province: CN112077616B, 2021-08-10.
9. Ma H., & Ran C. (2021). Optimal design of hydrostatic guide rail based on Taguchi method and genetic algorithm. Machine Tool & Hydraulics, 49(2), 93-98.
10. Mourya V., Bhore S. P. Design and fabrication errors of foil bearings: a review. Advances in Materials and Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICFTMME 2020. C. 205-220.
11. Qiu Z., Gao Z., Ren D., Cui D.Y. (2020). Finite element analysis and optimization design for ram of bridge gantry milling machine. Machinery Design & Manufacture, 9, 162-166.
12. Samantaraya D., Lakade S. Hard turning cutting tool materials used in automotive and bearing manufacturing applications—A review //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. T. 814. №. 1. C. 012005.
13. Sarath S., Paul P. S. Application of smart fluid to control vibration in metal cutting: a review //World Journal of Engineering. 2021. T. 18. №. 3. C. 458-479.
14. Taras Chetverzhuk, Oleg Zabolotnyi, Viktor Sychuk, Roman Polinkevych and Anatolii Tkachuk. A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools

Using CAD and CAE Technologies. Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC), Print ISSN: 2516-0281, Online ISSN: 2516-029X, pp. 37-47, Vol. 3, No. 4, 1st October 2019, Published by International Association of Educators and Researchers (IAER), DOI: 10.33166/AETiC.2019.04.004, Available: <http://aetic.theiaer.org/archive/v3/v3n4/p4.html>.

15. Wu G. (2021). Research on the influence of surface microstructure on friction characteristics of high-speed and heavyload hydrostatic support. Harbin University of Science and Technology.

16. Yang J. (2014). The constructural research and design of ram in the heavy-duty vertical lathe. Yanshan University.

17. Yu X., Gao W., Wu G., Zhou W., Bi H., Wang Y., Wang J., & Jiao, J. (2021). Research status of hydrostatic bearing technology in machine tool. Recent Patents on Mechanical Engineering, 14, 1-9.

18. Yu X., Liu C., Zuo X., & Zh Y. (2018). Fluid-thermal-mechanical coupled solution and experiment on deformation of bearing friction pairs in hydrostatic bearing. Engineering Mechanics, 35(5), 231-238.

19. Zhang Y., Hou J., Gao W., Zhao Z., Zhou D., & Cheng H. (2020). Prediction model of the clearance oil film for static vertical rail considering the ram deformation. Proceedings of the Institution of Mechanical, 234(1), 42-49.

20. Zhang Y., Ni S., Zhang Z., Kong, P., Feng Y., & Kong, X. (2019). Dynamic lubrication characteristics of oil film with variable viscosity hydrostatic sliding bearings at high speed. Journal of Mechanical Engineering, 55(22), 108-117.

21. Zuo, X. (2019). Research on comprehensive lubrication performance of static and dynamic pressure hybrid static pressure bearing. Harbin University of Science and Technology.

22. Ковальов В. Д., Клименко Г. П., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Коваленко А.В. Система адаптивного керування у кишнях гідростатичних опор шпиндельного вузла і зусилля натягу привода позиціонування шпинделя важкого токарного верстата. Вісник НТУ«ХП», 2022. 2(6). С. 56-63.

23. Четвержук Т. І., Полінкевич Р. М., Редько О. І. Дослідження температури опор шпиндельних вузлів металорізальних верстатів. Тези доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні РТМЕ 2022» м. Івано-Франківськ. Яремче, 1-5 Лютого 2022. С. 136-138.

¹Kovalev V., ¹Vasylichenko Ya., ¹Mikheiev A., ²Chetverzhuk T.

¹Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

²Lutsk National Technical University

CONTROLLING THE ACCURACY OF TRAJECTORY MOVEMENTS OF MACHINE TOOL ACTUATORS ON HYDROSTATIC BEARINGS

The article is devoted to improving the accuracy and productivity of heavy machine tools by developing and applying adaptive hydrostatic spindle bearings. A literature review was conducted and the relevance of finding new ways to improve accuracy, in particular through the use of advanced designs of bearing units, was proved. The main direction of research is the search for ways to improve machining accuracy on heavy-duty lathes by means of adaptive control of the technological system parameters. It has been established that the use of hydraulic supports with fluid friction is very promising in machine tool construction, and for heavy machine tools such supports are, in some cases, the only design option that provides the required performance characteristics of the units - high load-bearing capacity, durability, rigidity, accuracy, etc. The possibility of using calculation methods based on the implementation of the finite element method is shown. Specific recommendations for the calculation and design of hydrostatic spindle assemblies are given.

Keywords: hydrostatic bearing, accuracy, productivity, machine tool, spindle assembly.

УДК 662.612:662.769.21

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-11

Когут В. М., Витвицька Л. А.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЛАКІВ І ФАРБ

У роботі проведено аналіз основних характеристик різних видів фарб. Визначено вимоги до властивостей фарби в залежності від умов та способів її використання. Встановлено перелік властивостей лакофарбових матеріалів, за якими визначається їх якість. Визначено залежність властивостей фарб від виду форми, структури та пористості поверхонь, на які вони наносяться. Проаналізовано існуючі методи контролю окремих властивостей лакофарбових матеріалів. Обґрунтовано необхідність розроблення комплексного методу експрес-контролю якості лакофарбового матеріалу для забезпечення контролю у конкретних умовах його нанесення на певну поверхню при заданих умовах використання. На основі моделювання процесу змочування лакофарбовим матеріалом певної поверхні встановлено, що саме за цим процесом можна здійснювати контроль якості фарби та визначати умови її використання. Обґрунтовано, що контроль швидкості процесу змочування фарбою конкретної поверхні доцільно проводити в автоматизованому режимі на основі оптичного методу, який дає можливість у динамічному візуальному режимі проводити експрес-контроль лакофарбового матеріалу.

Ключові слова: *лакофарбовий матеріал, якість, характеристики фарб, змочуваність поверхні, комплексний експрес-контроль якості, змочуваність твердої поверхні, оптичний метод.*

Вступ. Проблема захисту від корозії на сьогоднішній день є настільки актуальною, що все більше уваги приділяється засобам від корозії, серед яких важливе місце займають лакофарбові матеріали. Контроль якості лакофарбових матеріалів повинен бути впроваджений у всіх технологічних процесах, оскільки довговічність антикорозійних покриттів багато в чому визначається якістю фарби, способом нанесення і матеріалом поверхні, котра фарбується. Незалежно від складу всі фарби та інші декоративні покриття мають ряд критеріїв, яким вони повинні відповідати [1, 2]. До них відносяться: легкість в догляді, здатність витримувати сухе і вологе прибирання, екологічність і простота нанесення. Окрім цих якостей, до багатьох видів матеріалів висуваються додаткові вимоги, такі як: висока стійкість до стирання в місцях частого використання, вологостійкість при застосуванні у ванних кімнатах, кухнях тощо. Окрім експлуатаційних характеристик фарби, на вибір покупця також сильно впливають декоративні властивості фарби, такі як: колір, фактура і блиск, а також вартість фарби.

Наразі кожна властивість фарби - колір, відтінок, в'язкість та довговічність – визначається окремим методом, що потребує значної кількості часу та громіздких процесів контролю якості [3]. Тому виникає необхідність об'єднати більшість окремих показників і використовувати певний комплексний показник якості, який би дозволив здійснювати однозначний контроль якості конкретної фарби за короткий час і, відповідно, з меншою складністю. З цією метою необхідно розглянути основні показники якості лакофарбових матеріалів та вимоги до них.

Метою даної роботи є розробка комплексного методу контролю якості лакофарбових матеріалів, що наносяться на конкретну поверхню, на основі моделювання процесу змочування цієї поверхні.

Емалі, фарби, лаки, шпаклівки, ґрунтовки та розчинники мають певні властивості, які визначають їхню якість [4]. Зокрема, це властивості фарби або лаку до затвердіння та властивості готової плівки покриття. Основні властивості лакофарбової продукції такі:

- хімічні властивості (наприклад, загальний вміст основних інгредієнтів, легких і нелегких речовин, окремих компонентів, води, водорозчинних солей, води тощо, кислотний рН);
- фізико-хімічні (в'язкість, густина, час затвердіння (висихання), коефіцієнт прозорості);
- покриття і технологія нанесення (ступінь полірування, нанесений «розлив», засмічення, плінність).

Властивості покривної плівки:

- фізико-механічні властивості (твердість, адгезія, еластичність, міцність на вигин і розрив, стійкість до стирання, ударна в'язкість);

- декоративні (блиск, зовнішній вигляд, колір);
- захист (світлостійкість, атмосферостійкість, стійкість до температурних змін, теплостійкість, морозостійкість);
- електроізоляція (питомий електричний опір, електрична міцність, діелектричні втрати);
- покриття і технології (абразивні та шліфувальні можливості);
- стійкість до лугів, кислот, води, агресивних газів, масел, мильних розчинів, бензину, емульсій та інших хімічних речовин.

Крім того, лакофарбові матеріали мають специфічні властивості. Наприклад, вони повинні бути електропровідні, стійкі до холоду та відкритого вогню.

Покривна здатність – це здатність фарби (або пігменту) робити «контраст» останньої невидимим при рівномірному нанесенні на контрастні поверхні. Цей показник залежить головним чином від форми, розміру частинок і кольору пігменту [2]. Зазвичай, його виражають у кількості грамів фарби, необхідної для фарбування одного квадратного метра поверхні. Однак у більшості випадків на упаковці вказується витрата фарби у кілограмах (літрах) фарби на квадратний метр, а не на покриття. Практично, це той самий показник площі нанесення і його можна просто перевести в $г/м^2$. Деякі фарби маркуються як «двошарові» і вказується витрата фарби на один шар. Це означає, що лише один шар фарби потрібен, щоб повністю закрити колір поверхні, що фарбується, і кожен шар фарби наноситься з витратою, зазначеною на банці. Таким чином, фактична витрата фарби, яка вдвічі наноситься, перевищує кількість, зазначену на банці.

Блиск - це здатність поверхні цілеспрямовано відбивати світло. Ступінь блиску, тобто глянець лакофарбового покриття, вимірюється в лабораторії за допомогою фотоелектричного методу. При цьому вимірюється величина фотоструму, що збуджується у фотоприймачі під впливом світлових променів, відбитих від поверхні досліджуваного покриття. Одиниці, отримані в результаті вимірювання, не дуже промовисті для пересічного покупця, тому прийнято маркувати глянець банки таким чином: М - напівматовий, ГМ – глибокий матовий та ін.

Світлостійкість – це властивість матеріалу зберігати свій колір під впливом ультрафіолетової складової сонячного світла. Чим вища світлостійкість лакофарбового матеріалу (а не зв'язуючих пігментів та інших компонентів), тим краще. Світлостійкість має особливе значення при зовнішньому фарбуванні фасадів і дахів.

Атмосферостійкість – це властивість лакофарбового покриття чинити опір руйнівній дії не тільки сонячних променів, але і дощу, морозу, снігу, вітру тощо. Для визначення цієї властивості зразки з лакофарбовим покриттям витримують в атмосферних умовах і потім кількісно оцінюють зміну декоративних і захисних його властивостей. На банках так і пишуть слово - «атмосферостійка».

Контроль мікроструктури поверхні, особливо шорсткості, широко використовується у виробництві напівпровідникових приладів, мікросхем, оптичного обладнання, прецизійних компонентів і деталей для машинобудування та приладобудування.

Для отримання лакофарбових покриттів з відмінною хімічно- і атмосферостійкістю, хорошими декоративними і захисними властивостями, тривалим терміном служби необхідна спеціальна підготовка оброблюваної поверхні, відповідний підбір ґрунтовки, лакофарбових матеріалів, технології фарбування і сушіння. Контроль якості також дуже важливий під час виробництва та відвантаження готової лакофарбової продукції, а також під час її використання для фарбування виробів.

Контроль якості у виробництві лакофарбової продукції включає перевірку відповідності проміжних продуктів, сировини і готової продукції показникам, встановленим чинними національними стандартами, технічними умовами і галузевими стандартами [5]. Проміжні продукти і сировина повинні бути перевірені і випробувані, незалежно від того, чи отримані вони від постачальників, чи вироблені безпосередньо на підприємстві.

Кількісний склад лакофарбових матеріалів визначають за допомогою оптичних аналізаторів. Принцип дії оптичних аналізаторів оснований на залежності коефіцієнтів заломлення, відбиття та оптичної густини від концентрації компонента, що визначається. Метод оснований на тому, що степінь поглинання світла залежить від концентрації і складу рідини. Оптична густина пропорційна концентрації речовини в розчині. Інтенсивність забарвлення розчину використовується для визначення концентрації компонента візуально або за допомогою фотоелемента.

Колір рідини визначають фотометричним методом. Даний метод передбачає хімічну реакцію, в ході якої компонент, що нас цікавить, перетворюється на сполуку, а кількість цього

компонента визначається шляхом вимірювання ступеня поглинання світлових променів розчином цієї сполуки.

Фотоелектричні колориметри вимірюють концентрацію у видимій області спектра. Для цього в якості джерела випромінювання використовують лампи розжарювання. Інтенсивність потоку в колориметрі реєструється за допомогою різних типів фотоелементів і фоторецепторів, наприклад, фоторезисторів. Чутливість фотоколориметра залежить від спектра поглинання досліджуваного розчину і спектральних властивостей фотоелемента, тобто від правильного вибору фотоелемента і оптичного фільтра.

Показник заломлення аналізованої речовини визначається методами рефракційного аналізу, які залежать від її складу, тобто співвідношення компонентів. Коли світлові промені потрапляють на межу розділу фаз, вони частково відбиваються, а частково заломлюються.

Якість покриття також можна визначити за ступенем змочування ним твердих поверхонь. Змочуваність пористого матеріалу рідиною визначається швидкістю руху поверхні досліджуваної рідини в горизонтальній трубці. Також за іншим методом пористий матеріал розташовують у вертикальній трубці, у другій паралельній трубці визначається висота підняття поверхні розділу фаз «досліджувана рідина – повітря».

Швидкість v і висота h підняття рідини в трубці, заповненій пористим матеріалом, що тестується, визначаються наступним чином. Для ньютонівських рідин швидкість рідини, що рухається по циліндричній трубці, визначається наступним рівнянням:

$$v = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu \cdot h}, \quad (1)$$

де ΔP – різниця тисків на початку та кінці трубки; r – радіус трубки, h – довжина трубки, μ – динамічна в'язкість.

Якщо рідина піднімається по вертикальній трубці, то потрібно враховувати гідростатичний тиск рідини. З врахуванням того, що швидкість підняття рідини визначається відношенням висоти h і часом її підняття t , можна рівняння (1) подати у вигляді:

$$h^2 = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu} \cdot t. \quad (2)$$

Різниця тисків на початку та на кінці трубки визначається сумою тиску, зумовленого змочуванням внутрішніх стінок трубки, і гідростатичного тиску. Перепад тиску, зумовлений змочуванням визначається таким чином:

$$\Delta P_{\text{ж}} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r}, \quad (3)$$

де θ – крайовий кут змочування, σ – поверхневий натяг на границі розділу рідина-газ.

Таким чином, отримуємо:

$$h^2 = \frac{r^2}{4\mu} \left(\frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} + \Delta P \right) \cdot t. \quad (4)$$

При русі рідини в пористому тілі горизонтально, величиною ΔP можна знехтувати. Тоді (4) можна подати таким чином:

$$\frac{h^2}{t} = \frac{r\sigma \cdot \cos \theta}{2\mu} \quad \text{або} \quad v = \frac{r\sigma}{2h\mu} \cos \theta. \quad (5)$$

Замість висоти h необхідно визначити шлях, пройдений рідиною за час t в пористому тілі.

При відомих значеннях в'язкості μ та поверхневого натягу рідини σ і, вимірявши час руху рідини t та величину h згідно (4), визначається косинус крайового кута змочування:

$$\cos \theta = \frac{2\mu h^2}{r\sigma t}. \quad (6)$$

Недоліком цього методу є складність вибору еталонної рідини, з якою порівнюють значення, визначені для досліджуваної рідини.

Оптичні методи найкраще підходять для отримання зображень процесу нанесення за допомогою лінійного датчика зображення (або серії фотодіодів) і пристрою, який перетворює зображення в електричний сигнал. Принцип роботи блоку управління, (конструкція якого подана на рис. 1) полягає в тому, що світловий промінь, випромінюваний потужним напівпровідниковим лазером (потужність лазера залежить від вимог до стабільності роботи), фокусується на заготовку за допомогою лінзи. Оптична система ОС складається з об'єктива ОБ, світловідбивної пластини СП, лінзи Л, відеокамери ВК, лазера ЛЗ. В якості оптоелектронного перетворювача

використовується тільки відеокамера ВК. Джерелом випромінювання для моніторингу є напівпровідниковий лазер ЛЗ, температура якого контролюється і підтримується системою контролю температури СКТ і системою охолодження СО. Датчиком температури лазерного нагріву є напівпровідниковий резистор R_t з лінійною характеристикою опору в залежності від температури. Вся система пристрою працює від імпульсного джерела живлення БЖ, який підключений до мережі через мережевий фільтр МФ. Аналоговий вихід відеокамери підключений до відео входу комп'ютерного пристрою відеозахоплення ЕОМ.

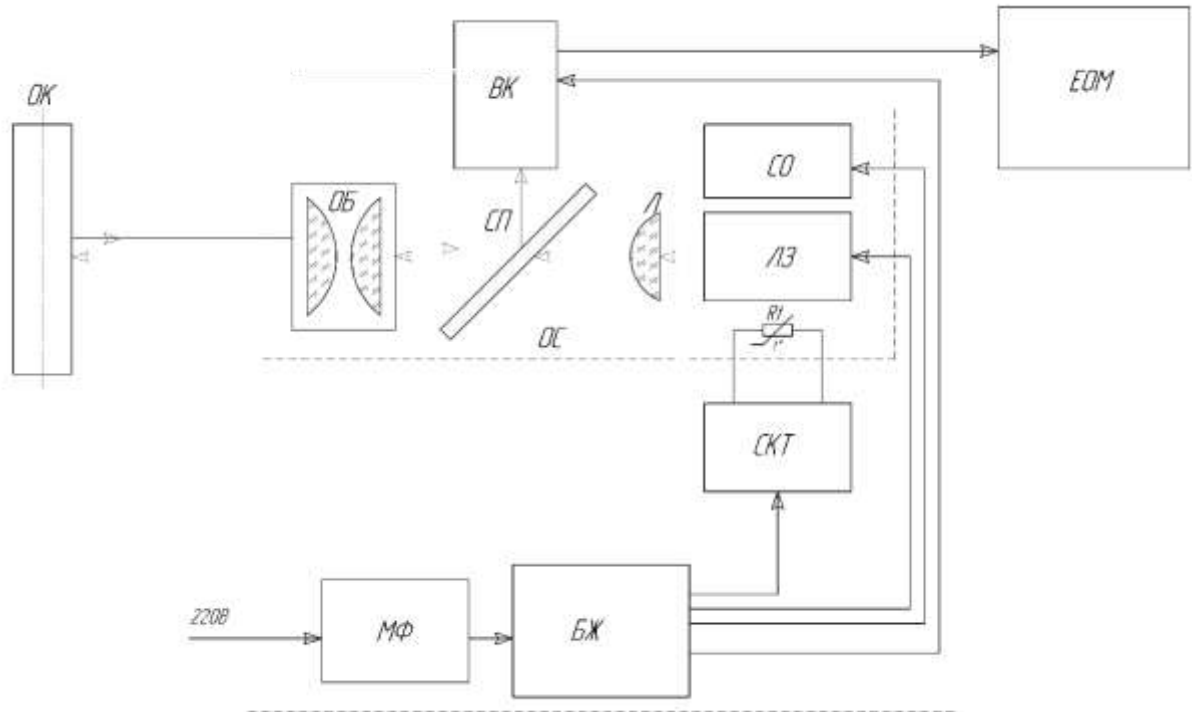


Рисунок 1 – Функціональна схема пристрою для контролю якості лакофарбового покриття

Для того, щоб пристрій, який контролює мікроструктуру поверхні, працював належним чином, його компоненти повинні живитися стабільною напругою живлення. Використовувати звичайні трансформаторні стабілізатори напруги недоцільно через їхні великі розміри, високий рівень електромагнітного випромінювання, низьку ефективність випромінювання та низького ККД. Для подолання цих недоліків рекомендується зробити блок живлення імпульсним. У цьому випадку вага і габарити джерела живлення значно зменшуються порівняно зі звичайними трансформаторними джерелами живлення, а коефіцієнт корисної дії підвищується до більш ніж 80%.

Розмір світлової плями на поверхні заготовки, зазвичай, становить 1-2 мм, в особливих випадках 0,2-4 мм. Залежно від якості поверхні деталі, що перевіряється, світло розсіюється в області світлової плями, і розсіяне світло направляєється на датчик зображення за допомогою світлорозподільника (напівпрозорого дзеркала). Дисперсія розсіяного світла дає оптичну характеристику шорсткості поверхні. Отже, за ступенем змочування лакофарбовим матеріалом досліджуваної поверхні твердого тіла можна визначати якість лакофарбового матеріалу. Використання оптичного методу контролю дає можливість одночасно виявляти інші вищевказані властивості фарби.

При розточуванні і шліфуванні оброблюваної поверхні отримується рівномірна канавка або канавоподібна форма поверхні, а при обробленні поверхні шляхом катання отримується нерегулярний поверхневий рельєф. Ця різниця чітко стає видима на картині розсіювання світла, оскільки катані поверхні мають розподіл інтенсивності розсіяного світла центросиметричний на відміну від поверхонь, які отримані розточуванням і шліфуванням.

Шорсткість просвердлених і шліфованих поверхонь також визначається оптичним методом за формою кривої розподілу світлорозсіювання [6]. Однак важливим недоліком цієї системи контролю якості покриття є те, що при цьому використовуються фотодіодні матриці зображення з низькою роздільною здатністю, що знижує точність визначення ступеня змочуваності поверхні фарбою. Також при цьому контролюються невеликі ділянки поверхні об'єкта.

Тому пропонується удосконалений метод контролю, згідно з яким основним комплексним показником якості фарби є ступінь змочуваності фарбою твердої поверхні. При цьому оптична система контролю аналізує швидкість розтікання фарби при її нанесенні на тверду поверхню. Для нанесення фіксованої кількості фарби використовується шприц-поршнева система і визначається швидкість зміни площі розтікання фарби за зміною інтенсивності кольору. При недостатньому змочуванні відбувається різке падіння інтенсивності колірності в центрі плями, тобто у місці крапельного нанесення фарби. Контроль повинен проводитися при постійній температурі фарби і поверхні, що тестується ($20 \pm 2^\circ\text{C}$). Зображення плями залежить від роздільної здатності камери, яка визначається кількістю пікселів. Сучасні камери забезпечують можливість розрізнити різнокольорові плями в межах 0,1 мм, що перевищує роздільну здатність людського ока. Швидкість розтікання визначається вбудованим таймером комп'ютера і розрахунком різниці площі поверхні. Різні типи лакофарбових матеріалів та різні типи твердих поверхонь, на які вони наносяться, мають різні вимоги до їх розтікання. Тому доцільно контролювати та інтерпретувати результати контролю якості тестованої фарби шляхом порівняння швидкості її розтікання з еталонними значеннями, які отримані при розтіканні високоякісної фарби, яка крапельно наноситься на тверду контрольовану поверхню. При цьому різниця в показниках розтікання не повинна перевищувати 1%. Наприклад, було проведено дослідження червоної емалевої фарби ПФ-115, яка наносилася на поверхню металеві труби з шорсткістю Rz30. Ця фарба вважалася за еталон, оскільки використовувалася у період її терміну придатності, плівки на її поверхні не було і крапельне нанесення проводилося після її інтенсивного перемішування в упаковці. З дозатора наносили 100 мм^3 фарби, виміряна швидкість її розтікання становила $5 \text{ мм}^2/\text{с}$. Для порівняння була використана фарба тієї ж марки, але з вичерпаним терміном придатності, наявністю плівки на поверхні. Швидкість її розтікання становила $0,5 \text{ мм}^2/\text{с}$. Тому для покращення характеристик фарби до її складу було додано розчинник марки 647 у співвідношенні 1:100. Це покращило її покривну здатність, але зменшило колірність, блиск, атмосферостійкість. При додаванні розчинника у співвідношенні 1:10 швидкість розтікання становила $8 \text{ мм}^2/\text{с}$, але інтенсивність кольору плями зменшилася на 10%, що свідчить про погіршення якості фарби.

Таким чином, можна визначити, у якому співвідношенні додавати розчинник, щоб якість покриття, колірність, товщина плівки та інші властивості фарби саме при нанесенні на конкретну поверхню задовольняли вимоги при певних заданих умовах використання. Також є можливість визначити непридатність фарби для застосування при невідповідності однієї чи декількох властивостей

Отже, за ступенем змочування лакофарбовим матеріалом досліджуваної поверхні твердого тіла можна визначити його якість. Використання оптичного методу контролю дає можливість одночасно виявляти в комплексі вище вказані властивості фарби, причому в режимі експрес-контролю.

Висновки. Таким чином, ступінь змочуваності поверхні фарбою враховує як властивості фарби, так і самої поверхні з врахуванням певних умов зовнішнього середовища. Тому дослідження утворення лакофарбової плівки на досліджуваній поверхні дає можливість дослідити якість фарби. Отже, доцільно розробити саме такий експрес-метод перевірки комплексного показника якості фарби, а також реалізувати цей метод на основі оптичного пристрою для проведення експрес-контролю в автоматизованому режимі, який дасть можливість у динаміці візуально здійснювати визначення швидкості процесу змочування конкретним лакофарбовим матеріалом конкретної поверхні твердого тіла при певних кліматичних умовах зовнішнього середовища.

Інформаційні джерела

1. ДСТУ ISO 12944-2019. Фарби та лаки. Захисні лакофарбові системи. [Чинний від 2019-13-05]. Вид. офіц. Київ, 2019.
2. Рудко В. М. Технічні вимоги до захисного лакофарбового покриття об'єктів підземних сховищ газу АТ «Укртрансгаз». Київ, 2023. 23 с.
3. Іванов С. В., Тітова Н. В., Трачевський В. В., Грушак З. В. Контроль якості лакофарбових матеріалів: підручн. Київ: НАУ, 2017. 452 с.
4. Павленко В. М. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. Вісник машинобудування та транспорту. № 2. 2024. С. 127-133.
5. Дмитрів І. В. Оцінка якості лакофарбових матеріалів транспортних засобів // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2023. № 3. С. 55-101.

6. Білинський Й. І. Класифікація методів крайового детектування зображень. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. С.161-169

7. Когут В. М., Витвицька Л. А. Обґрунтування вибору комплексного показника якості фарбового покриття. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості». Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 2023. С. 285-286

Kogut V., Vytvytska L.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED METHOD OF COMPLEX EXPRESS QUALITY CONTROL OF VARNISHES AND PAINTS

This article analyzed the main characteristics of different types of paints. Defined requirements for paint property depending on conditions and methods of use. Established the property list of paint and varnish materials that determine its quality. Defined dependence to property of paints from the type of shape, structure and porosity of the surfaces that they are applied on. The existing methods of control of individual properties of paints and varnishes are analyzed. The need to develop a comprehensive method of express quality control of paint and varnish material to ensure its quality control in the specific conditions of its application to a certain surface under the given conditions of use was substantiated. Based on a simulation of the process of wetting a certain surface with a paint and varnish material, it was established that with the help of this method, it is possible to control the quality of the paint and determine the conditions of its use. Substantiated that it is advisable to control the speed of the process of wetting a specific surface with paint in an automated mode based on an optical method, which makes it possible to perform express control of paint and varnish material in a dynamic visual mode.

Key words: *paint and varnish material, quality, characteristics of paints, surface wettability, complex express quality control, wettability of a solid surface, optical method.*

УДК 621.914.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-12

Кузнєцов Ю. М., Кобець І. Р.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЧОТИРЬОХКООРДИНАТНИЙ НАСТІЛЬНИЙ ВЕРСТАТ ПОРТАЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ

В статті відмічена актуальність і сформульована проблема створення малогабаритних верстатів з комп'ютерним керуванням, наведений огляд виробників і конструкцій таких верстатів, запропоновані варіанти настільного верстата портального компонування. На прикладі виготовлення складної деталі показана процедура розробки керуючої програми. Обґрунтована ефективність використання створених верстатів в навчальному процесі і у виробництві.

Ключові слова: настільний фрезерний верстат, гвинтова передача, приводи координатних переміщень, агрегатно-модульний принцип, керуюча програма, модернізація, модуль.

Постановка проблеми. Верстатобудування, як ключова галузь машинобудування, грає важливу роль у розвитку промисловості та національних економік. У змінному сучасному світі, зростаюча конкуренція, швидкі зміни в технологічному ландшафті і загальний перехід до цифрової індустрії ставлять перед верстатобудівними підприємствами ряд складних завдань і можливостей. Розвиток промисловості та її галузева структура визначають стан індустріального та технологічного рівня економіки країни [2,5]. Сучасний прогрес технологій виробництва невпинно розвивається, вимагаючи від інженерів і вчених постійного пошуку нових рішень та технологій для підвищення ефективності та автоматизації виробничих процесів. Для цього потрібне створення в навчальному процесі сучасної лабораторної дослідницької бази [8,10]. В умовах обмеженого фінансування вищої освіти доцільно виготовляти малогабаритні настільні верстати з комп'ютерним керуванням, які можуть використовуватися як для навчального процесу, так і на підприємствах для виготовлення деталей невеликих розмірів.

Серед перспектив розвитку машинобудування і, зокрема, верстатобудування можна відмітити [1,2]: 1) підвищення продуктивності обробки; 2) підвищення якості продукції, що виготовляється; 3) зменшення витрат і сировино-енергетичних ресурсів; 4) зменшення долі фізичної праці людини; 5) полегшення інтелектуальної праці людини; 6) розширення технологічних можливостей обладнання.

Для досягнення вищевказаних цілей необхідно впроваджувати наступні рекомендації [3]: оптимізувати існуючі виробничі потужності, автоматизувати та залучати передові цифрові технології для налагодження робочих процесів; прискорювати впровадження технологічних інновацій та інноваційних процесів; підвищувати кваліфікаційний рівень працівників машинобудування. Водночас науковцям і підприємцям варто продовжувати дослідження процесу розробки та впровадження нових технологій у машинобудуванні, адже використання сучасних технологій стає необхідністю, яка запобігає ризикам втрати актуальності на ринку сучасної промисловості.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є аналіз відомих малогабаритних верстатів і створення нового з розширеними функціональними можливостями.

На сучасному ринку інструментів і обладнання для малого та середнього виробництва існує багато виробників, що спеціалізуються на малогабаритних верстатах. Це обладнання відзначається високою мобільністю, компактністю та зручністю в експлуатації.

На ринку малогабаритних верстатів з ЧПК можна зустріти такі компанії як ПП «АНДІС-ТЕХНО», CNC Machines, Raptor CNC, AST3D.

Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК "SMART Light" (рис.1) від SmartCNC оснащений сенсорним екраном і автономним контролером (може працювати без підключення до ПК) та відмінно підійде для роботи з усіма видами дерева та м'яких металів. Верстат виготовлений з алюмінієвого профілю. В якості напрямних використовуються вали на опорі SBR20 та підшипники SBR20UU, які забезпечують високу точність і плавність переміщення. В якості приводу осі Z використовується кулькова гвинтова пара (КГП) [10].



Рисунок 1 – Фрезерний гравірувальний верстат з ЧПК "SMART Light"

Компанія CNC MACHINES – виробник 3-х координатного фрезерного верстата з ЧПК «Сокіл 3040» (рис.2) [11], призначеного для опрацювання 2D і 3D моделей, а також тіл обертання (зі встановленим модулем 4-ї осі). Ця модель вирізняється високою точністю і підвищеною швидкістю обробки, завдяки жорсткій станині з алюмінієвих сплавів. Безколекторний мотор-шпindel 1.5 кВт, з рідинним охолодженням дає змогу виконувати завдання без перерв, 24 години на добу. На верстаті можна виконувати такі операції, як розкрій листових матеріалів, вибірка, фрезерування пазів, гравірування, фрезерування 3d-рельєфів, свердління, лазерне гравіювання, фрезерування тіл обертання



Рисунок 2– "Сокіл 3040" від CNC MACHINES

Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd. є лідером у виробництві споживчих 3D-принтерів на світовому ринку [12]. Найновіший апарат Creality CP-01 (рис.3) зі змінними головками призначений для 3D-друку, лазерного гравіювання та фрезерування. Кожен модуль має універсальний роз'єм і легко замінюється, а у разі втрати електроживлення у CP-01 є захист для продовження роботи, де зупинився.



Рисунок 3 – 3D-принтер Crealty CP-01

На сьогоднішній день можна зустріти настільні фрезерні верстати з наступними схемами компоновки:

Вертикальна компоновка (рис.4). У цій схемі верстат має вертикальну колонку, на якій розташований шпиндель зі свердлом або фрезою. Такі верстати обладнані рухомим хрестовим столом з Т-подібними пазами для установки і закріплення заготовки, лещат або іншого пристосування. Ця схема забезпечує компактність, стабільність і точність обробки. Вертикальні верстати добре підходять для свердління отворів або фрезерування на вертикальних поверхнях. Робоча зона може бути обмеженою, що робить його менш підходящим для обробки великих деталей.



Рисунок 4 – Фрезерний верстат JET JMD-X1L

Портальна компоновка (рис.5), де шпиндель рухається вздовж порталу (рами), що підтримує горизонтальний рух вздовж осей X та Y. Ця схема дозволяє забезпечити великий робочий простір і високу точність обробки великих деталей. Верстати такого типу можуть бути з рухомим порталом (рис.5) або з рухомим столом (рис.6).



Рисунок 5 – CNC Router of the High-Z T-Series

У верстаті з рухомим порталом робочий інструмент (наприклад, фреза або інший різальний інструмент) рухається вздовж горизонтальних напрямків на порталній конструкції, яка підтримує його рух. Портал має великі розміри і дозволяє обробляти великі деталі або великі робочі області.

У верстатах з рухомим столом робочий інструмент розташований на жорсткому порталі, а робочий стіл, на якому розташовані оброблювані деталі, рухається вздовж горизонтальних напрямків. Рухомий стіл дозволяє легко позиціонувати та обробляти деталі, а портал забезпечує стабільну підтримку робочого інструмента.



Рисунок 6 – SainSmart Genmitsu 3018-PROVer

Малогабаритні свердлильно-фрезерні верстати відзначаються мобільністю, оскільки їх легко переміщувати, роблячи їх ідеальними для невеликих майстерень або гаражів. Вони також вражають універсальністю, здатністю виконувати різноманітні види обробки, включаючи свердління, фрезерування, різання та інші операції, та при цьому вони компактні, що робить їх ідеальними для обмежених просторів.

Однак, небагато виробників розробляють настільні фрезерні верстати, в яких передбачена багатофункціональність, що полягає у можливості швидко і просто замінити мотор-шпиндель на друкуючу головку 3D-принтера або лазерну головку для різки листового матеріалу чи гравіювання.

Проектування верстата. Після ретельного аналізу значного обсягу даних, патентного дослідження подібних верстатів та детального вивчення їх конструкції [4,6,8], авторами сконструйований в різних варіантах виконання настільний верстат порталного компонування (рис.7).



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Варіанти створеного верстата:

а) фрезерний верстат; б) лазерний верстат; в) фрезерний 4-х координатний верстат

Несуча рама виконана з верстатного алюмінієвого профілю типу V-slot. Це значно спрощує і здешевлює конструкцію, оскільки такі елементи є стандартними і при поломці будь-якого елемента рами, його можна легко замінити. Верстат містить два робочих столи. Верхній призначений для обробки листового матеріалу і малогабаритних деталей, нижній – для встановлення на ньому верстатного оснащення (ділильна головка, лещата) і обробки більш габаритних деталей. Це дозволяє при малому ході шпинделя вздовж осі Z оброблювати досить широкий спектр деталей.

При використанні нижнього столу слід демонтувати кілька центральних секцій верхнього столу, а оскільки стіл складається з кількох профілів V-slot 20x80, то демонтаж не викликає значних проблем.

В якості напрямних використано лінійні напрямні типу SBR, що володіють значно більшою жорсткістю, порівняно зі звичайними круглими напрямними.

Координатні переміщення здійснюються за рахунок кульково-гвинтових передач (КГП). Слід зауважити, що в даному типі обладнання використання передачі гвинт-гайка ковзання не є раціональним, оскільки при роботі верстата утворюється значна кількість стружки. А гайка ковзання не має ніякого захисту від зовнішнього бруду, на відміну від гайки КГП.

Опори для гвинтових пар виробляються фірмою TBI MOTION (Тайвань) з використанням радіально-упорних підшипників виробництва NSK. Якщо кріпити гвинт безпосередньо на кроковий двигун, то вал КГП може ходити вздовж осі, що не забезпечуватиме точність. Використовуючи підшипникові опори можна помітно знизити люфт всієї передачі. Передня опора складається з двох підшипників і затяжного гвинта, а задня опора з одного підшипника який може ковзати в корпусі.

Вага верстату після модернізації становить 30 кг. Робочий орган має збільшений діапазон переміщень по осях: X – 340 мм, Y – 330 мм, Z – 65 мм. Створений верстат має ряд значних переваг порівняно з попередніми моделями.

Налагодження верстата. Для створення керуючої програми використано програмне забезпечення від компанії Autodesk, а саме Inventor 2024 та PowerMill 2024. Спочатку за допомогою Inventor 2024 створюється 3д-модель деталі, яку необхідно потім завантажити у PowerMill 2024 для створення керуючої програми. Для прикладу виконана обробка шахової фігури – короля (рис.8).



Рисунок 8 – Деталь для обробки на розробленому верстаті

Програма PowerMill підтримує різні формати файлів 3Д-моделей. Найбільш поширеним є формат STEP. Модель деталі завантажується в програму для подальшого створення керуючої програми.

Обробка на верстаті з 4-ма осями буде відбуватись в декілька етапів. Спочатку виконується чорнова обробка однієї половини деталі (розділення відбувається вздовж четвертої поворотної осі), потім заготовка перевертається на 180° і оброблюється інша половина. Чистова обробка відбувається без розділення деталі.

Розглянемо детальніше кроки для створення керуючої програми. Після завантаження файлу моделі в PowerMill необхідно створити заготовку (рис.9) і локальну систему координат, в якій вісь X збігається з поворотною віссю A верстата, а вісь Z – з віссю Z верстата (рис.10).

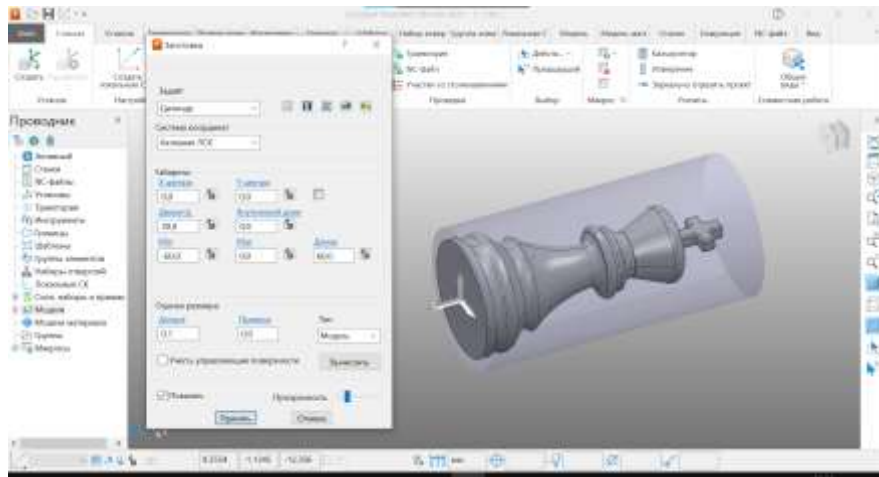


Рисунок 9 – Створення заготовки

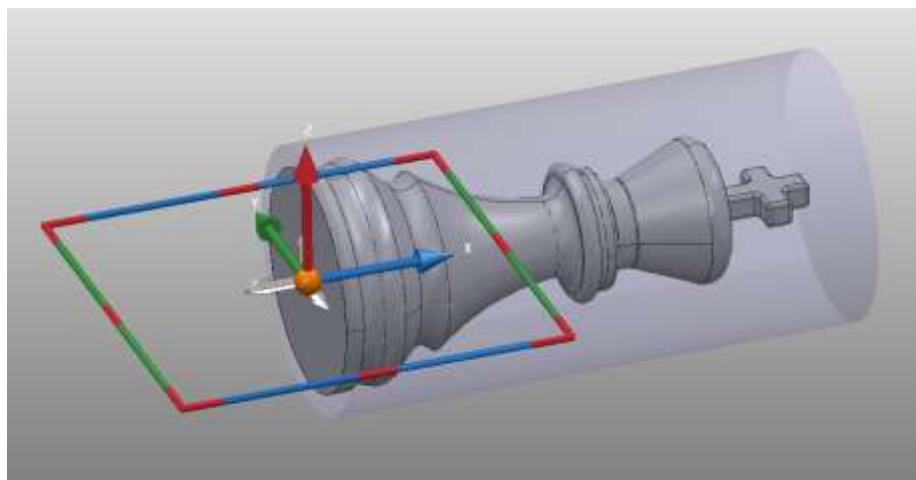


Рисунок 10 – Локальна система координат

Наступним кроком є створення траєкторії обробки. Для чорнової обробки застосована стратегія «вибірка 3D -моделі». За цього способу обробки відбувається фрезерування основного матеріалу і заготовка набуває наближеного вигляду до необхідного (рис.11).

Наступним етапом є налаштування обраної стратегії фрезерування. В цьому вікні налаштовується система координат в якій виконується обробка, стратегія підводу і відводу інструмента, обмеження при обробці, параметри інструменту, режими різання і багато іншого.

Після всіх налаштувань система генерує траєкторію, по якій буде переміщуватись робочий орган в процесі обробки деталі. PowerMill дає можливість виконати симуляцію виконання керуючої програми.

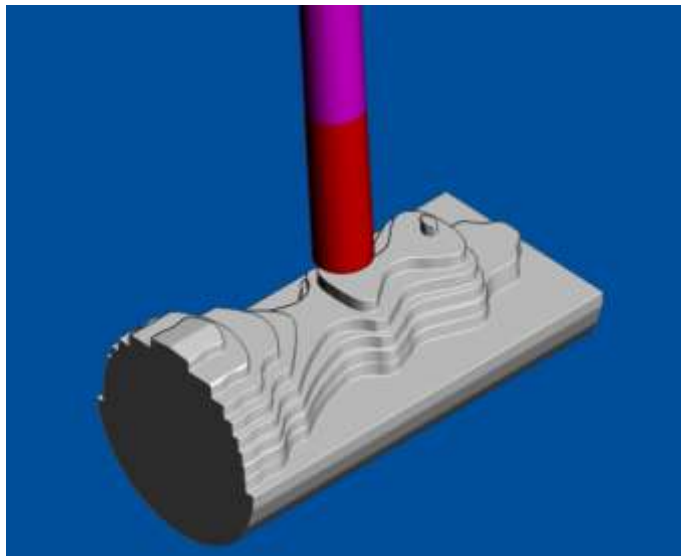


Рисунок 11 – Результат виконання першої частини чорнової обробки

Друга половина деталі оброблюється аналогічним чином. Для цього створюється копія раніше установлені локальної системи координат, і стратегія обробки. Систему координат повертають на 180° навколо осі X (рис.12), всі інші налаштування залишаю без змін.

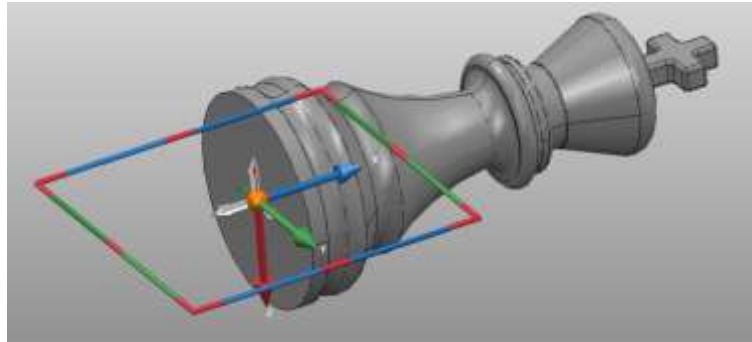


Рисунок 12 – Система координат для чорнового фрезерування другої половини деталі. В результаті отримаємо деталь після чорнкової обробки з обох сторін (рис.13).

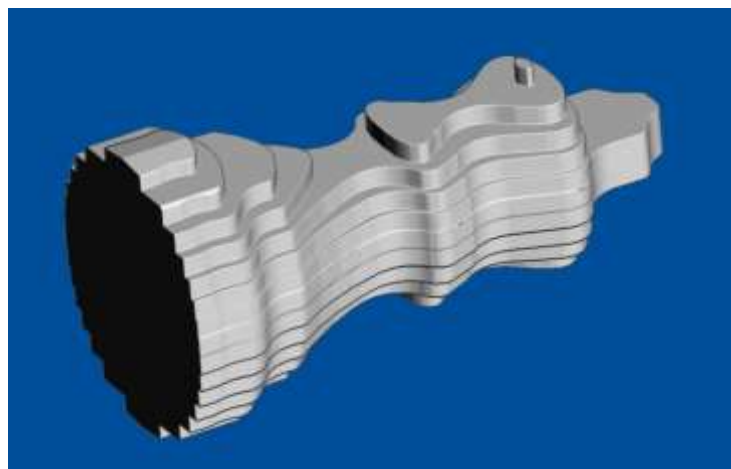


Рисунок 13 – Деталь після чорнового фрезерування

Створені керуючі програми для чорнкової і чистової обробки необхідно зберегти у NC-файл, в якому буде розміщений G-код.

Чистова обробка буде виконуватись за стратегією «4 осьова», при якій вісь A постійно обертається, а робочий орган рухається в площині YZ. Таким чином виконується обробка ніби по спіралі. Для цього методу обробки також налаштовуються параметри інструменту, режими різання і т.д.

Далі всі дії виконуються аналогічно до вищенаведеного прикладу створення керуючої програми для чорнкової обробки. В результаті маємо повністю готову керуючу програму для обробки деталі. Результат симуляції програми наведено на рисунку 14.

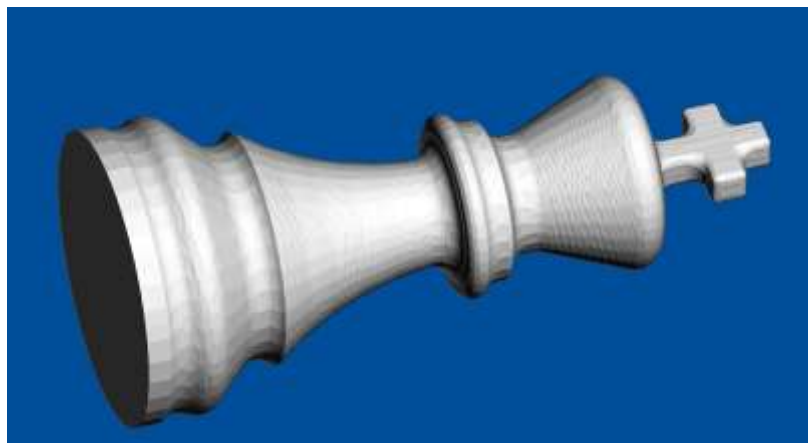


Рисунок 14 – Деталь після чистового фрезерування

Висновки. Розроблений універсальний настільний 4-х координатний верстат з розширеними функціональними можливостями має значний науково-технічний потенціал і практичну цінність для сучасного машинобудування. Його ефективно використовувати в навчальному процесі і у виробництві при виготовленні складних деталей невеликих розмірів.

Проведено вартісну оцінку виготовлення удосконаленого зразка верстата та розроблено рекомендації щодо подальшого вдосконалення. Проект є економічно вигідним і перспективним.

Інформаційні джерела

1. Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Кириченко А. М. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: В 3-х частинах. Кіровоград, 2003. ч.1. 422 с.
2. Валявський І. А., Лисенко О. В., Лисенко І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навч. посіб. для ЗВО. 2-ге вид., перероб. і доп. Кропивницький, 2023. 281 с.
3. Кузнецов Ю. М., Саленко О. Ф., Харченко О. О., Щетинін В. Т. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення. Вид-во «Точка». 2014. 500 с.
4. Кузнецов Ю. М., Придальний Б. І., Гао Сінмін. Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика: Монографія-Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 292 с. ISBN 978-966-940449-7.
5. Кузнецов Ю. М., Кривчук Ю. Т. Спрямований генетичний синтез настільних фрезерних верстатів //XIX-XX МНПК «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», 25-26.11.2020, м.Суми, СумДУ. с.103-106
6. Кузнецов Ю. М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні / Вісті АІНУ №1 (44), 2011.
7. Кузнецов Ю. Н., Гайдаєнко Ю. В., Кривчук Ю. Т. Моделювання варіантів малогабаритного фрезерного верстата порталної компоновки (англ.). Міжнародна науково-технічна конференція UNITECH'19, г. Габрово (Болгарія), 2019, т.2. с.255-258.
8. Кузнецов Ю. М., Степаненко О. О. Настільні фрезерні верстати, керовані комп'ютером. Технологічні комплекси, Луцьк. 2010. № 1. С. 72–77.
9. Степаненко О. О., Манжола М. Ю., Кузнецов Ю. М. Дослідження впливу компонувань настільних фрезерних верстатів з ЧПК на якість обробки деталей. Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки», №2, Чернігів, 2015, с.78-83.
10. Степаненко О. О. Синтез малогабаритних фрезерних верстатів з комп'ютерним керуванням. Автореферат дис. канд. техн. наук. К.: 2014. 14 с.
11. Фрезерні верстати. <https://smartcnc.com.ua/shop/frezernyj-gravirovalnyj-standok-s-chpu-smart-light-4060> (дата звернення: 12.09.2024)
12. Creality. URL: <https://www.creality.com/> (дата звернення: 20.09.2024)
13. Tai Yu, Chunqiang Yuan, Yupeng Wang and Taorui Liu Influence of spatial position of double turntable swing on dynamic characteristics of five-axis machine tool ShiWu , Advances in Mechanical Engineering 2022, Vol. 14(11). p. 1-15

Kuznetsov Yu., Kobets I.

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

FOUR-COORDINATE FLOORING LAYOUT OF PORTAL COMPOSITION

The article highlights the relevance and formulates the problem of creating small-sized workbenches with computer hardware, inspecting the data generators and the design of such workbenches, and proposing options for a table-top workbench with a portal layout. The example of the preparation of a folding part shows the procedure for breaking up the ceramic program. The efficiency of creation machines in the initial process and during production has been primed.

Key words: desktop milling bench, screw drive, coordinate movement drives, aggregate-modular principle, core program, modernization, module.

УДК 004.91

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-13

Кулакевич О. Р., Грудецький Р. Я., Сацик В. О., Маркіна Л. М.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБКА ІОТ: ІОС - ЗАСТОСУНОК ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОБЛАДНАННЯМ

У статті розглянуто основні протоколи взаємодії мобільних застосунків із технічним устаткуванням, розроблено мобільний застосунок, який забезпечує взаємодію з технічним устаткуванням за допомогою сучасних протоколів передачі даних. Основними протоколами, використаними у програмі, є Bluetooth, Wi-Fi, MQTT та Bonjour, які дозволяють реалізувати керування пристроями, обмін даними та налаштування параметрів підключення. Проведено аналіз способів комунікації програмного забезпечення з сенсорами, зовнішніми пристроями та програмованими системами для забезпечення стабільного зв'язку.

Ключові слова: мобільні застосунки, технічне устаткування, протоколи взаємодії, Bluetooth, Wi-Fi, NFC, MQTT, сенсори, датчики, зовнішні пристрої, автоматизація, інтернет речей (IoT), API, інтеграція, передача даних, керування пристроями.

Постановка проблеми. У сучасному світі розвиток мобільних застосунків та технічного устаткування є важливим фактором автоматизації та оптимізації процесів у різних галузях – від побутових систем до промислових підприємств. Однак ефективна взаємодія між мобільними застосунками та технічним устаткуванням потребує використання надійних і оптимізованих протоколів передачі даних та керування пристроями.

Проблема полягає у забезпеченні стабільного зв'язку, швидкої обробки даних та сумісності програмного забезпечення з різними типами технічного устаткування, включаючи сенсори, зовнішні пристрої та програмовані системи. При цьому необхідно враховувати:

- обмежені ресурси мобільних пристроїв (пам'ять, енергоспоживання, обчислювальна потужність).
- вибір оптимального протоколу для конкретного завдання (наприклад, Bluetooth для близького зв'язку, Wi-Fi для обміну великими даними, MQTT для IoT-рішень).
- високі вимоги до безпеки передачі даних, особливо у промислових та критичних системах.
- швидкість інтеграції та масштабованість рішень у великих системах автоматизації.

Таким чином, виникає необхідність у глибокому аналізі існуючих протоколів взаємодії мобільних застосунків з технічним устаткуванням, виявленні їх переваг та обмежень для розробки ефективних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки значна кількість досліджень присвячена оптимізації взаємодії мобільних застосунків із технічним устаткуванням, особливо в контексті Інтернету речей (IoT), автоматизації та цифрових технологій. Розглянемо ключові напрями та результати досліджень у цій сфері. У працях Smith et al. (2022 р.) досліджено ефективність Bluetooth Low Energy (BLE) для інтеграції мобільних застосунків із сенсорами в системах моніторингу здоров'я. Зазначено низьке енергоспоживання BLE, але вказано на його обмежену пропускну здатність, що дозволило використовувати BLE з незначною кількістю даних, яка може передавати в обмеженому радіусі, але одночасно це дозволило використати BLE у пристроях, які не вимагають постійно електроживлення. Робота Higgins et al. (2023 р.) висвітлює використання протоколу MQTT для інтеграції мобільних застосунків з «розумними» системами. MQTT показав високу надійність у передачі даних з мінімальним навантаженням на мережу. Даний протокол на сьогодні дозволяє інженерам створювати чимало програмного забезпечення для керування техустаткуванням, зокрема надавати тим чи інших пристроям (до прикладу верстатам) «розумних функцій». У публікації Rahman et al. (2023 р.) висвітлено питання захисту даних під час взаємодії мобільних застосунків із технічним устаткуванням через Wi-Fi та Bluetooth. Останні дослідження демонструють значний прогрес у розробці та вдосконаленні протоколів взаємодії мобільних застосунків із технічним устаткуванням. Основна увага приділяється енергоефективності, швидкості передачі даних, сумісності та безпеці комунікацій, що створює фундамент для подальшого розвитку систем автоматизації та IoT-рішень.

Мета роботи полягає у вивченні актуальних та прогресивних протоколів, таких як Bluetooth, Wi-Fi, NFC, MQTT, та їх застосуванню у різних сценаріях взаємодії з сенсорами, зовнішніми пристроями та системами автоматизації, а також розробці власного універсального

рішення на базі мобільного застосунку, який матиме можливість взаємодіяти з усіма протоколами передачі даних.

Викладення основного матеріалу. Розвиток мобільних технологій дає можливість програмним застосункам взаємодіяти з різноманітним технічним устаткуванням, що відкриває широкі можливості для автоматизації як побутових, так і промислових завдань. Основні протоколи взаємодії – Bluetooth, Wi-Fi, NFC та MQTT – забезпечують передачу даних і керування устаткуванням через мобільні застосунки [4]. Використовуючи мову програмування Swift, можна створювати рішення, які інтегруються зі станками, сенсорами та зовнішніми пристроями для контролю, моніторингу та управління. Одним із найпоширеніших сценаріїв є взаємодія з Bluetooth-пристроями [4]. Наприклад, сучасні станки на виробництві можуть бути обладнані модулями Bluetooth Low Energy (BLE), що дозволяють передавати стан сенсорів, лічильники виконаних операцій та інші дані. У Swift для роботи з BLE використовується фреймворк CoreBluetooth, який забезпечує можливість сканування пристроїв, встановлення з'єднання та обміну даними. Приклад реалізації зображено на рисунку 1.

```
import CoreBluetooth

class BLEManager: NSObject, CBCentralManagerDelegate, CBPeripheralDelegate {
    var centralManager: CBCentralManager!
    var discoveredPeripheral: CBPeripheral?
    let targetDeviceName = "ProductionMachine123"

    override init() {
        super.init()
        centralManager = CBCentralManager(delegate: self, queue: nil)
    }

    func centralManagerDidUpdateState(_ central: CBCentralManager) {
        if central.state == .poweredOn {
            print("Bluetooth увімкнено, починається сканування...")
            centralManager.scanForPeripherals(withServices: nil, options: nil)
        } else {
            print("Bluetooth вимкнено.")
        }
    }

    func centralManager(_ central: CBCentralManager, didDiscover peripheral: CBPeripheral, advertisementData: [String: Any], rssi RSSI: NSNumber) {
        if let name = peripheral.name, name == targetDeviceName {
            print("Знайдено пристрій: \(name)")
            discoveredPeripheral = peripheral
            centralManager.stopScan()
            centralManager.connect(peripheral, options: nil)
        }
    }

    func centralManager(_ central: CBCentralManager, didConnect peripheral: CBPeripheral) {
        print("Підключено до \(peripheral.name ?? "некідомого пристрою")")
        peripheral.delegate = self
        peripheral.discoverServices(nil)
    }
}
```

Рисунок 1 – Приклад використання фреймворку CoreBluetooth мовою Swift для під'єднання та зчитування інформації з технічного станка, який обладнаний BLE

Код на рисунку 1 демонструє підключення до BLE-пристрою, сканування його характеристик та встановлення зв'язку. У випадку зі станками це може бути передача даних про температуру, швидкість обертання шпинделя чи статус виконання операції. Використовуючи BLE, можна налаштувати мобільний застосунок для контролю ключових параметрів обладнання та надсилання сигналів для корекції роботи у реальному часі.

Іншим важливим способом комунікації є використання Wi-Fi для обміну великими обсягами даних між мобільним застосунком і технічним устаткуванням. Приклад реалізації зображено на рисунку 2. У цьому контексті застосунки часто використовують REST API для взаємодії з серверами або пристроями, що підтримують протоколи HTTP/HTTPS. Наприклад, станок на заводі може передавати журнали операцій, помилки та параметри роботи на сервер, звідки їх може отримати застосунок.


```
import Foundation

func fetchMachineStatus() {
    let url = URL(string: "http://factory-server.com/api/machine/status")!
    let task = URLSession.shared.dataTask(with: url) { data, response, error in
        if let error = error {
            print("Помилка: \(error.localizedDescription)")
            return
        }

        if let data = data, let jsonResponse = try? JSONSerialization.jsonObject(with: data) {
            print("Статус станка: \(jsonResponse)")
        }
    }
    task.resume()
}
```

Рисунок 2 – Приклад отримання статусу верстату за допомогою REST API взаємодії

Запит може використовуватися для отримання параметрів продуктивності або діагностики станка. Наприклад, якщо температура двигуна станка перевищує критичний рівень, застосунок може надіслати сигнал технічному персоналу про необхідність обслуговування [1, 2, 3].

На практиці, інтеграція з обладнанням може охоплювати такі приклади: ЧПУ-станки, роботизовані маніпулятори, конвеєрні лінії та автоматизовані верстати. Наприклад, станок з ЧПУ (числовим програмним управлінням) може надавати дані про програму, що виконується, точність операцій та технічний стан. Мобільний застосунок, у свою чергу, може віддалено оновлювати програму станка або налаштовувати його параметри.

Таким чином, використовуючи можливості Swift та сучасні протоколи взаємодії, можна створити потужні мобільні застосунки, що інтегруються з технічним устаткуванням. Це відкриває широкі можливості для моніторингу, управління та автоматизації як на невеликих виробництвах, так і у великих промислових системах.

Додавши протокол MQTT, який забезпечує швидкий обмін повідомленнями у реальному часі, що критично важливо для моніторингу стану станка, таких як поточна температура, оберти двигуна або виявлення критичних помилок. Застосунок через MQTT може миттєво отримувати повідомлення про збої в роботі чи надмірне нагрівання станка й реагувати на них, наприклад, зупиняючи обладнання чи сповіщаючи оператора. На рівні коду Swift це дозволяє поєднати дві архітектури — періодичне оновлення даних через REST-запити та обмін короткими повідомленнями через MQTT [5].

Для прикладу, REST API може використовуватися для завантаження журналів роботи станка за день. Виклик здійснюється через HTTP-запит, і застосунок отримує JSON-дані з усіма логами операцій. У той час MQTT з'єднання працює паралельно для отримання реального часу статусу сенсорів. Якщо температура станка перевищує 90°C, MQTT-повідомлення негайно надсилається застосунку, і оператор бачить відповідне сповіщення з вимогою провести перевірку або зупинити роботу обладнання [5].

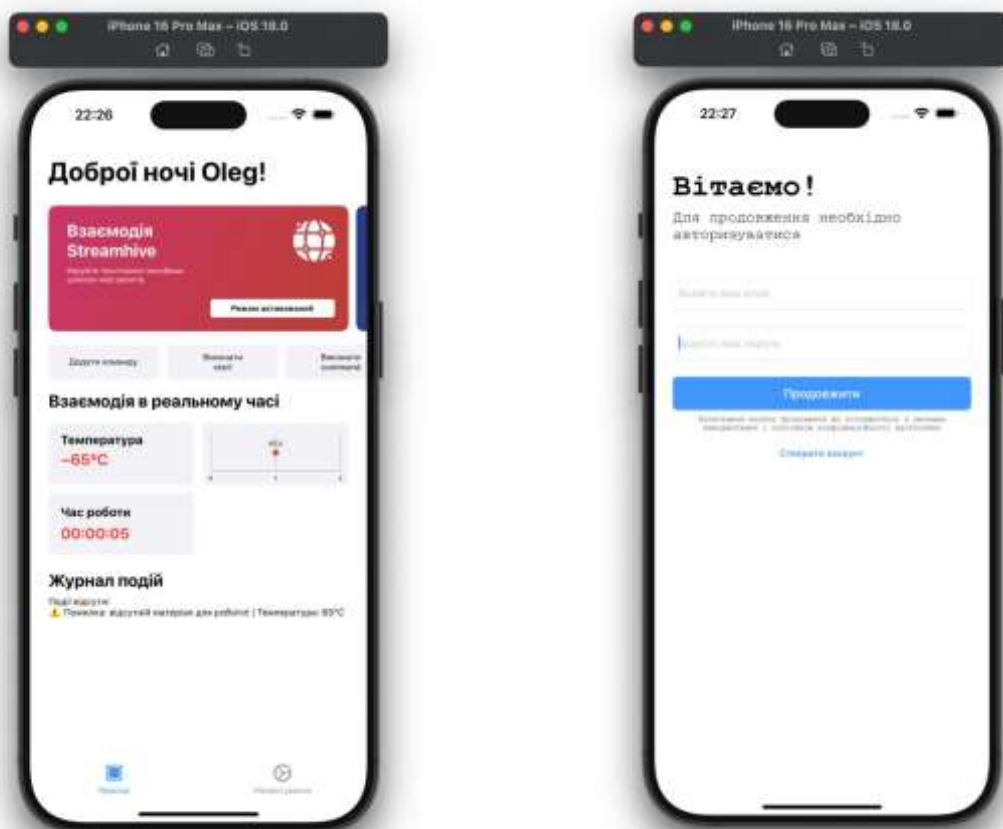
Уявімо ситуацію, коли технічний устаткуванням обладнаний датчик температури, підключений через MQTT. У Swift ми підписуємося на топик «factory/sensors/temperature». Коли застосунок отримує повідомлення зі значенням температури, воно обробляється миттєво у відповідному делегаті. Якщо значення перевищує порогове, застосунок автоматично публікує команду на топик «factory/commands» зі значенням «STOP_MACHINE». Таке управління дозволяє ефективно реагувати на критичні ситуації без затримок. З іншого боку, якщо оператор у застосунку хоче надіслати команду для зміни швидкості обертання двигуна, REST API використовується для відправлення даних конфігурації на сервер, де вони синхронізуються з обладнанням у відповідний час.

Це поєднання REST API та MQTT дозволяє мобільному застосунку забезпечувати як точний моніторинг стану технічного устаткування, так і гнучке управління з високою швидкістю реагування на події. Технологічно застосунок оптимізує передачу даних, зменшуючи навантаження на мережу та покращуючи загальну продуктивність системи.

Враховуючи вище описане, розглянемо практичне застосування протоколів передачі даних і власне мобільного застосунку, який завдяки своїм технічним можливостям і реалізації конкретних рішень зможе спілкуватися зрозумілою мовою із технічним устаткуванням.

Для розробки такого застосунку нам потрібно передбачити просту і зрозумілу архітектуру проекту, яка буде легко читатися та може бути розширена згодом, такою архітектурою було обрано саме VIPER (VIEW-INTERACTOR-PRESENTER-ENTITY-ROUTER). На базі цієї архітектури ми розгортаємо систему авторизації, використовуючи електронну пошту нашого користувача і його пароль, завдяки цьому система набуде потрібного захисту, аби сторонні особи не отримали доступу до робочих приладів без відома відповідальної особи.

Після того як користувач буде авторизований в системі ми пропонуємо йому зручний інтерфейс користувача і систему розширених налаштувань, де потрібно пройти базову конфігурацію, як от налаштувати IP-адресу нашого приладу, який буде отримувати команди. Інша частина застосунку – це і є взаємодія по відповідних протоколах, яких є 4 і всі вони є уніфіковані в своєму роді. Розглянемо один з них – як от Bonjour або ж взаємодія по Wi-Fi. Цей протокол широко використовується у сфері IoT і притаманний виключно пристроям компанії Apple. Даний протокол передбачає наявність пристрою, який є периферійним, буде транслювати свою наявність і отримувати команди від центру управління, що в нашому випадку є мобільним застосунком (рисунок 3: а, б).



а)

б)

Рисунок 3 – Інтерфейс мобільного застосунку

Для тестування було розроблено програму симулятор для MacOS, яка і є у нашому випадку периферійним пристроєм, до якого приєднається iOS застосунок і буде передавати команди. Власне надалі MacBook може бути приєднаний до будь-якого апаратного верстата і управляти його діями у вигляді так званого сервера. У будь-якому разі наявність MacBook не обов'язкова для такої взаємодії. Все, що було зроблено – це виключно для демонстрації технічної можливості такої реалізації. Отже, на рисунку 4 чітко відображено принцип взаємодії мобільного застосунку із симулятором за протоколом Bonjour.

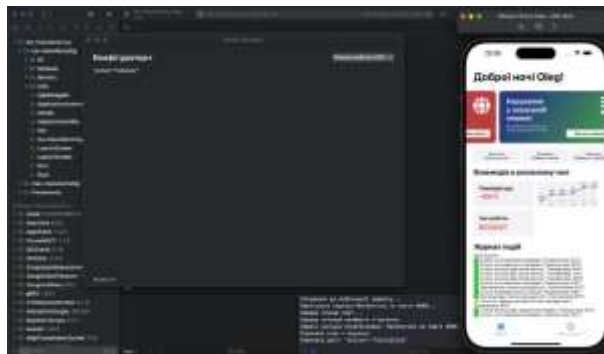


Рисунок 4 – Процес тестування взаємодії по протоколу Bonjour

Висновки. У цій роботі було проаналізовано можливості взаємодії мобільних застосунків із технічним устаткуванням на основі сучасних протоколів передачі даних, таких як REST API для роботи через Wi-Fi та MQTT для обміну повідомленнями у реальному часі та розроблено мобільний застосунок для тестування таких взаємодій. Поєднання цих підходів дозволяє створити ефективні програмно-апаратні рішення, що забезпечують високу продуктивність, стабільність та гнучкість системи автоматизації. REST API є оптимальним вибором для передачі великих обсягів даних, таких як звіти, журнали або конфігураційні параметри устаткування, тоді як MQTT забезпечує миттєву доставку критично важливих повідомлень і дозволяє реагувати на зміни стану устаткування у реальному часі.

Реалізація такого підходу у мобільних застосунках на платформі iOS за допомогою Swift дозволяє легко інтегрувати функціонал для моніторингу й управління станками, сенсорами або іншими пристроями. Приклад із керуванням температурою станка через MQTT демонструє, як можна швидко обробляти події та приймати рішення, тоді як REST API забезпечує централізовану синхронізацію та аналіз даних. Це відкриває широкі можливості для автоматизації виробництва, впровадження IoT-рішень та оптимізації технічних процесів.

Таким чином, використання REST API та MQTT у мобільних застосунках є ефективним рішенням для інтеграції з технічним устаткуванням, що забезпечує баланс між швидкістю передачі даних, стабільністю з'єднання та можливістю масштабування системи для великих проектів. Це підхід, який може стати фундаментом для подальшого розвитку автоматизованих систем як у побутовій, так і промисловій сфері.

Інформаційні джерела

1. Higgins et al. The Use of MQTT in IoT-Based Smart Systems. *International Journal of Industrial Automation*, 2023. Vol. 12. No. 4. P. 123-130.
2. Kumar R., Li J., Zhou X. Comparative Analysis of Wi-Fi and MQTT for Industrial Automation. *Journal of Industrial Networking Technologies*, 2022. Vol. 8. No. 3. P. 201-210.
3. Rahman M., Gupta S., Petrov D. Data Security in MQTT and REST API for IoT Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023. Vol. 19. No. 2. P. 450-457.
4. Smith T., Adams J., Chen W. Efficiency of Bluetooth Low Energy (BLE) in Industrial Monitoring Systems. *Sensors and Actuators Journal*, 2022. Vol. 11. No. 5. P. 78-85.
5. Li J., Zhou M., Wang S. Smart Industrial Communication with REST API and MQTT Protocols. *Advances in Automation Engineering*, 2021. Vol. 10. No. 1. P. 67-74.

Kulakevich O., Grudetskyi R., Satsyk V., Markina L.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

IOT DEVELOPMENT: IOS - APPLICATION FOR EQUIPMENT MANAGEMENT

The article considers the main protocols of interaction of mobile applications with technical equipment, developed a mobile application that provides interaction with technical equipment using modern data transmission protocols. The main protocols used in the program are Bluetooth, Wi-Fi, MQTT and Bonjour, which allow you to implement device management, data exchange and connection settings. An analysis of software communication methods with sensors, external devices and programmable systems to ensure stable communication was carried out.

Keywords: mobile applications, hardware, interaction protocols, Bluetooth, Wi-Fi, NFC, MQTT, sensors, sensors, external devices, automation, Internet of Things (IoT), API, integration, data transfer, device management.

УДК 004.67

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-14

Місько В. М., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СЕГМЕНТАЦІЯ МЕДИЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ПОРОГОВИМИ МЕТОДАМИ

Робота присвячена програмній реалізації методів цифрової обробки зображень, зокрема сегментації медичних знімків, з використанням переваг мови програмування Python. У роботі реалізовані алгоритми фільтрації та придушення шуму, такі як нечіткий адаптивний медіанний фільтр, а також сегментація із застосуванням методів кластеризації та алгоритмів, зокрема методу Оцу та фільтра Габора для визначення текстури. Також розглянуто модифікації алгоритмів нечітких С-середніх для покращення сегментації медичних даних. Розробка скриптів сегментації медичних зображень дозволить автоматизувати процес обробки та аналізу даних у медичній сфері. Це сприятиме покращенню точності діагностики, забезпечить швидший доступ до результатів обробки медичних зображень і відкриє нові можливості для досліджень та планування лікування.

Ключові слова: автоматизація, цифрова обробка зображень, Python, нечіткий адаптивний медіанний фільтр, кластеризація, придушення шуму, текстурний аналіз.

Постановка проблеми. Цифрова обробка зображень в медицині є важливим інструментом для покращення діагностики, лікування та дослідження захворювань, а також сприяє розвитку нових методів обробки та аналізу медичних даних. Вона дозволяє медичним фахівцям отримувати детальні та точні зображення органів та тканин пацієнтів, що полегшує їхню роботу та робить процес діагностики ефективнішим.

Цифрова обробка зображень дозволяє виявляти навіть найдрібніші деталі та аномалії, що робить можливим раннє виявлення захворювань та призначення вчасного та ефективного лікування. Крім того, вона дозволяє лікарям виконувати точні інтервенції та операції з високою точністю, що зменшує ризик ускладнень та покращує результати лікування.

Метою цифрової обробки зображень є покращення якості зображень, вилучення значущої інформації із зображень та автоматизація завдань, пов'язаних із зображеннями.

Серед різних методів обробки зображень одним із найважливіших інструментів у обробці медичних зображень є сегментація. Цей метод виявився корисним у багатьох застосуваннях, таких як: виявлення та вимірювання об'єму пухлини, виявлення мікрокальцифікатів на мамограмах, планування хірургічних операцій, автоматичний підрахунок клітин крові, допомога в плануванні лікування.

Сегментація зображень є складним та важким етапом попередньої обробки з великим спектром застосувань в медицині та біології, таких як біометрія, медичний аналіз зображень, виявлення захворювань та класифікація пухлин та новоутворень. Мета сегментації полягає в розділенні зображення на зв'язні області, враховуючи певні характеристики зображення, такі як колір, інтенсивність та текстура.

Для обробки та аналізу цифрових медичних зображень чудовим вибором є Python, внаслідок поєднання його простоти, універсальності, великих бібліотек та активної спільноти, що дає змогу дослідникам та практикам ефективно вирішувати складні задачі в галузі охорони здоров'я та біомедичної візуалізації.

Використовуючи бібліотеки Python, можна ефективно та результативно виконувати широкий спектр завдань з обробки цифрових медичних зображень, таких, як сегментація, реєстрація, виділення ознак або аналіз медичних зображень. Таким чином, Python надає інструменти та ресурси, необхідні для вирішення складних завдань з обробки медичних зображень.

Аналіз останніх досліджень. У цифровій обробці зображень порогове значення є одним із найпростіших методів сегментації зображень. Порогове значення – це такий метод сегментації області, коли зображення ділиться на групи пікселів зі значеннями, які або нижчі, або вищі, або дорівнюють порогу. Розроблено кілька порогових методів, таких як глобальні методи на основі гістограм рівня сірого, глобальні методи на основі локальних властивостей, адаптивне порогове визначення [1].

Одним із найбільш використовуваних глобальних порогових методів є метод Оцу [2], де порогове значення визначається автоматично шляхом максимізації дисперсії інтенсивності. Цей

метод має хорошу продуктивність, коли гістограма зображення має бімодальний розподіл, але погано працює на зображеннях із шумом або зображеннях із малим розміром об'єкта, чи з неоднорідним освітленням [3]. Щоб подолати ці труднощі, були розроблені локальні адаптації методу Оцу, такі як метод Кітлера-Лінгворта [4].

Глобальне порогове визначення обчислень є простим і швидким, дає хороші результати на зображеннях, які містять об'єкти з однаковими значеннями інтенсивності на контрастному фоні. Однак це не вдається, якщо зображення має низький контраст між об'єктом і фоном, або воно містить шум, або якщо інтенсивність фону на зображенні значно змінюється [5].

Для сегментації медичних зображень пропонується кілька підходів, заснованих на порогових методах.

У [6] запропоновано напівавтоматичну версію глобальної порогової техніки для вимірювання об'ємів шлуночків із 3D-магнітно-резонансних (МР) зображень, де порогове значення автоматично обчислюється шляхом порівняння розподілу інтенсивності пікселів у круглих областях навколо двох попередньо вибраних пікселів.

У [7] запропоновано сегментацію медичного зображення за допомогою оптимізованого методу Оцу, заснованого на вдосконаленні алгоритму порогового визначення, з використанням гістограми зображення та методів глобального порогового визначення, де вибір початкового порогового значення залежить від гістограми та градації сірого зображення.

Також пропонується гібридний метод сегментації, який поєднує методи локального та глобального порогів для сегментації зображень клітинок [8].

Застосовується метод автоматизованої сегментації печінки з медичних зображень. Система, яка є інваріантною за положеннями величин розміру, форми та інтенсивності, складається з трьох етапів [9].

У [10] запропоновано пороговий алгоритм на основі 3D Otsu та багатомасштабного представлення зображення для сегментації медичних зображень, де високу часову складність алгоритму 3D Otsu було подолано варіантом прискорення з використанням правила декомпозиції розмірів. Запропонований підхід дає стабільні результати сегментації, є стійким до шуму та підходить для дворівневих та багаторівневих порогових випадків.

Час виконання процесу сегментації збільшується зі збільшенням кількості порогових рівнів, які необхідно визначити. Необхідність знайти оптимальне порогове значення за менший час підштовхнула дослідження до підходів, у яких оцінка параметрів базується на розподілі Гауса. У [11] запропоновано алгоритм оптимізації з технікою багаторівневої порогової сегментації для сегментації медичних зображень райдужки, псоріазу та ракових клітин.

Незважаючи на те, що існує багато підходів до сегментації медичних зображень за межами використання порогових методів, вони представляють великий інтерес для досліджень, що призводить до нових результатів. Прикладом цього є метод, запропонований Нуо [12], де аналізується вибір порогового класу Оцу на сегментації пухлини головного мозку на зображенні МРТ.

І хоча на сьогодні використання порогових методів для сегментації медичних зображень не єдиний підхід, їх застосування є актуальним, тому, що такі методи дають хороші результати.

Мета роботи. Метою роботи є програмна реалізація методів цифрової обробки зображень, зокрема сегментації медичних знімків, з використанням переваг мови програмування Python для аналізу та інтерпретації медичних зображень.

Викладення основного матеріалу. У цифровій обробці зображень розрізняють два основних підходи до сегментації зображень: порогове значення та модифікований алгоритм нечіткого С-середнього (FCM). Порогове значення надає швидку та просту сегментацію, але обмежується лише інтенсивністю пікселів. Натомість, MFCM дозволяє враховувати текстурні ознаки та геометричні характеристики, що поліпшує точність сегментації.

Розглянемо модифікований алгоритм FCM [13], який включає локальну просторову інформацію та інформацію про інтенсивність на основі адаптивного локального віконного фільтра, вагові коефіцієнти якого диференціюють сусідні пікселі в межах локального вікна. Потім виконується швидка кластеризація гістограми інтенсивності відфільтрованого зображення.

Алгоритм модифікованого алгоритму FCM складається з наступних етапів.

1. Завантаження зображення.
2. Перевірка вхідних параметрів, таких як розмір зображення, кількість кластерів, параметр нечіткості (m), розмір ядра тощо. Підготовка зображення для подальшої обробки.
3. Врахування просторових зв'язків за рахунок створення вікна просторової відстані для кожного пікселя, що враховує відстань від центрального пікселя до інших пікселів у вікні.

Використання цього вікна для обчислення коефіцієнтів ваги, залежно від просторової відстані між пікселями.

4. Обробка шуму: визначення надійних пікселів, що належать до області відсутності шуму, на основі медіани та стандартного відхилення вікна. Використання цієї інформації для підсилення ваги сусідніх пікселів у вікні.

5. Ініціалізація початкових значень центроїдів кластерів та матриці приналежності.

6. Виконання ітераційного процесу навчання, де на кожній ітерації оновлюються центроїди кластерів та матриця приналежності. У кожній ітерації обчислюється, чи досягнуто потрібної точності або максимальної кількості ітерацій.

7. Визначення кластера, до якого найбільше належить кожен піксель.

8. Сегментація зображення, як віднесення кожного пікселя зображення до відповідного кластера, щоб отримати сегментоване зображення.

9. Виведення оригінального та сегментованого зображень для порівняння. Відображення кольорового коду кластерів для кращого розуміння результатів сегментації.

Модифікований алгоритм FCM (MFSCM) є розширеною версією звичайного FCM, яка додає додаткові функціональності для обробки шуму та врахування просторової інформації. Це дає кращу точність сегментації, особливо при роботі з медичними зображеннями, але може збільшити час обчислень.

На рисунку 1 представлено результати сегментації МРТ зображень модифікованим алгоритмом MFSCM, коли кількість сегментів – 5, максимальна кількість ітерацій – 100, параметр нечіткості – 2, точність – $1e^{-6}$.

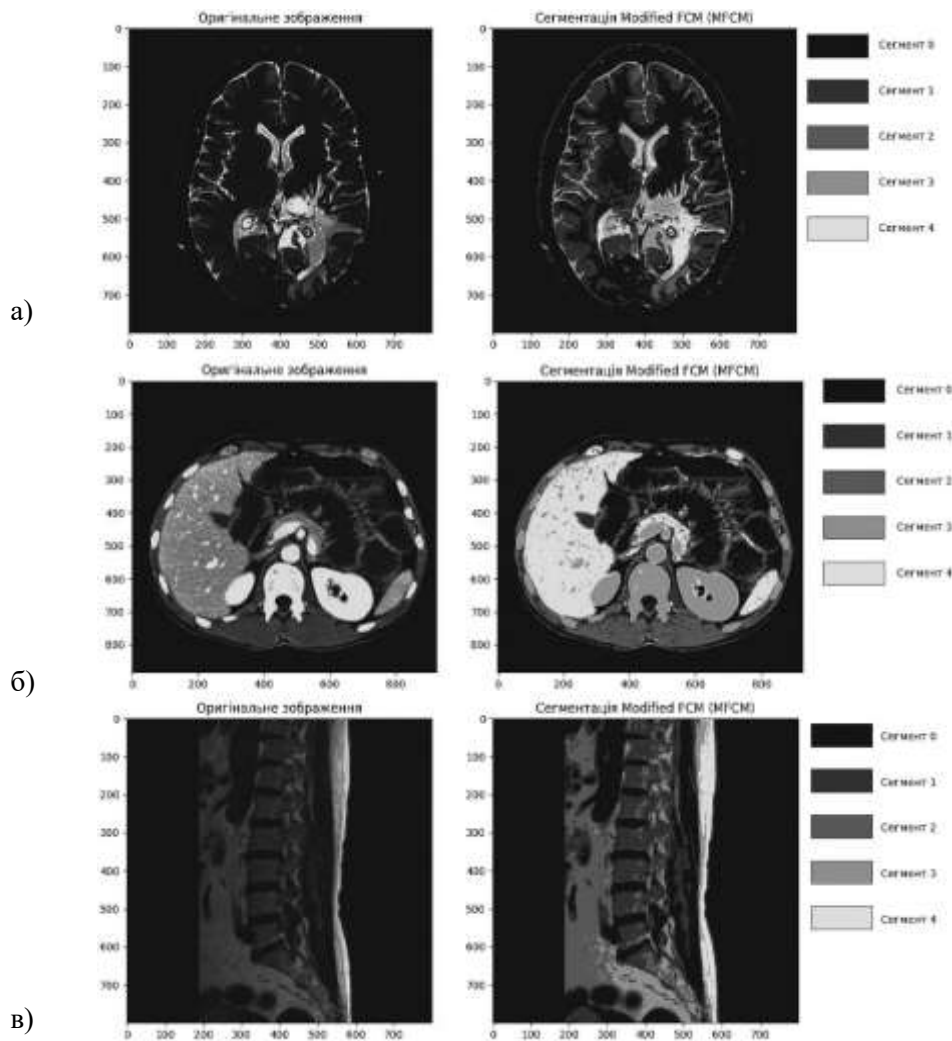


Рисунок 1 – Результати сегментації МРТ зображень алгоритмом MFSCM:

а) півкулі головного мозку; б) печінка; в) хребет

Як видно з представлених зображень, програмна реалізація модифікованого алгоритму добре справилась з сегментацією зображень різного типу.

Модифікований алгоритм MFCSM дозволяє точніше визначати класи для кожного пікселя, надаючи можливість враховувати не тільки інтенсивність пікселів, але й їх контекст у вигляді текстурних ознак чи геометричних характеристик, що забезпечує точнішу сегментацію, особливо в складних випадках, коли об'єкти перекриваються або мають неоднорідну структуру.

Модифікований FCSM може використовувати додаткові методи або фільтри для підвищення стійкості до шуму на медичних зображеннях, це допомагає уникнути неточностей в сегментації, особливо в умовах низької якості або великого рівня шуму.

Проблемою застосування алгоритму MFCSM може бути те, що при обробці великих обсягів даних або використання додаткових методів та фільтрів для покращення сегментації може збільшити обчислювальну складність алгоритму (рис. 2).

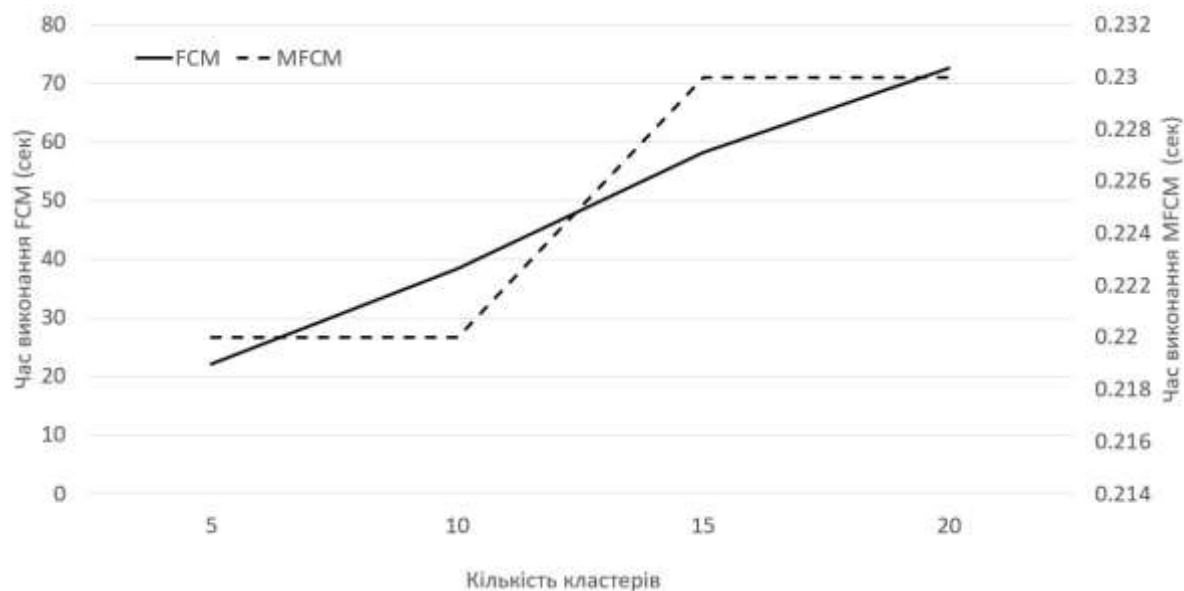


Рисунок 2 – Залежність часу виконання 100 ітерацій для програмної реалізації FCSM та MFCSM при зміні кластерів від 5 до 20 з кроком 5

З рисунка 2 видно, що при використанні модифікованого алгоритму MFCSM час виконання сегментації медичних зображень значно менший порівняно з класичним FCSM. Наприклад, при 5 кластерах час виконання FCSM становить 22,17 секунди, тоді як для MFCSM цей час складає всього 0,22 секунди, тобто, більш ніж в 100 разів менший.

Також можна побачити, що при збільшенні кількості кластерів різниця у часі виконання між FCSM і MFCSM стає ще виразнішою. Наприклад, при 20 кластерах час виконання FCSM складає 72,55 секунди, тоді як для MFCSM лише 0,23 секунди.

Таким чином, використання модифікованого алгоритму MFCSM дозволяє значно скоротити час обчислень для сегментації медичних зображень порівняно з класичним FCSM, що важливо для практичних застосувань в області обробки медичних зображень.

Висновок. Перевагою MFCSM є можливість призначення кожному пікселю декількох класів, адаптабельність до різної структури зображень та автоматизація процесу сегментації. Але, незважаючи на переваги, використання додаткових методів та фільтрів у MFCSM підвищує обчислювальну складність, що може бути проблемою для обробки великих обсягів даних.

Таким чином, MFCSM є потужним інструментом для сегментації медичних зображень, який забезпечує точні результати та можливість роботи з різними типами даних, хоча потребує уваги до обчислювальної складності.

Інформаційні джерела

1. Shapiro L. G., Stockman G. C. Computer Vision. URL: https://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/artificial_intelligence/Computer%20Vision%20-%20Linda%20Shapiro.pdf (дата звернення 06.05.2024).
2. Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4310076> (дата звернення 06.05.2024).
3. Lee S. U., Chung S. Y., Park R. H. A comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0734189X9090053X> (дата звернення 06.05.2024).

4. Kittler J., Illingworth J. Minimum error thresholding. URL: https://www.academia.edu/78663021/Minimum_error_thresholding (дата звернення 06.05.2024).
5. Rogowska Ja. Overview and Fundamentals of Medical Image Segmentation. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123739049500131?via%3Dihub> (дата звернення 06.05.2024).
6. Johnson L. A., Pearlman J. D., Miller C. A., Young T. I., Thulborn R. MR quantification of cerebral ventricular volume using a semiautomated algorithm. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8279334/> (дата звернення 06.05.2024).
7. Bind Ch. H., Prasad K. S. An Efficient Medical Image Segmentation Using Conventional OTSU Method. URL: https://www.researchgate.net/publication/267723666_An_Efficient_Medical_Image_Segmentation_Using_Conventional_OTSU_Method (дата звернення 06.05.2024).
8. Li Yu., Cho S.-Ye. A method for cell image segmentation using both local and global threshold techniques. URL: <https://research-staging.nottingham.edu.cn/en/publications/a-method-for-cell-image-segmentation-using-both-local-and-global-> (дата звернення 06.05.2024).
9. Antonidoss, Kaliyamurthie K.P. Segmentation from Images Using Adaptive Threshold. URL: [https://www.idosi.org/mejsr/mejsr20\(4\)14/15.pdf](https://www.idosi.org/mejsr/mejsr20(4)14/15.pdf) (дата звернення 06.05.2024).
10. Zhang, Xi., Zhao H., Li Xi., Feng Yu., Li H. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1051200416301191> (дата звернення 06.05.2024).
11. Kalyani R., Sathy P., Sakthivel V. Multilevel Thresholding for Medical Image Segmentation Using Teaching-Learning Based Optimization Algorithm. International Journal of Intelligent Engineering and Systems. 2021, № 14 (2). pp. 11-21.
12. Nyo M., Mebarek-Oudina F., Hlaing Su Su, ad Khan N. A. Otsu's thresholding technique for MRI image brain tumor segmentation. Multimedia Tools and Applications. 2022.
13. Chen Z., Zwiggelaar R. A modified fuzzy c-means algorithm for breast tissue density segmentation in mammograms. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5687751> (дата звернення 06.05.2024).

Misko V., Gumeniuk L.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AUTOMATION OF SEGMENTATION OF MEDICAL IMAGES

The work is devoted to the software implementation of digital image processing methods, in particular, segmentation of medical images, using the advantages of the Python programming language. The work implements filtering and noise reduction algorithms, such as the fuzzy adaptive median filter, as well as segmentation using clustering methods and algorithms, such as the Otsu method and the Gabor filter for texture detection. Modifications of fuzzy C-means algorithms to improve medical data segmentation are also considered. The development of medical image segmentation scripts will automate the process of data processing and analysis in the medical field. This will help improve diagnostic accuracy, provide faster access to medical image processing results, and open up new opportunities for research and treatment planning.

Keywords: automation, digital image processing, Python, fuzzy adaptive median filter, clustering, noise suppression, texture analysis.

УДК 681.3(07)

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-15

Назаренко О. А., Банзак О. В., Грабовський О. В., Банзак Г. В.

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку, м. Одеса, Україна

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Складні технічні об'єкти військової техніки у суспільстві мають виключно важливе значення. Йдеться насамперед про різні радіоелектронні комплекси військового та спеціального призначення, радіолокаційні станції, автоматизовані системи управління (повітряним рухом, об'єктами енергетики тощо). Від рівня безвідмовності таких об'єктів залежить обороноздатність держави, економічна безпека, життя сотень та тисяч людей.

Такі об'єкти належать до класу об'єктів, що відновлюються тривалого багаторазового застосування. Вони, як правило, є дорогими та потребують значних витрат на їх експлуатацію. Для забезпечення необхідного рівня безвідмовності в процесі їх експлуатації зазвичай проводиться технічне обслуговування (ТО), суть якого полягає у своєчасній запобіжній заміні елементів, що знаходяться в стані перед відмовою. У цієї праці розроблено імітаційну статичну модель (ІСМ), призначену для прогнозування показників надійності та вартості експлуатації складного технічного об'єкта військової техніки, що залежать від параметрів обраної стратегії ТО. В ІСМ реалізовано алгоритми імітації процесів ТО для трьох варіантів стратегій ТО. Режим моделювання регламентованого ТО запроваджено з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО об'єкта, що проектується та прогнозування можливого виграшу у надійності та вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування стратегій технічного обслуговування «по стану» (ТОС).

Ключові слова: складні технічні об'єкти військової техніки, імітаційна статична модель, технічне обслуговування, режим моделювання.

Постановка проблеми. Характерною особливістю складних технічних об'єктів спеціального призначення є наявність у їхньому складі великої кількості (десятки, сотні тисяч) різнотипних комплектуючих елементів, що мають різний рівень надійності, різні закономірності процесів їхнього зносу та старіння. Ця особливість вимагає більш тонкого підходу до організації та планування ТО у процесі їх експлуатації.

Проблема полягає в тому, що при розробці таких об'єктів усі питання, пов'язані з ремонтпридатністю та технічним обслуговуванням, повинні вирішуватися вже на ранніх етапах проектування об'єкта. Якщо не передбачити заздалегідь необхідні апаратні та програмні засоби вбудованого контролю технічного стану (ТС) об'єкта, не розробити і не вбудувати в об'єкт технологію проведення ТО, то реалізувати в майбутньому можливий виграш у безвідмовності об'єкта за рахунок проведення ТО не вдасться.

Оскільки всі ці питання повинні вирішуватися на етапі створення об'єкта (коли об'єкта ще немає), необхідні математичні моделі процесу ТО, за допомогою яких можна було б прорахувати можливий виграш у рівні безвідмовності об'єкта за рахунок проведення ТО, оцінити необхідні вартісні витрати. Потім на підставі таких розрахунків прийняти рішення про необхідність проведення ТО для цього типу об'єктів і, якщо таке рішення прийнято, розробити структуру системи ТО, вибрати найбільш прийнятну стратегію ТО, визначити її оптимальні параметри.

Мета роботи. Метою дослідження у цій роботі є наукове обґрунтування методик визначення оптимальних параметрів стратегії ТО “за станом” складних технічних об'єктів на етапі їх розробки.

Викладення основного матеріалу. Розроблена ІСМ призначена для отримання оцінок показників надійності та вартості експлуатації об'єкта з урахуванням його складу, структури та надійних характеристик та з урахуванням проведення ТО. У моделі має відтворюватися (імітуватися) процес технічної експлуатації, який формально описується графом станів та переходів.

Для верифікації моделі скористаємося стандартним прийомом, суть якого полягає у наступному. Здійснюється моделювання для умов, за яких можна розрахувати точне значення вихідних показників моделі. Потім шляхом порівняння одержаних результатів моделювання з точними розрахунковими показниками оцінюється правильність реалізації алгоритмів моделювання.

Будемо використовувати відоме теоретичне положення, що полягає в тому, що значення параметра потоку відмов елемента, що відновлюється, що встановилося, дорівнює середньому напрацюванню до відмови цього елемента [1-5]:

$$\omega^{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 1/T_{cp},$$

де $\omega(t)$ - функція параметра потоку відмов;

$\omega^{уст}$ - значення параметра потоку відмов, що встановилося;

T_{cp} - середнє напрацювання повністю відновлюваного елемента.

З огляду на це для відновлюваного елемента має виконуватися така умова:

$$\omega^{уст} = 1/T_{cp}. \quad (1)$$

Для верифікації моделі створимо БД об'єкта, що складається з єдиного елемента (назвемо цей об'єкт Test-0).

Для елемента цього об'єкта БД введемо такі значення параметрів: $\mu=10000$ год; $\nu=1$.

У ICM обчислюється оцінка функції параметра потоку відмов в такий спосіб. Заданий інтервал експлуатації $[0, T_3]$ розбивається на m однакових інтервалів часу (напрацювання)

$$\Delta t = \Delta t_i = (t_i - t_{i-1}), \text{ де } t_i = i \cdot \Delta t \text{ (} i = \overline{1, m}\text{)}.$$

У процесі моделювання накопичується статистика визначення величини \tilde{n}_i середнього числа відмов, які у інтервалі Δt_i .

За отриманими статистичними даними обчислюється оцінка параметра потоку відмов згідно з виразом [6, 7]:

$$\tilde{\omega}(t_i) = \tilde{n}_i / \Delta t_i. \quad (2)$$

На рисунку 1 наведено графік функції $\tilde{\omega}(t_i)$ для об'єкта Test-0, отриманий для випадку $T_3 = 20$ років та $\Delta t = 3$ міс.

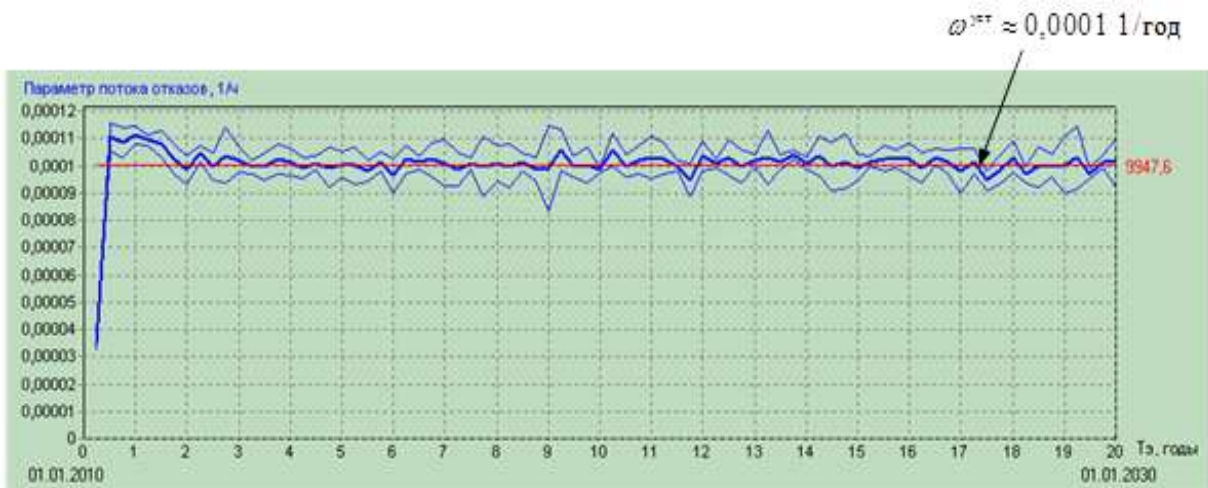
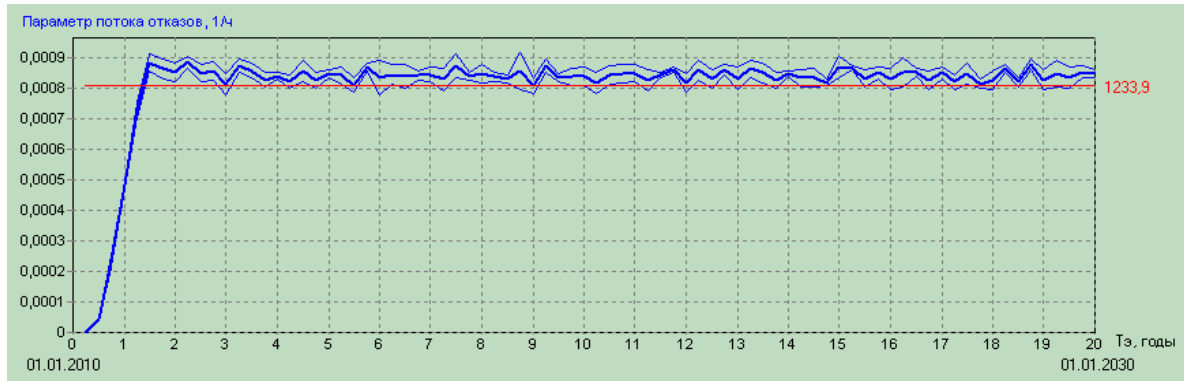


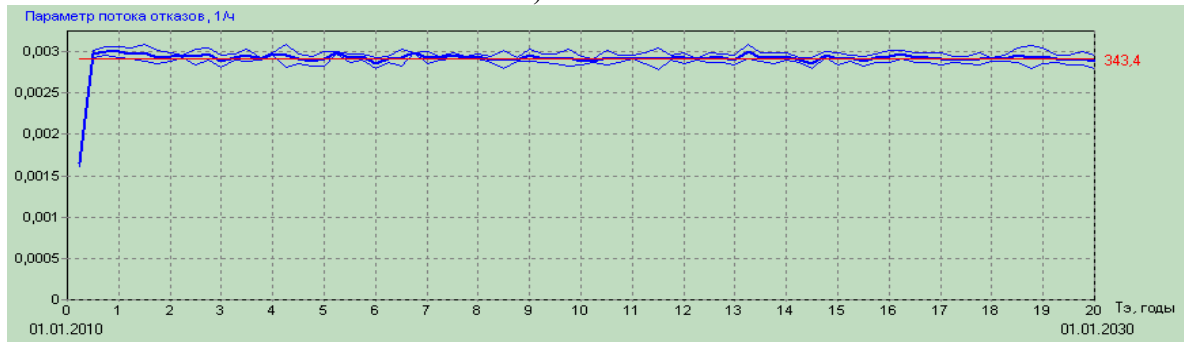
Рисунок 1 – Графік функції для об'єкта Test-0

За графіком добре видно, що значення параметра потоку відмов $\omega^{уст} \approx 1/T_{cp} = 0,0001$ 1/год. Це може бути доказом правильності алгоритмів ICM та її програмної реалізації у частині, що стосується моделювання процесу відмов-відновлень.

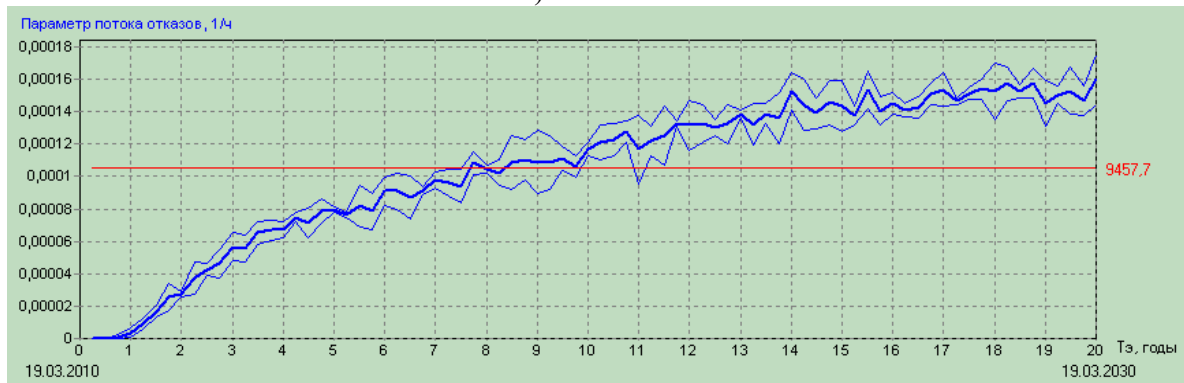
На рисунку 2 наведено аналогічні графіки, одержані для тестових об'єктів Test-1 ... Test-4.



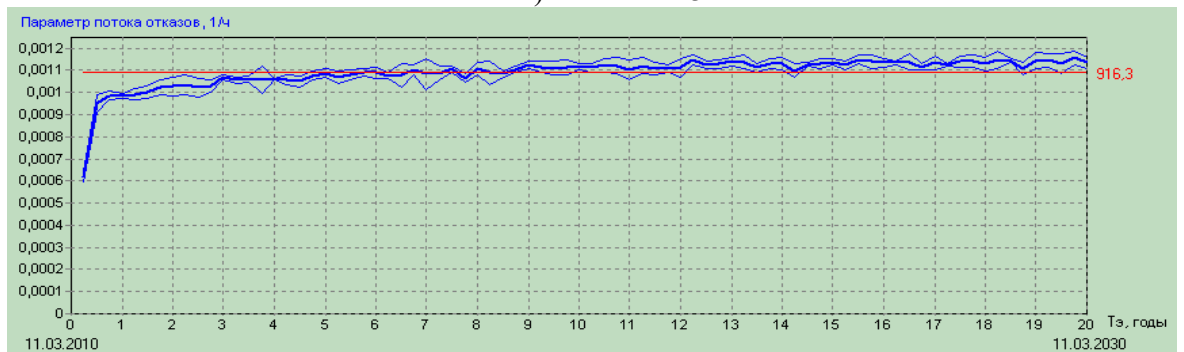
а) об'єкт Test-1



б) об'єкт Test-2



в) об'єкт Test-3



г) об'єкт Test-4

Рисунок 2 – Графіки функції $\tilde{\omega}(t_i)$ об'єктів Test-1 ... Test-4

Оскільки при відмові цих об'єктів проводиться заміна тільки елементів, що відмовилися, встановилося значення $\omega^{уст}$ в цьому випадку значно менше величини $1/T_{cp}$ (тут T_{cp} - це середнє напрацювання до відмови об'єкта). Ці графіки є прямим доказом правильності алгоритмів моделі, проте є додатковим якісним підтвердженням адекватності ІСМ.

У таблиці 1 наведено числові значення показників T_0 , $c_{уд}$ і $K_{ти}$, отримані в результаті моделювання, а також деякі важливі характеристики об'єктів (середнє напрацювання до відмови T_{cp} та кількість елементів, що відновлюються $|E_B|$).

Таблиця 1 – Результати моделювання для тестових об'єктів без ТО

Об'єкт	Характеристики об'єкту		Результати моделювання			
	$ E_v $	T_{cp} , год	T_0 , год	$c_{уд}$, у.о./год	$K_{ти}$	ε
Test-1	15	4472	1179	0,02695	0,99919	0,085
Test-2	16	745	341	0,05638	0,99660	0,071
Test-3	50	29930	9390	0,00232	0,99978	0,367
Test-4	50	1783	914	0,02296	0,99890	0,108
Test-0	1	10000	9967	0,00211	0,99990	0,357

Усі графіки на рисунку 2 та дані таблиці 1 отримані за наступних вихідних даних (однакових для всіх об'єктів):

- показники ремонтпридатності та вартості елементів:

$$T_{vi} = 1 \text{ год}; C_i = 10 \text{ у.о.}; C_{три} = 1 \text{ у.о.};$$

- параметри зовнішнього середовища (параметри користувача):

$$c_n^0 = 10 \text{ у.о./год}; T_3 = 20 \text{ років};$$

- параметри моделювання:

$$N_i^{\max} = 1000.$$

За даними інструментальну точність моделі можна оцінити тільки за результатами, отриманими для об'єкта Test-0. Отримана точність дорівнює:

$$\delta = \frac{|T_{cp} - T_0|}{T_0} = \frac{10000 - 9967}{9967} \approx 0,0033.$$

Така мала інструментальна помилка свідчить про правильність програмної реалізації основного алгоритму ІСМ.

Методична помилка результатів ІСМ істотно залежить від наступних факторів:

- від вихідної надійності об'єкта;
- від числа реалізацій моделювання;
- від заданої тривалості експлуатації об'єкта T_3 .

Найбільш значущим фактором серед зазначених є вихідний рівень надійності об'єкта. Так, об'єкт Test-3 є прикладом об'єкта з високим рівнем надійності, йому відносна помилка результатів моделювання $\varepsilon=0,367$.

У більшості цікавих випадків відносна помилка результатів моделювання вбирається у 10-20%.

Для перевірки всіх алгоритмів моделювання ТО зробимо розрахунки для трьох стратегій ТО, що розглядаються: ТОС з постійною періодичністю контролю, ТОС з адаптивною зміною періодичності ТО і регламентованої стратегії ТО.

Для ТГС з постійною періодичністю контролю зробимо моделювання для трьох значень T_k : 500 год, 1000 год і 1500 год. Отримані результати моделювання представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання для ТОС із постійною періодичністю контролю

Результуючі показники	Без ТО	Періодичність контролю T_k		
		500 год	1000	1500 год
T_0 , год	912	9044	3468	2222
$c_{уд}$, у.о./год	0,02303	0,00599	0,00839	0,01119
$K_{ти}$	0,99890	0,99723	0,99787	0,99813
$\bar{\varepsilon}$	0,110	0,415	0,280	0,220
$\bar{n}_{отк}$	198,5	19,1	49,8	77,7

У таблиці 2 $\bar{n}_{\text{отк}}$ - це середня кількість відмов об'єкта, що виникають протягом часу експлуатації $T_s=20$ років.

Отримані результати не суперечать фізичному змісту процесів, що моделюються. У разі зростання періодичності контролю рівень безвідмовності знижується, зростає середнє відмов. У разі зростання кількості відмов збільшується точність оцінки показників (зменшується відносна помилка \mathcal{E}).

Для ГОС з адаптивним зміною періодичності ТО параметрами стратегії ТО (крім рівня ТО $u_{\text{то}}$) є коефіцієнт згладжування β та коефіцієнт попередження γ . Розрахунки зробимо при фіксованому значенні $\beta=0,5$ для трьох різних значень γ . Отримані результати розрахунків представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати моделювання для ГОС з адаптивно змінюваною періодичністю ТО

Результуючі показники	Без ТО	Коефіцієнт попередження γ		
		0,5	0,8	1,0
T_0 , год	912	18013	2936	1976
$c_{\text{уд}}$, у.о./год	0,02303	0,00421	0,00938	0,01246
$K_{\text{ти}}$	0,99890	0,99744	0,99779	0,99794
$\bar{\mathcal{E}}$	0,110	0,549	0,187	0,155
$\bar{n}_{\text{отк}}$	198,5	9,6	58,8	87,4

За отриманими даними видно, що з меншому значенні коефіцієнта γ (за більшого попередження) показник безвідмовності T_0 зростає, що цілком відповідає фізичному змісту процесів.

Для тестування алгоритмів стратегії регламентованого ТО поставимо два види ТО з такими значеннями періодичності: $T_{\text{то1}}=600$ год; $T_{\text{то2}}=6000$ год. Розрахунки зробимо для трьох варіантів множин елементів, що обслуговуються:

- $E_{\text{то1}} = \{1, 2, 3\}$; $E_{\text{то2}} = \{4, \dots, 10\}$;
- $E_{\text{то1}} = \{1, 2\}$; $E_{\text{то2}} = \{3, \dots, 10\}$;
- $E_{\text{то1}} = \{1\}$; $E_{\text{то2}} = \{2, \dots, 10\}$.

Результати розрахунків представлені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання для стратегії регламентованого ТО

Результуючі показники	Без ТО	Число елементів в підмножинах елементів, що обслуговуються		
		$ E_{\text{то1}} = 3,$ $ E_{\text{то2}} = 7.$	$ E_{\text{то1}} = 2,$ $ E_{\text{то2}} = 8.$	$ E_{\text{то1}} = 1,$ $ E_{\text{то2}} = 9.$
T_0 , ч	912	5290	3095	1682
$c_{\text{уд}}$, у.е./ч	0,02303	0,01191	0,01322	0,01743
$K_{\text{ти}}$	0,99890	0,99278	0,99414	0,99537
$\bar{\mathcal{E}}$	0,110	0,321	0,230	0,161
$\bar{n}_{\text{отк}}$	198,5	32,7	55,8	102,7

Отримані результати так само відповідають фізичному змісту процесів, що моделюються. Перерозподіл елементів з виду ТО, що часто проводиться, у вигляд ТО, що проводиться з більшою періодичністю, призводить до погіршення показника безвідмовності.

Загалом можна констатувати, що отримані у наведених прикладах результати не суперечать фізичному змісту, що можна сприйняти як якісне підтвердження правильності алгоритмів моделювання ТО.

Висновки. 1. У цій праці розроблено ІСМ, призначену для прогнозування показників надійності та вартості експлуатації складного технічного об'єкта, що залежать від параметрів обраної стратегії ТО. В ІСМ реалізовано алгоритми імітації процесів ТО для трьох варіантів стратегій ТО:

- ТОС з постійною періодичністю контролю;
- ТОС з адаптивно-змінною періодичністю контролю;
- регламентованого ТО.

Режим моделювання регламентованого ТО запроваджено з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО проєктованого об'єкта та прогнозування можливого виграшу у надійності та вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування стратегій ТОС.

2. В алгоритми ІСМ «вбудована» МБ складного технічного об'єкта, за рахунок чого в моделі реалізована залежність процесу, що моделюється ТО від параметрів конструктивної та надійності структури об'єкта. Перед початком моделювання користувач повинен задати підмножину елементів, що відновлюються і потенційно обслуговуються шляхом їх вибору (маркування) в дереві конструктивної структури об'єкта. Генерування випадкових значень напрацювання повністю окремих елементів, підпорядкованих *DN*-розподілу, здійснюється за допомогою датчика випадкових чисел, що розроблюється в [8-11].

3. Верифікація ІСМ здійснювалася в такий спосіб. Правильність алгоритмів імітації процесу відмов-відновлень перевірялася шляхом порівняння результатів моделювання з точними розрахунковими значеннями середнього напрацювання на відмову, отриманими окремо взятого елемента. Отримана у такий спосіб інструментальна точність моделі, що оцінюється величиною відносної помилки, становила менше 1%. Правильність алгоритмів імітації процесів ТО перевірялася якісно (через несуперечність результатів, що одержуються під час моделювання).

Методична точність ІСМ визначається такими факторами:

- вихідною надійністю об'єкта (заданими показниками надійності елементів);
- числом реалізацій (тривалістю) моделювання;
- заданою тривалістю експлуатації об'єкта.

Із зазначених факторів найбільш суттєвим є перший. У більшості цікавих випадків відносна помилка результатів моделювання складає 10-20%.

Інформаційні джерела

1. Serhii Lienkov, Yuriy Husak, Oksana Banzak, Ihor Muliar, Viktor Cheshun, Evgeny Lenkov The Development of an Intelligent Complex of Radiation-Technological Control of a Safety Barrier // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research Available Online at Volume 8. No. 7, July 2020. P. 3483-3486.

2. Nataliya Lytvynenko, Serhii Lienkov, Olexander Lytvynenko, Oksana Banzak, Hennadii Banzak Development of Geoinformation Technology for Monitoring Events on the Basis of Data from Unstructured Web Resource Text. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-9 Issue-5, March 2020. P. 1160-1165.

3. Serhii Lienkov, Alexander Myasishev, Yurii Husak, Ivan Starynski, Oksana Banzak Use of rescue mode for UAV on the basis of STM32 microcontrollers. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering Available Online at Volume 9, No. 3, May-june 2020. P. 3506-3513.

4. Serhii Lienkov, Alexander Myasishev, Oksana Banzak, Larysa Komarova, Nataliia Lytvynenko, Oleg Miroschnichenko Construction of an Aircraft-Type UAV for Flight Along a Given Trajectory in the Automatic Mode. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research Available Online at <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter200892020.pdf> Volume 8. No. 9, September 2020 P. 6145-6150.

5. Banzak O., Maslov O., Mokritsky V., Leschenko O. Detector simulation for radiation monitoring systems. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2020. № 68. С. 5-14.

6. Banzak O., Sieliykov O., Olenev M., Dobrovolskaya S., Konovalenko O. Research processes of gamma radiation detector for developing a portable digital spectrometer. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2020. № 69. С. 5-13.

7. Banzak O., Sieliykov O., Dobrovolskaya S., Konovalenko O. Model of physical processes in primary and secondary converters of the detector. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2021. № 70. С. 5-16.

8. Banzak O., Sieliykov O., Yefimenko N., Konovalenko O. Development of a complex for individual dosimetric control. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2021. № 71. С. 5-11.

9. Banzak O., Sieliykov O., Gaber A., Konovalenko O., Vozikova L. Research of physical processes and development of methods for radiation modification parameters of semiconductor optoelectronics devices. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2022. № 74. С. 5-14.

10. Lienkov S., Banzak O., Sieliykov O., Zhrebtsova L. Model of physical processes in the primary and secondary converters of the detector for radiation monitoring systems. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2023. № 81. С. 16-26.

11. Banzak O., Lienkov S., Sieliykov O., Gaber A. Methods and means of control of nuclear materials and status of protective barriers at npp in wartime conditions. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2024. № 83. С. 7-17.

Nazarenko A., Banzak O., Grabovsky O., Banzak G.

State University of Intellectual Technologies and Communications, Odessa, Ukraine

DEVELOPMENT OF SIMULATION STATISTICAL MODEL OF MILITARY EQUIPMENT MAINTENANCE PROCESSES

Complex technical objects of military equipment in society are of exceptional importance. These include, first of all, various radio-electronic complexes of military and special purpose, radar stations, automated control systems (of air traffic, energy facilities, etc.). The state's defense capability, economic security, and the lives of hundreds and thousands of people depend on the level of reliability of such objects.

Such objects belong to the class of objects that are subject to long-term repeated use. They are usually expensive and require significant costs for their operation. To ensure the required level of reliability during their operation, maintenance (MTO) is usually performed, the essence of which is the timely preventive replacement of elements that are in a state before failure. In this work, a simulation static model has been developed, designed to predict the reliability indicators and operating costs of a complex technical object of military equipment, which depend on the parameters of the selected MTO strategy. MTO has implemented algorithms for simulating MTO processes for three variants of MTO strategies. The regulated MTO modeling mode was introduced to ensure the completeness of the analysis of possible MTO strategies for the designed object and to predict the possible gain in reliability and operating costs of the object due to the use of "condition-based" maintenance strategies.

Keywords: *complex technical objects of military equipment, simulation static model, maintenance, modeling mode*

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-16

Осінов С. М.

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

ЕФЕКТ БІОЛОГІЧНОГО ЗВОРТНОГО ЗВ'ЯЗКУ У БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

У статті розглядається проблемні питання при синтезі технічної системи з присутністю об'єкту біологічного походження з використанням класичної теорії управління. Біологічний зворотний зв'язок відіграє ключову роль у зберіганні відносної динамічної стійкості параметрів і функцій. Для отримання прогнатованих властивостей системи та оцінки кількісних змін, що відбулись в системі підчас отримання якісних зрушень властивостей у біологічному об'єкті, розглянуто умови вирішення завдання зворотного синтезу сенсорної частини біотехнічної системи. Метою є формалізація причинно-наслідкових зв'язків для отримання альтернативи суб'єктивізму експертної оцінки. Відтворення поведінки системи керування розглянуто з позиції методу моделювання на основі електробіоаналогій як фактору впливу на архітектуру та функціональні принципи нейроморфних твердотільних сенсорів.

Ключові слова: біотехнічні системи, інтелектуальні системи керування, твердотільні компоненти, нейронні мережи, інтелектуальна система керування.

Постановка проблеми. Керування біотехнічною системою передбачає наявність певної стратегії яка вибудовується на основі знань про поведінку біологічного об'єкту. Це може бути база знань з прецедентів у вигляді діаграми станів або іншому вигляді але обов'язково з урахуванням станів які неприпустимі. Тобто, мають бути враховані обмеження і відповідно наведено обґрунтування дійсних обмежень, а для самої системи повинна має бути встановлено ступень прогнозованості стану біологічного об'єкта. Важливе місце в цьому процесі займає визначення ресурсних можливостей з точки зору досягнення максимального ефекту від утримання біологічного об'єкта, зокрема його продуктивність.

Подібно завдання відоме з позиції організації структури технічної складової біотехнічної системи. Розвиток технічних систем, як буде показано нижче, має рекурсивний характер але на рівні біологічної структури все виглядає не зовсім однозначно. Біологічний об'єкт на шляху свого існування переживає різні стадії розвитку, це по –перше, а по-друге, біологічні об'єкти потрібно розглядати суворо диференційно, при цьому рівень розбіжностей від класу біологічного об'єкту в процесі до його видів зростає. Окрім мікроклімату який утворюється технічною частиною системи за технологічними параметрами навколишнє середовище формується навколо симбіозу біологічного об'єкту в процесі життєдіяльності. Багатокомпонентність біотехнічної системи породжує багатоваріантність інженерно-проектних рішень, серед яких, звичайно, шукають оптимальне. Наявні розбіжності між фізичною сутністю і фізикою біологічного об'єкта можливо пояснювати засобами моделювання, зокрема з використанням електробіоаналогій, але зв'язки в подібній моделі потрібно з'ясувати. Сучасні підходи до моделювання базуються багато в чому на основі емпіричного досвіду, метод проб та помилок це збитковий шлях по відношенню до отримання продуктивності та призводить до констатації результатів попередньо обраного рішення. Модель біотехнічної системи є залежною від людини яка обмежена власним досвідом знань як технічних, так і біологічних, має відбутись певна конвергенція знань для набуття статусу експерта. Технічна частина системи переважно дискретна за характером, біологічна система має поступовий, неперервний та послідовний розвиток і якщо відсутній зворотний зв'язок між технічною та біологічною складовими системи відсутнє розуміння того що відбувається в системі. По відношенню до біологічного об'єкту завжди існує певна невизначеність, тому невідомо який результат по завершенню буде отримано, що є наслідком самоорганізаційних явищ які відбуваються з використанням внутрішнього зворотного зв'язку самому біологічному об'єкті. Згідно до класичної теорії управління серед технічних складових присутній блок прийняття рішення за допомогою якого вибудовують зворотний зв'язок с біологічним об'єктом але залежність від суб'єктивного фактору зберігається. Біологічний об'єкт залишається «чорною скринею» і судження виключно за зовнішніми ознаками ніщо інше як результат дій, що відбулись у минулому. Дійсною регуляційною моделлю є модель для якої

шукане управління визначають як функцію змінних, що описують внутрішній стан біологічного об'єкта. У зв'язку з цим моделювання та контроль динамічних процесів для вирішення завдання оцінювання стану біологічного об'єкта є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання станів біологічного об'єкту є одними з швидкозростаючих напрямків і є фактором впливу на розвиток теорії управління. Методи в яких почали використовувати біологічний зворотній зв'язок з живими системами на основі зміни різних параметрів системно почали розроблятися приблизно з середини 20-го століття. Метод швидко знайшов застосування у медицині, а метою метода було вплив на соматичний стан організму людини. Основою методу стало використання негативного зворотного зв'язку та стимуляція саморегулювання процесів життєдіяльності по окремих параметрах. Для зв'язаних параметрів які перебувають у активній взаємодії питання отримання інформативної складової параметричних сигналів залишається проблемною частиною. Для біологічних об'єктів з відсутністю вищої нервової системи, зокрема рослин, застосування методу має власні особливості. Набуває розвитку метод фітомоніторингу, параметри отримані при спостереженні використовують як технологічні в системі управління для реалізації динамічної моделі керуванням і розглядаються за участю експертів. Априорі зрозуміло, що біологічний об'єкт на шляху свого еволюційного розвитку отримує зміни його станів які бажано вимірювати зовнішніми засобами та отримувати кількісну характеристику. Враховувати та віднести вимірну характеристику до класу технологічних параметрів системи управління і таким чином впливати технічними засобами в межах автоколивальної підтримки рівня технологічного параметра є завданням теоретичним. Проблемним при цьому є встановлення математичного опису для моделі блока прийняття рішення який має конкретні проектно-конструкторські рішення для обраного конкретного біологічного об'єкту. Тобто, у загальному підході до автоматичного керування процесами утримання біологічних об'єктів сільськогосподарського призначення постійно спостерігається зрушення парадигми щодо блоку прийняття рішення у системі управління. Аналіз технічних рішень наведених у [1-8] підтверджують цю тенденцію. Загальним недоліком згаданих технічних рішень слід вважати те, що присутнє системне запізнення в часі отримання даних про стан біологічного об'єкту для системи управління. Невизначеність стану призводить в свою чергу до потреби у наявності експертного знання та досвіду у обробці сигналів. Система управління оперує параметрами технологічного середовища. Інформація стосовно змінних власно біологічного об'єкта обмежена, але очікувати реакції з боку біологічного об'єкта на зміну технологічного параметру потрібно. Деяке пришвидшення надає використання методів моделювання спрямованих на прогнозування, наприклад, це може бути модель прогнозування майбутніх температурних збурень [2] або інша. Застосування такого підходу не виключає участі у процесі керування системою технолога, який може вводити корективи та вносити суб'єктивне уявлення про вплив технологічних параметрів на продуктивність при утриманні біологічного об'єкта у складі системи. Так, на практиці, технологи використовують замість стратегії заснованої на основі аналізу прогностичних моделей стратегію керування заснованою на автоколивальних процесах зміни параметрів технологічного процесу, що може бути виправдано у довгостроковій перспективі експлуатації біологічного об'єкта у складі системи, хоча в дійсності, процес параметричного переключення станів біологічного об'єкта відбувається за біфуркаційними правилами. Висновки стосовно стану власно біологічного об'єкта в цьому випадку робляться інтуїтивно на основі власного досвіду. В умовах промислового використання це ні є перспективним. Використання робототехнічної підсистеми [8] це здоровий, але скоріше півкрок до забезпечення продуктивності в міру низької функціональності робототехнічної системи, але залишається можливість спостерігати тенденції у зміні параметрів і це досить доступна річ. Згаданий робототехнічного комплекс обмежено вже у початковій частині проектного рішення інформативне поле параметрів для спостереження має обмежений вигляд, підсистема виконує функцію збору даних по технологічних параметрах у 2D просторі. Блок з аналізу динаміки взаємодії з біологічним об'єктом не має бути з використанням виключно адаптації до низькочастотного автоколивального стану. В певні моменти часу у біологічному об'єкті спостерігають вмикання так званого «біологічного тригера» і наслідком цього є зміна динамічного стану.

Аналіз патентної ситуації доводить використання переважно фізіологічних макровеличин біологічних об'єктів в якості технологічних параметрів системи управління. Розширення кола параметрів на основі фізичних принципів та урізноманітнити функціональні можливості сенсорних електронних компонент в системах малого форм-фактору розглядається як перспективне завдання до їх застосування *in situ*.

Мета роботи. Метою даної роботи є встановлення зв'язків біологічного об'єкта, у вигляді моделі спрощеної до певної структурної одиниці, використання яких надає змогу для розгляду технологічних засад реалізації сенсорної частини біотехнічної системи з біологічним зворотним зв'язком. Актуальним завдання цього є розширення функціональних можливостей сенсорної частини на основі конденсованих станів у твердому тілі та застосування відповідних матеріалів мікро- наноелектроніки в сенсорах призначених для мультипараметричної підтримки гомеостазу біологічного об'єкту.

Виклад основного матеріалу. Встановлення загального вигляду математичної залежності на основі законів самоорганізації виглядає надто складним завданням але інтеграційна складова законів є передумовою для застосування її в дисипативних системах. Любий опис поведінки біологічної системи має бути інваріантним незалежно в яких координатах він визначається. Інваріантність судження засновано тим, що сутність процесів залишається незмінною. Проходженню різних станів біологічним об'єктом відповідає певний рівень гомеостазу і кожний рівень во взаємодії з іншими дає внесок в підтримку життєдіяльності. Чи є це простою суперпозицією? - це питання залишаємо відкритим, але потрібно визнати наявність ваги окремих процесів, внаслідок дії абіотичних факторів, здатних впливати на сталий розвиток. Недооцінка цього має негативні наслідки для продуктивності біотехнічної системи. Зміна стану біологічного об'єкта, в подальшому біологічної системи, можлива за різним сценарієм: «м'який» режим з поступовою зміною параметрів або «жорсткий» з стрибкоподібною зміною параметрів і який припускає наявність фазових переходів які супроводжують ті самі зміни і які характеризують ступенем упорядкованості. Отримання якісного результату надає можливість отримати фізичне уявлення щодо спектроскопії станів біологічної системи. У [9] для розв'язку проблем системи управління запропоновано використання сценарно-синергетичного підходом у вигляді математичної моделі з застосуванням нейромережевої технології. Визначення станів і встановлення відповідної шкали порядку біологічної системи для дослідження та визначення стійкості самої системи у вигляді цифрового двійника краще за якісний опис, але результат повинний мати біологічну інтерпретацію у термінах видимих проявів. Сучасна тенденція, як новітній напрям, отримала назву «System of Systems» (SoS) і це сукупність кількох незалежних систем як частина складнішої системи. Система розглядається як група взаємодіючих, взаємопов'язаних і взаємозалежних компонентів, які утворюють складне і єдине ціле. На рисунку 1 наведено як взаємодіють інформаційні потоки для розподіленої сенсорної системи для об'єднання своїх ресурсів, створюючи нову та більш складну систему. Окремі системи в SoS працюють разом, щоб забезпечити функціональні можливості та продуктивність, яких жодна з незалежних систем або складових систем не могла б виконати самостійно. Дані, різні за типом, на виробничій платформі збільшуються та утворюють потенціал для створення інформативної цінності. Традиційні системи керують структурованими даними, застосовуючи фіксовані моделі для аналізу та розуміння минулого та для прогнозування. Використання сенсорної платформи, що керує даними застосовуючи аналітику біологічного зворотного зв'язку на основі поглибленого знання, відповідає за покращення у прийнятті рішень. Для реалізації взаємодій потрібні нові сенсорні технології та компоненти здатні впливати на структуру нейроморфної платформи.

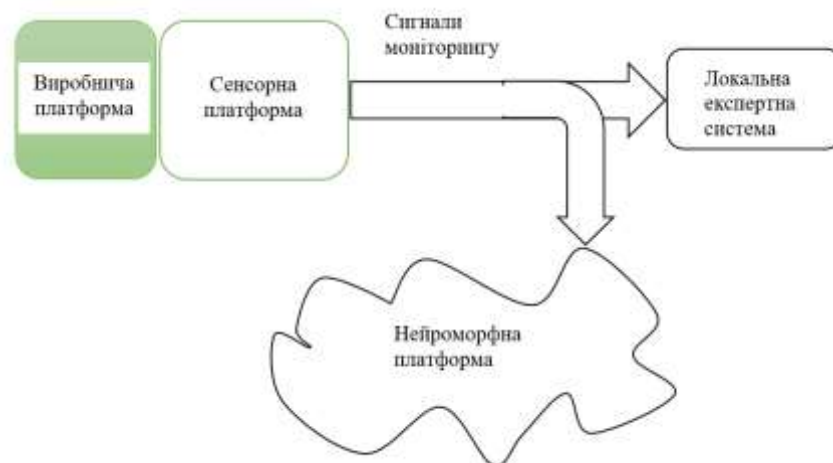
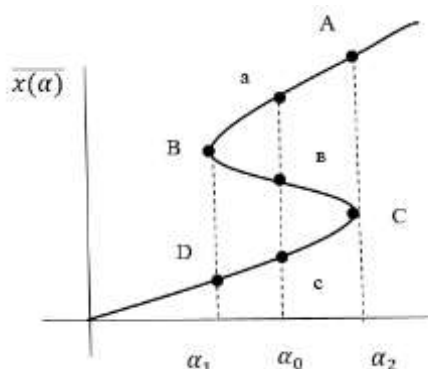


Рисунок 1 – Приклад інформаційних взаємодій системи

Таким чином, виникає завдання у проведенні ідентифікації ланок біотехнічної системи, цьому сприяє метод еквівалентних моделей, здатних замінити об'єкт, для отримання об'єктивної відповідності та оцінки варіантів еволюції біологічної системи. Зручним способом реалізації методу є застосування електричних еквівалентних схем для проведення функціональної ідентифікації і тестування за допомогою сигналів [10]. Проблемним питанням є визначення регуляційного процесу для синтезу сенсорної платформи внаслідок скритності параметрів біологічної системи і це підштовхує до пошуку нових аналогій [11]. Існують аспекти в розумінні складності цього питання, зокрема, переходи біологічної системи у різні типи розвитку який може відбуватись як нормальним так аномальним шляхом. Важливим є оптимальний час переключення: надто ранній, а так само і затягнуте переключення однаково погано тому, що ресурси будуть швидше за все використані не за призначенням. У простішому варіанті для структурної одиниці виробничої платформи застосуємо рівняння виду:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \alpha). \quad (1)$$

Функціональна залежність правої частини рівняння (1) від змінної α наведено на рисунку 2.



Рисунку 2 – Стационарні стани системи з зворотним зв'язком

З рисунку 2, зрозуміло, як система може переходити з одного стійкого стану у інший. Гілки від A до B, та від D до C відповідають стійкому режиму розвитку подій в біологічній системі. Швидкість зміни обумовлено нахилом вказаних гілок у залежності, а напрямку розвитку змін біологічної системи визначає знак її збільшення\зменшення. Параметри α_1, α_2 при досягненні яких система стрибкоподібно змінює свій стан визначають як біфуркаційні параметри. Періодичний рух вздовж переходів визначає певний цикл подій хвильового характеру. Для реалізації функціональної залежності у вигляді електричного аналога запропоновано використовувати напівпровідникову структуру з симетричною вольт-амперною характеристикою (ВАХ) S-типу. Це означає, що симетрична діодна структура є такою, що містить два однакові $p-n$ переходи, які ввімкнені послідовно та зустрічно один до одного. Для випадку $n^+ - p^+ - n^+$ структури на основі тунельного ефекту, опір електронейтральних областей у рівноважному стані значно менший за опори $p-n$ переходів і можна вважати, що вся зовнішня напруга спадає лише на $p-n$ переходах. В першому наближенні симетрична діодна структура працює аналогічно до послідовного ланцюгу зустрічно ввімкнених діодів. Але, параметри $p-n$ переходу залежать від температури та/або концентрації за складними законами, отримання температурних залежностей в аналітичному вигляді відбувається за складною процедурою. Аналіз графічно побудованої залежності від концентрації та температури для прямої та зворотної гілок ВАХ структури встановлено, що температурний коефіцієнт напруги (ТКН) прямої гілки ВАХ є від'ємним та змінюється в вузьких межах від 1,9 до 2,4 мВ, що є близьким до характеристик реальних діодів. При цьому аналіз ТКН зворотної гілки теж відповідає відомим принципам – ТКН є додатною. Характер зміни ТКН також відповідає практичним результатам, а саме, збільшується зі збільшенням температури та зменшується зі збільшенням концентрації домішок для зворотної гілки та збільшується зі збільшенням концентрації домішок для прямої гілки ВАХ. На рисунку 3 наведено ВАХ запропонованої структури з використанням тунельного ефекту, технологічні аспекти виготовлення інтегрального твердотілого приладу наведено у [12].

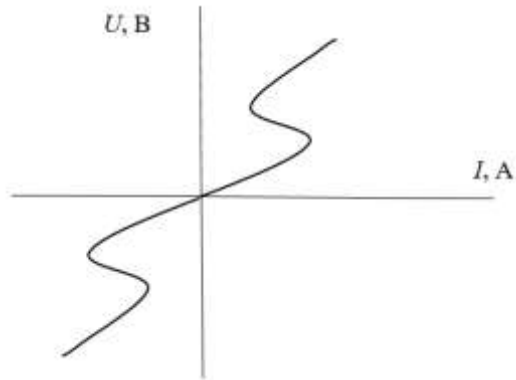


Рисунок 3 – ВАХ симетричної термокомпенсованої діодної структури

Отже, бачимо, що за формою наведена вольт-амперна характеристика є подібною до функціональної залежності станів біологічної системи за наявності біфуркаційної змінної, що дозволяє реалізувати симуляцію сенсору з адаптивним управлінням. В загальному випадку для аналізу зміни динаміки біологічної системи прилад можливо використовувати в сенсорній платформі системи як цифровий двійник-еталон, що використовує функції чутливості замкненої системи відносно локальної системи управління.

Висновки. Проаналізовано технічні рішення з проектування систем управління біотехнічними системами та визначено рекурсивний характер удосконалень системи управління. Подальша еволюція систем управління біотехнічними системами залежна від елементної бази і пов'язана її розвитком.

Визначено категорію сенсорної частини системи управління біотехнічною системою - адаптивні сенсори, ознакою яких є використання біологічного зворотного зв'язку, як нову категорію.

Встановлено виклики які мають бути забезпечені для досліджень біологічної системи у динамічному режимі, а саме: обробка реакцій в сенсорах викликаних тест-впливом за допомогою методів перетворення сигналів; розвитку у напрямку спектроскопії конденсованих станів біологічного об'єкта сільськогосподарського призначення у складі біотехнічної системи для визначення сенсорних відгуків на зовнішні енергетичні впливи.

Інформаційні джерела

1. Патент на корисну модель 76175 UA, МПК (2012.01) G05B 13/00 Система управління процесом утримання біологічних об'єктів / В. П. Лисенко, В. М. Штепа, Н. А. Заєць, І. М. Болбот, А. О. Дудник; опубл. 25.12.2012 // Бюл. № 24. 3 с. База патентів України. 3 с.
2. Патент на корисну модель 76177 UA, МПК (2012.01) G05B 13/00 Система управління процесом утримання біологічних об'єктів / В.П. Лисенко, В.М. Штепа, Б.Л. Голуб, В.Л. Щербатюк; опубл. 25.12.2012// Бюл. № 24. 4 с. База патентів України. 4 с.
3. Патент на корисну модель 85587 UA, МПК (2013.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, В. М. Решетюк, В. М. Штепа; опубл. 25.11.2013// Бюл. № 22. 3 с. База патентів України. 4с.
4. Патент на корисну модель 86252 UA, МПК (2013.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, Н. А. Заєць, В. М. Штепа, А. О. Дудник; опубл. 25.12.2013 // Бюл. № 24. 4 с. База патентів України. 4 с.
5. Патент на корисну модель 88809 UA, МПК (2015.01) G05B 13/00 Пристрій штучного клімату / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, В. М. Штепа, І. М. Болбот, Т. І. Лендел, А. О. Дудник; опубл. 10.04.2014 // Бюл. № 7. 4 с. База патентів України. 4 с.
6. Патент на корисну модель 92971 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, В.М. Штепа, Н. А. Заєць, І. М. Болбот, А. О. Дудник, Т.І. Лендел; опубл. 10.09.2014 // Бюл. № 17. 2 с. База патентів України. 5 с.
7. Патент на корисну модель 95200 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00 Система управління водоочисним та водопідготовчим обладнанням / В. М. Штепа; опубл. 10.12.2014 // Бюл. № 23. База патентів України. 4 с.
8. Патент на корисну модель 95612 UA, МПК (2015.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, В. М. Штепа, Т. І. Лендел, І. І. Чернов; опубл. 25.12.2014 // Бюл. № 24. – 4 с. – База патентів України. – 4 с.
9. Поліщук Д. В., Заєць Н. А. Система керування інформаційними потоками тепличного

комплексу на основі сценарно-синергетичного підходу. Наукові праці НУХТ: т.28, 2022. С.7-15. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-4-3.

10. Осінов С. М. Визначення електричних властивостей біологічних тканин з перших принципів. Сучасні технології біомедицини інженерії - 2023р.: Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції; Одеса, Одеська політехніка, 17-19 травня 2023р. С.105-109.

11. Осінов С. М., Єрмоменко І. В. Про відповідність процесів у біологічних тканинах та низькотемпературної напівпровідникової плазми. – Збірник матеріалів конференції «ХІ Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів «Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України»; Київ, ІПМЕ ім.Г.Є.Пухова, 17 травня 2023 р. С.175-177.

12. Патент на корисну модель 129615 UA МПК(2018.01) H01L 29\00 Напівпровідниковий прилад / О. В. Борисов, С. М. Осінов, Б. І. Луцина, Г. В. Шевлякова; опубл. 12.11.2018 // Бюл. № 21. 4 с. База патентів України. 4 с.

Osinov S.

National Technical University of Ukraine «Ihor Kyiv Polytechnic Institute Sikorskyi», Kyiv, Ukraine

THE EFFECT OF BIOLOGICAL FEEDBACK IN BIOTECHNICAL SYSTEMS

This article considers problematic issues in the synthesis of a technical system with the presence of an object of biological origin using classical management theory. Biological feedback plays a key role in maintaining the relative dynamic stability of parameters and functions. In order to obtain the programmed properties of the system and to evaluate the quantitative changes that occurred in the system during the obtaining of qualitative shifts in the properties of the biological object, the conditions for solving the problem of the reverse synthesis of the sensor as a part of the biotechnical system were considered. The goal is to formalize cause-and-effect relationships in order to obtain an alternative to the subjectivism of expert evaluation. Reproduction of the behavior of the control system is considered from the point of view of the modeling method based on electrobioanalogies as a factor influencing the architecture and functional principles of neuromorphic solid-state sensors.

Keywords: *biotechnical systems, intelligent control systems, solid-state components, digital information technologies, neural networks.*

УДК 681.51: 663.53

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-17

Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сацик В. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ КРОХМАЛЕВМІСНОГО ЗАМІСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

В статті проводиться аналіз механо-ферментативної обробки (МФО) при виробництві спирту. Визначення показника якості підготовки крохмалевмісного замісу – в'язкості, який на сьогоднішній день мало вивчений. Зазвичай основними показниками замісу є концентрація сухої речовини в замісі та ступінь утворення крохмалю в замісі, які не контролюються, а визначаються приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки, це дозволить не лише покращити якість керування, але і вплине на кількісні показники кінцевої продукції, дозволить краще і швидше налаштувати систему автоматичного регулювання, а також забезпечить економію енергоресурсів.

Ключові слова: в'язкість, система автоматичного керування, МФО, приготування замісу, клейстеризація.

Постановка проблеми. Сировиною, яка переробляється на спирт, є зернові культури, які містять у своєму складі крохмаль, який займає визначальне місце в технологічному процесі. Процеси взаємодії з ферментами для крохмалю різних основних зернових культур суттєво відрізняються за характером і технологічними режимами їх протікання, що необхідно враховувати при визначенні ефективних технологічних параметрів для кожної зернової культури [1].

Механіко-ферментативна обробка сировини у виробництві спирту забезпечує економію електроенергії за рахунок виключення апаратів, що працюють під тиском, зниження втрат цукрів та підвищення виходу спирту з тони умовного крохмалю. Для впровадження механіко-ферментативної схеми необхідно забезпечити дрібний помел (за регламентом 80% проходу через сито $d=1$ мм) та використання бактеріальних α -амілаз [2].

При нагріванні подрібненої крохмалистої сировини з одночасною обробкою α -амілазою при механіко-ферментативній обробці йде інтенсивний гідроліз крохмалю до декстринів і цукрів, що сприяє якійсь підготовці сировини до подальшого оцукрювання та зброджування. Температура клейстеризації залежить переважно від природи крохмалю, розміру гранул. Так, до прикладу, температура клейстеризації пшеничного крохмалю 54...62°C, житнього 50...55°C. Зміна в'язкості крохмальних суспензій у воді визначає і зміну в'язкості замісів з різної сировини, оскільки крохмаль найбільше впливає на в'язкість. В'язкість крохмалевмісного замісу в період нагрівання суспензії крохмалю за температуру 35...45°C має властивість дуже повільно збільшуватися, в той час як за температури 75...85°C різко зростає і при 90°C досягає максимального значення. Різке підвищення в'язкості супроводжується інтенсивним набуханням сировини і початком клейстеризації. Процес клейстеризації практично завершується за температури 90°C і показники в'язкості практично лишаються сталими [7,8].

Процесу підварювання, під час переробки зерна, передує змішування крупки з водою. Він повинен проводитися так, щоб заміс був однорідним за температурного режиму води не вище 50°C (бути нижче температури клейстеризації). При механіко-ферментативному способі підготовки крохмалистої сировини із застосуванням розріджуючих ферментів α -амілази процеси набухання, клейстеризації та розчинення крохмалю необхідно проводити якомога повніше, оскільки процес розварювання під тиском виключається, а витримана на цьому етапі маса прямує безпосередньо на оцукрювання та охолодження.

Тому в умовах термічної обробки замісу необхідно підібрати такий режим, який повинен забезпечити більш повний перехід крохмалю у розчинений стан. В даний час до якості зерна і зернового суслу, що отримується на його основі, висувають все більш високі вимоги, так як вона безпосередньо пов'язана з якістю готової продукції: ректифікованого спирту. Слід зазначити, що у виробництві спирту зерно прийнято оцінювати з погляду вмісту в ньому головного компонента, що зброджується – крохмалю. При розробці нових технологій такий підхід не може повною мірою охарактеризувати сировину, що є багатокомпонентним субстратом бо під впливом

зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін під час технологічного процесу, після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що термічний процес змішування супроводжується складними мікробіологічними й біохімічними змінами, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості, а також до додаткових енергетичних витрат. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів автоматизованого керування процесами, особливо тими, що відбуваються на початковій стадії виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його попередньої теплової обробки. Саме ці процеси визначають ефективність при подальшому протіканні процесів виробництва спирту. Для здійснення цієї стадії виникає проблема вибору показників замісу, придатних для автоматичного керування, які забезпечують спрощення синтезу системи керування. Технічним результатом такого підходу є автоматизація процесу вимірювання показника якості замісу, підвищення продуктивності підприємства, можливість контролю над зміною в'язкості в динаміці, економія енергоресурсів та ферментів [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Узагальнена технологія МФО на спиртових заводах України та за її межами передбачає наступну послідовність:

На початковому етапі відбувається перемішування всіх компонентів: зерна, води у співвідношенні від 1:2,5 до 1:4 та ферментів. Температурний режим підтримується за допомогою надходження гарячої води та становить в межах від 50-90°C в залежності від термостабільних показників ферментів. Час перебування замісу в змішувачі 20-30хв.

Наступним етапом є послідовне перекачування суміші спочатку в апарат термоферментативної обробки (ТФО -1), де перебуває 2 години за температури 6°-65°C, після чого потрапляє в апарат ТФО-2, де поступово збільшується нагрівання замісу від 7° до 90-95°C на протязі 1.5-2 год.

Далі здійснюється перекачування у паросепаратор для нагрівання до 100-105 °С.

Останнім етапом є охолодження до 58-60°C, витримування на протязі 30 хв. Отримане сусло перекачують на зброджування та при необхідності здійснюють додаткове зниження температури в теплообміннику, що обумовлено температурними показниками дій дріжджів.

Таким чином, раціональна схема МФО, розрахована на оптимальні тривалості ферментативної та ферментативно-теплової обробки, дозволяє завершити процес підготовки гідролізованої альфа-амілазної маси до зброджування з необхідністю урахування якості сировини, що переробляється, рисунок 1.

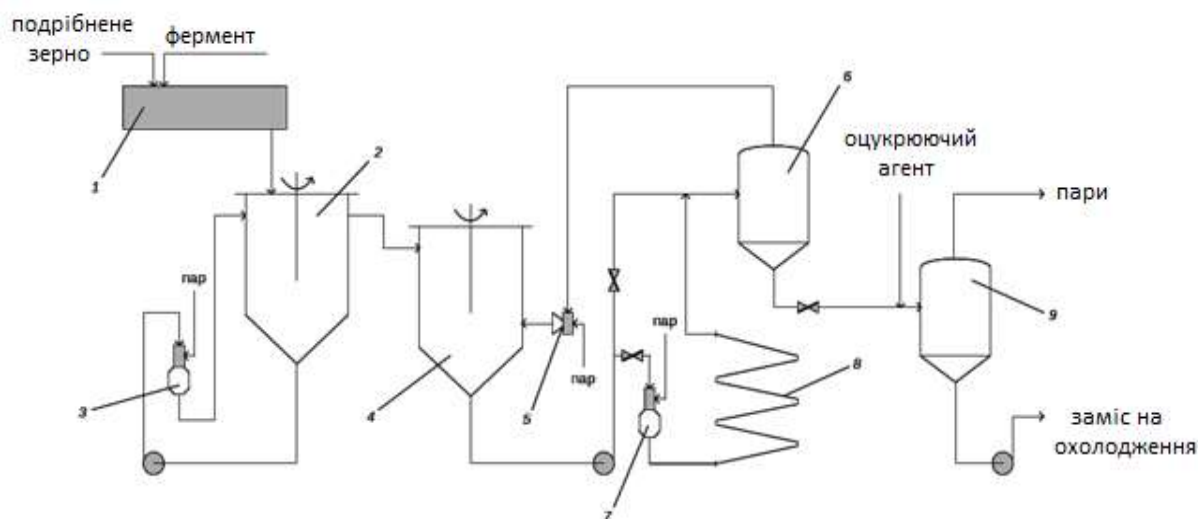


Рисунок 1 – Схема механіко-ферментативної обробки зернової сировини:

1 – змішувач; 2 – апарат ТФО-1; 3, 7 – контактна головка; 4 – апарат ТФО-2; 5 – паровий ежектор; 6 – паросепаратор; 8 – трубчастий витримувач; 9 - випарник-цукрівник

Підготовка замісу і його термічна обробка є найважливішим технологічним процесом під час виробництва спирту, від правильного ведення якого залежить успішність наступних процесів: розварювання замісу, повнота оцукрювання і бродіння і, зрештою - вихід спирту та його якість.

Процес розварювання (оцукрення) має на меті: зруйнувати клітинну структуру сировини та подрібнити, для виділення крохмалю із клітин і переведення його у розчинений стан.

До прикладу для житнього борошна основною властивістю крохмалю є температура клейстеризації та в'язкість [3]. Основні біотехнологічні процеси під час обробки крохмалевмісної сировини з метою одержання дозрілої бражки формуються з трьох послідовних стадій [5]:

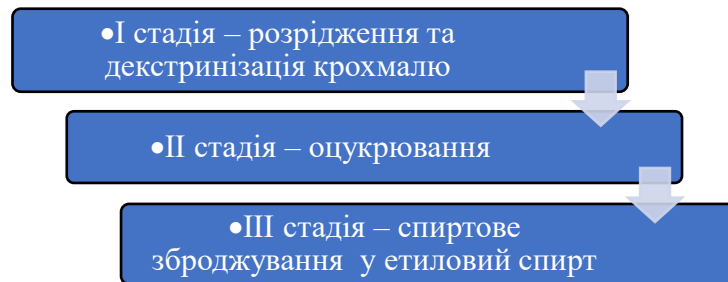


Рисунок 2 – Біотехнологічні процеси обробки крохмалевмісної сировини.

Варто зауважити, що конкретні температурні вимоги можуть варіюватися залежно від типу зернових замісів, їх якості та рецептури, що використовується в процесі виробництва спирту. Важливо враховувати ці фактори під час розробки процесу розварювання для забезпечення ефективного розкладання крохмалю. Із досліджень відомо, що в'язкість суспензії крохмалю у воді при підвищенні температури спочатку зменшується внаслідок зниження в'язкості води, потім підвищується, що обумовлено набуханням та клейстеризацією крохмалю [4].

За традиційною технологією отримання спирту із зернових замісів також передбачається використання змішувачів-передрозварників, функціональне призначення яких є підготовка зернового замісу до розварювання, яке в свою чергу супроводжується оцукрюванням крохмалевмісної сировини, що впливає на зміну в'язкості досліджуваного середовища. Тому можна стверджувати, що ступінь оцукрювання пропорційний в'язкості сировини та вивільненому крохмалю.

Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів наукових робіт таких вчених, як Процан Н. В., Олійнічук С. Т. і Мельник С. Р. дозволив простежити динаміку клейстеризації крохмалю зерен на стадії приготування замісу та встановити основні фактори, що відіграють важливу роль. Зокрема можна виділити наступні закономірності:

Підвищення температури впливає на зміну в'язкості замісу, спочатку вона зростає, а потім в результаті досягнення температури клейстеризації починає знижуватись.

На температуру клейстеризації, в свою чергу впливає гідромодуль замісу (чим менший гідромодуль, тим вона вища). Передумовою такого процесу є утворення спочатку крохмальної сітки, яка під дією температури і її підвищенням руйнується.

На зміну в'язкості також має вплив ступінь подрібнення зерна (фракція).

Основними технологічними факторами початкового етапу технології приготування зернових замісів є ступінь подрібнення зерна, гідромодуль «зерно-вода» під час приготування зернових замісів, температура та тривалість водно-теплого оброблення [3]. Фракційний склад помелів розрізняється за ступенем дисперсності. Для кожної фракції помелу з метою скорочення втрат необхідний свій водно-тепловий режим щоб уникнути неповного розчинення крохмалю. Тому, актуальним завданням для науковців є дослідження впливу цих технологічних факторів на в'язкість зернового сусла під час підготовки його до спиртового зброджування і визначення оптимальних параметрів процесу, які характеризують підготовленість замісу для подальшої обробки.

Постановка завдань. Зазвичай основними показниками замісу є концентрація сухої речовини в замісі та ступінь утворення крохмалю, які не контролюються, а визначаються приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Очевидно, що ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки. Нами визначено, що таким показником може слугувати в'язкість замісу яка обумовлює передумови стабільності теплової його обробки і усуває необхідність зміни технологічних режимів на наступній стадії [1, 7]. Для вирішення даного завдання необхідно визначити залежності між показниками приготовленого замісу і його в'язкістю.

Виклад основного матеріалу. Детальні дослідження даної ділянки нами передбачають розробку САР, яка б саме здійснювала контроль та регулювання вихідної суміші (замісу) базуючись саме на в'язкості. Для реалізації поставленої мети було проведено ряд лабораторних досліджень. В якості матеріалів було використано зразки замісів з різною концентрацією та співвідношенням зерно-вода 1:3. Нагрів суміші проводили у відповідності до технічного регламенту від 50 до 90°C. Для визначення густини замісу використано аерометр, який забезпечує швидкість та простоту виміру густини, рисунок 3.



Рисунок 3 – Лабораторне обладнання для визначення густини замісу

Для в'язкості вибрано капілярний візкозиметр ВПЖ-4. За результатами проведених досліджень, як лабораторно так і практично на чотирьох спиртогорілчаних заводів України дозволили сформувані наступні залежності між концентрацією сухих речовин і густиною, що представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність густини замісу від концентрації сухих речовин

Концентрація сухих речовин %	Густина при температурі, °C				
	50	60	70	80	90
10	1,035	1,02	1,031	1,027	1,02
20	1,072	1,069	1,060	1,055	1,049
30	1,121	1,111	1,110	1,109	1,103
40	1,168	1,164	1,159	1,155	1,149

Також було встановлено залежність густини зернових замісів від концентрації сухих речовин, в'язкості та температури, таблиця 2.

Таблиця 2 – Залежність густини, в'язкості і концентрації сухих речовин від температури

Температура, °C	СР 10%		СР 20%		СР 30%		СР 40%	
	густина	в'язкість	густина	в'язкість	густина	в'язкість	густина	в'язкість
50	1,032	1,3	1,0747	2,1	1,1218	12,6	1,1691	20,2
60	1,01	1,2	1,0701	1,9	1,117	11,4	1,1642	18,4
70	1,030	1,1	1,069	1,7	1,110	10,2	1,1635	17,2
80	1,027	1,05	1,055	1,6	1,109	9,4	1,156	16,1
90	1,02	1	1,049	1,5	1,103	8,3	1,149	14,9

Далі проведено побудову графічних залежностей на основі отриманих експериментальних даних. На рисунку 4 представлено одну із отриманих залежностей густини, концентрації, в'язкості від температури.

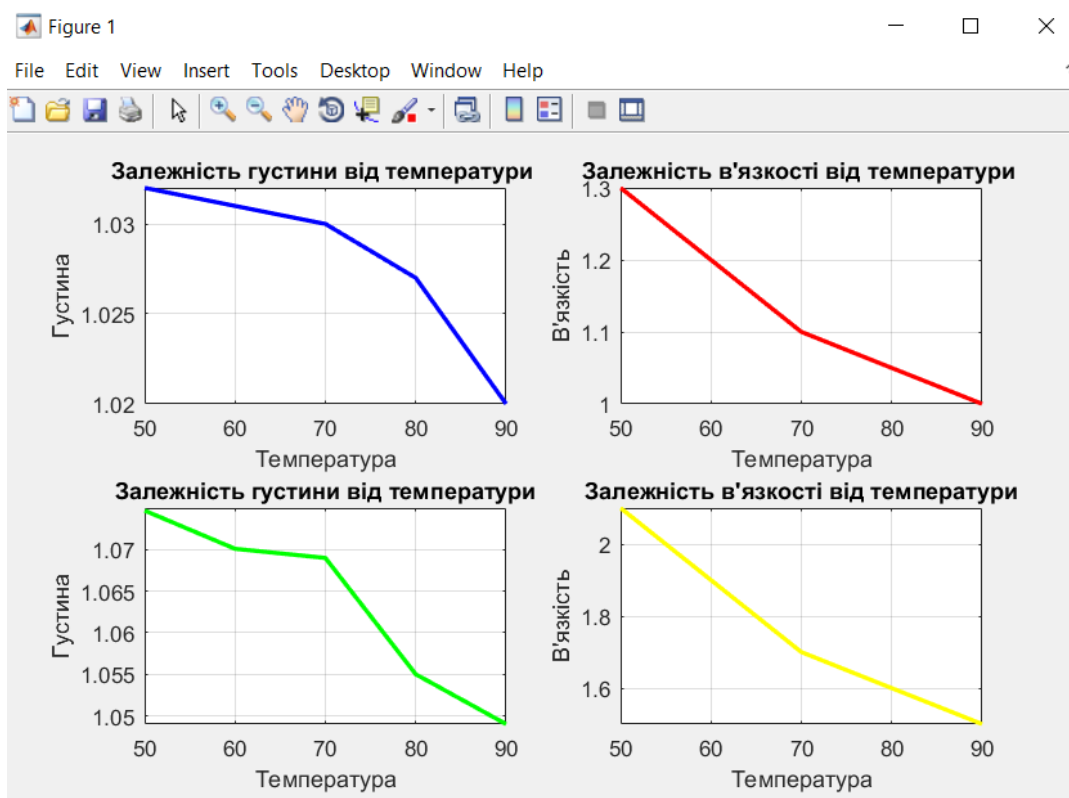


Рисунок 4 – Залежність густини і концентрації від температури та в'язкості, концентрації від температури.

У ході експериментів досліджено зміну в'язкості та густини замісу залежно від температури при різних значеннях концентрацій. Діапазон досліджених концентрацій становив від 10 до 40% сухих речовин з інтервалом 10% при зміні температури від 50 до 90 °С. Отримані дані дають змогу продемонструвати збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище. Перераховані закономірності дають чітке розуміння взаємозалежності усіх досліджуваних показників. Аналіз даних також дозволяє встановити, що в'язкість має тенденцію до зниження за умови збільшення температури замісу, незначне її збільшення спостерігається за низьких (до 10%) концентраціях замісу; поступова зміна відповідає 20-ти відсотковій концентрації, значне збільшення зафіксовано від 30-ти відсотковій концентрації і вище.

Висновок. В ході проведеного дослідження і аналізу параметрів процесу приготування замісу та його подальшого розварювання встановлено показник якості – в'язкість як такий, що впливає не тільки на ключові якісні та кількісні показники виготовленої продукції, а й на її енергоємність.

Проведене нами лабораторне дослідження водно-зернової суміші дозволило встановити, взаємозалежність густини та в'язкості від температури в сучасних системах автоматичного керування. Так зафіксовано збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище.

В'язкість має тенденцію до зниження за умови збільшення температури замісу, незначне її збільшення спостерігається за низьких (до 10%) концентраціях замісу; поступова зміна відповідає 20-ти відсотковій концентрації, значне збільшення даного показника зафіксовано вище 30-ти відсоткової концентрації.

Вищевказані закономірності гарантовано забезпечують спрощення етапу вибору операційних точок при налаштуванні САР та дають можливість адаптації в залежності від конкретних умов виробництва.

Інформаційні джерела

1. Патент на корисну модель № 151663 UA МПК(2^о22) C12C 7/04, G05B 15/00. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалевмісної сировини / Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., № u202200653; Заявл. 14.02.2022; Опубл. 25.08.2022, Бюл.№ 34. 3с.

2. Пальчевський Б., Маркіна Л. Основні принципи автоматичного керування процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. TERMM-2023 IX Міжнародна науково – практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»: IX international scientific and practical conference «theoretical and experimental research in materials science and mechanical engineering», м. Луцьк, 30 трав. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 30-32.

3. Шиян П. Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: моногр./ П. Л. Шиян, В. В. Сосницький, С. Т. Олійнічук. К.: ВД «Асканія», 2009. 424 с .

4. Марінченко В. О., Домарецький В. А, Шиян П. Л. та ін.; ред. Марінченка В. О. Технологія спирту. Вінниця: Поділля-2000, 2003. 496 с.

5. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту. Наукові нотатки. 2023. № 75. С. 22-26. URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.75.3>

6. Олійнічук С. Т.; Процан Н. В.; Ткаченко Л. В. Вплив Технологічних Факторів на В'язкість Житнього Сусла. Збірник Наукових Праць «Продовольчі Ресурси» 2017, 9, с 244-248.

7. Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Макаренко Д. С. Розрідження житнього замісу з використанням ферментного препарату shearzyme 500L. Chemistry, Technology and Application of Substances. 2024. Vol. 7, No. 1. С. 171-176.

URL: <https://doi.org/10.23939/ctas2024.01.171>

8. Lyudmila Markina, Bogdan Palchevskiy, Roman Hrudetskiy, Oleh Smoliankin, Yuliia Melnychuk, Nataliya Khrystynets: Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology. 2023 Emergencies/ The 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2023). Greece, Athens, October 13-15, 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416529>

Palchevsky B., Markina L., Satsyk V.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

SELECTION OF QUALITY INDICATORS FOR THE PREPARATION OF THE STARCH-CONTAINING BATCH FOR AUTOMATIC PROCESS CONTROL

The article analyzes the mechanical-enzymatic processing (MEP) in alcohol production. Determination of the quality indicator of starch-containing batch preparation - viscosity, which is little studied to date. Usually, the main indicators of the batch are the concentration of dry matter in the batch and the degree of starch formation in the batch, which are not controlled but determined approximately by the duration of heat treatment at a given temperature. This leads to difficulties that arise when the technological indicators required by the regulations are not obtained at the previous stage of production. The situation can be improved if the degree of starchiness of the batch is determined before it is fed to the next processing stage, which will not only improve the quality of control but also affect the quantitative indicators of the final product, allow for better and faster adjustment of the automatic control system, and save energy.

Keywords: *viscosity, automatic control system, MFI, batch preparation, pasteurization.*

УДК 621.317.39

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-18

Рассовський В. Л.¹, Зайцев Є. О.², Левицький А. С.¹¹ ПрАТ «Укргідроенерго»² Інститут електродинаміки Національної академії наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРІ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

В роботі описано конструкційні, схемні та технологічні особливості ємнісного сенсора повітряного проміжку (ПП) між розточенням осердя статора та полюсами ротора в капсульному гідрогенераторі (ГГ) типу, утвореного системою стрічкових паралельних компланарних електродів. Система містить високо потенціальні, низько потенціальні та заземлені електроди. Зміна електричної ємності між системою високо потенціальних електродів і системою низькопотенціальних електродів функціонально залежить від зміни відстані між загальною площиною електродів сенсора в полюсами ротора, тобто від величини повітряного проміжку. Викладено методіку експериментального визначення функції перетворення сенсора. Описано застосоване обладнання та вимірювальні прилади. В методиці досліджень для імітації зміни ПП передбачено застосування спеціального пристрою для плоско паралельного переміщення плоскої заземленої пластини, яка є імітацією поверхні полюса ротора в машині. Пластина переміщується кареткою пристрою відносно загальної поверхні електродів сенсора, який на пристрої закріплюється нерухомо. Задавання переміщення та його реєстрація здійснюється мікрометричною голівкою. Отримані табличні та графічні дані, які ілюструють експериментально визначену функцію перетворення. Проведене порівняння експериментальних результатів з теоретичними засвідчило вірність запропонованих принципів побудови сенсора. Використання сенсора дозволяє підвищити точність вимірювання ПП в ГГ типу, що в кінцевому рахунку покращить оцінку поточного технічного стану машини.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний проміжок між статором і ротором, ємнісний сенсор, експериментальний зразок.

Постановка проблеми. Одним з найважливіших параметрів потужного гідрогенератора (ГГ) є повітряний проміжок (ПП) між полюсами ротора і поверхнею розточення осердя статора. ПП в значній мірі визначає характеристики машини та її роботу в процесі експлуатації. Величина ПП істотно впливає на торцеві магнітні потоки і втрати, що викликаються ними в крайніх пакетах осердя і натискних плитах, на значення і розподіл втрат на поверхні полюсів ротора, а також на області допустимих режимів роботи ГГ [1]. Саме через це контроль за величиною ПП необхідно здійснювати, як процесі оглядів машини, так і в процесі роботи.

У відповідності до чинних державних та міжнародних нормативних документів [2,3] повітряні проміжки в ГГ, величини яких є порівняно невеликими в порівнянні з діаметрами розточення осердя статора, в діаметрально протилежних точках можуть відрізнятися один від одного не більше, ніж на $\pm 20\%$, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми. Особливо важливо здійснювати контроль ПП в під час роботи ГГ. Це пов'язано, насамперед з тим, що в динаміці, при наборі обертів і роботі під навантаженням відбуваються процеси, які впливають на величину і форму ПП [4]. Зазначені процеси зумовлюються дією відцентрових сил, викликаних невірноваженістю обертових мас ротора, тепловим і динамічним прогином вала тощо [5–7].

Аналіз останніх досліджень. Для вирішення завдання достовірного контролю ПП в ГГ на даний час найбільшого поширення набули автоматизовані вимірювачі на базі ємнісних сенсорів (ЄС), які виконані в формі пластини, яка закріплюється на розточенні осердя статора [8]. Ємнісні сенсори мають відносно високі метрологічні характеристики, нечутливі до впливу потужних електромагнітних полів, а діапазон їх робочих температур визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються. Сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, у тому числі при масовому і серійному виробництві, нескладні у виготовленні і налагодженні. Достатня інформативність контролю ПП з використанням системи ємнісних сенсорів, особливо для контролю форми розточення статора, досягається завдяки встановленню необхідної кількості сенсорів. Найвідоміші світові компанії, які серійно випускають ємнісні вимірювачі ПП для ГГ: VibroSystem (Канада) [9], Bently Nevada (США) [10], Iris Power (Канада, США) [11], Meggitt SA (Швейцарія) [12].

Аналіз науково-технічних джерел показав, що зазначені компанії не публікують даних про геометрію електродів ємнісних сенсорів і даних з оцінки впливу на функції перетворення геометричних параметрів ГГ, насамперед радіуса кривизни полюса ротора. В ІЕД НАН України було створено і досліджено ряд ємнісних сенсорів ПП в ГГ, для яких було проведено розрахунки з оцінки зазначеної похибки [8]. Встановлено, що зазначена похибка збільшується зі збільшенням поперечних розмірів електродів сенсора (перпендикулярних твірній розточення осердя) і зменшенням радіусу полюсу ротора. За мінімальних проміжків відносна похибка вимірювання може досягати десятих долей процента. Подальшим розвитком робіт в цьому напрямку було створення в ІЕД НАН України нового ємнісного сенсора ПП з системою компланарних паралельних електродів [13], в якому забезпечено мінімізацію похибки вимірювання від кривизни полюса ротора. Сенсор призначений для використання на капсульних ГГ типу СГК 538/160-70М Київської та Каневської ГЕС України. В процесі виконання робіт на базі теоретичних досліджень було виготовлено експериментальні зразки сенсорів.

Метою даної роботи є викладення результатів експериментального визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторі типу СГК538/160-70М та їхній аналіз.

Викладення основного матеріалу. До складу сенсора (рис. 1) входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора низькопотенціальні електроди 1, високопотенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3, які розміщені в одній площині. Додатковий електрод 3 розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 розміщені в одній площині і відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4. Всі електроди утворені тонким металевим шаром (наприклад, міді), нанесеним на плоску діелектричну пластину 5. На зворотній стороні пластини розміщений заземлений електрод 6 і цією стороною сенсор встановлюється на розточення осердя статора. Загальна товщина пластини сенсора дорівнює δ .

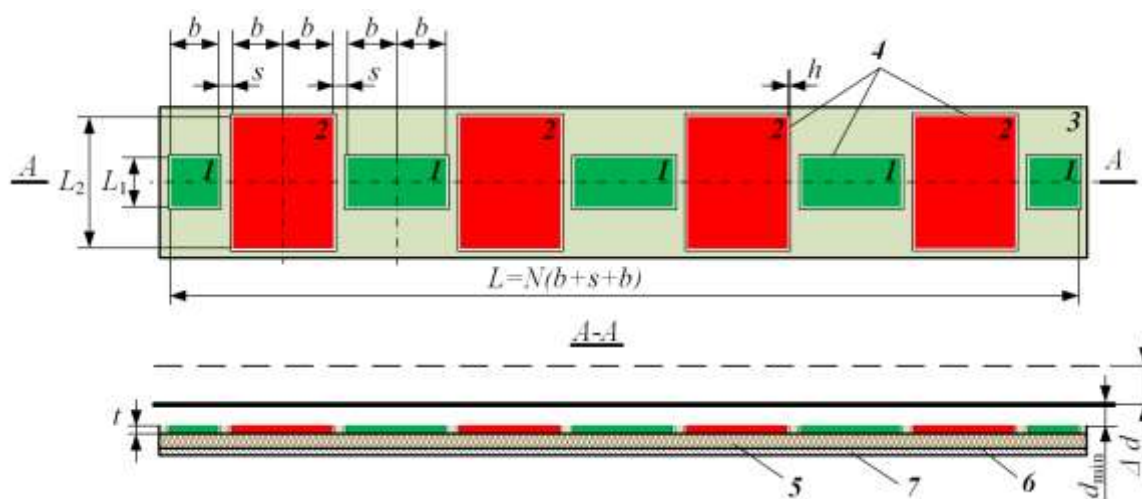


Рисунок 1 – Ємнісний сенсор ПП з системою компланарних паралельних електродів

Інформативною ємністю про величину ПП є ємність C_{12} між системою електродів 1 і 2, яка змінюється зі зміною відстані між загальною площиною електродів 1, 2 і 3 та поверхнею полюса ротора 7. Як визначено в [13], ця ємність визначається формулою (1)

$$C_{12} = N \cdot L_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; ε_r – відносна діелектрична проникність повітря, b – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, s – відстань між електродом 1 і електродом 2, L_1 – довжина низькопотенціального електрода 1, d – відстань між загальною площиною електродів 1, 2, 3 і полюсом ротора 7, N – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 при паралельному з'єднанні.

Вимірюючи C_{12} за формулою (1), визначають відстань d , а потім знаходять величину ПП в ГГ як

$$d_{AG} = d + \delta, \quad (2)$$

де d_{AG} – величина ПП в ГГ;

δ – товщина пластини сенсора.

На базі теоретичних досліджень, наведених в [13,14] була розроблена технічна документація і виготовлено експериментальні зразки ємнісних сенсорів ПП, призначених для використання на капсульному ГГ. При цьому враховувались номінальна величина ПЗ $d_{AGnom} = 6$ мм в цьому ГГ і ширина зубця заліза в осердя статора машини, рівна 57 мм. На рис.2 показано тестове встановлення виготовленого зразка сенсора на зубці розточені статора капсульного ГГ типу SGK 538/160-70М.



Рисунок 2 – Розміщення сенсора ПП:
1 - сенсор ПП; 2 - зубець розточення статора; 3 - полюс ротора.

Конструкція сенсора та технологія виготовлення. Загальна довжина пластини сенсора 210 мм, ширина 32 мм. Розміри електродів (рис. 1): $L_1=10$ мм; $L_2=30$ мм (довжина високопотенціального електрода 2); $2b=24$ мм (ширина високопотенціального електрода 1); $b=12$ мм (ширина низькопотенціального електрода 1); $s=2$ мм (ширина додаткового електрода 3 між електродами 1 і 2); $h=0,02$ мм (ширина діелектричних проміжків 4). Довжина електрода 1 вибрана із умови $L_2 = L_1 + 2l_3$, $l_3 \geq d_{AGnom}$ (рис. 1). Якщо при цьому проміжки h є нескінченно малими, то в результаті електричне поле між електродами 1 і 2 в кожному перетині, перпендикулярному їх довжині буде двовимірним і матиме однакову форму. До того ж за цієї умови на поздовжніх сторонах електрода 1 значно зменшується вплив крайових ефектів.

Дослідження, проведені в [13,14], показали, що для зменшення нелінійності функції перетворення ширина частини додаткового електрода поміж високопотенціальним та низькопотенціальним повинна вибиратись із умови $b/s \geq 6$, $d_{max}/s \leq 10$ ($d_{max} = 12$ мм – максимальний проміжок в гідрогенераторі). Експериментальний зразок сенсора виготовлений з застосування технології багатошарових друкованих плат. З урахуванням вартості та можливостей технології виготовлення друкованих плат значення h обрано 0,1 мм. На рис.3 показано схематичний переріз сенсора як багатошарової плати з характеристиками провідних та діелектричних шарів, які були сформовані під час виготовлення сенсора ПП.

Номер шару	Тип шару	Товщина шару, мкм	Значення діелектричної проникності шару, ϵ
1	Мідь	0,036	
2	Діелектрик	0,071	4,1
3	Мідь	0,036	
4	Діелектрик	0,32	4,8
5	Діелектрик	0,071	4,1
6	Мідь	0,036	

Рисунок 3 – Провідні і діелектричні шари пластини ємнісного сенсора

В мідному шарі 1 сформовані методом фотолітографії електроди 1,2 і 3 сенсора. В шарі 3 – провідники, що з'єднують між собою електроди 1, а також між собою електроди 2. В цьому ж шарі передбачені контакти для під'єднання вивідних провідників сенсора. Шар 6 – заземлена провідна поверхня, яка екранує сенсор. Діелектричні шари 2, 4 і 5 є ізоляторами між провідними шарами. Наявність шарів 4 та 5 обумовлена технологічним процесом, який був використаний для виготовлення сенсорів методом багатошарових друкованих плат.

Обладнання, прилади та матеріали. На рисунку 4-6 показано обладнання, яке було застосоване для виконання досліджень. де: 1 – спеціальний пристрій з мікрометричною голівкою 2 для задавання плоско-паралельного переміщення спеціальної заземленої плоскої пластини 4 відносно загальної поверхні електродів сенсора. 5 – вимірювач електричної ємності типу Eucol 2836 LCR Meter.

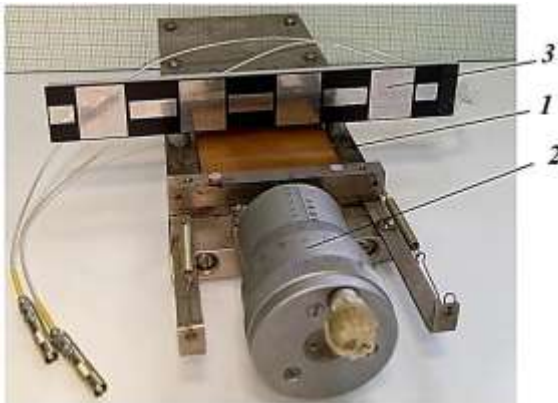


Рисунок 4 – Встановлення сенсора на пристрої

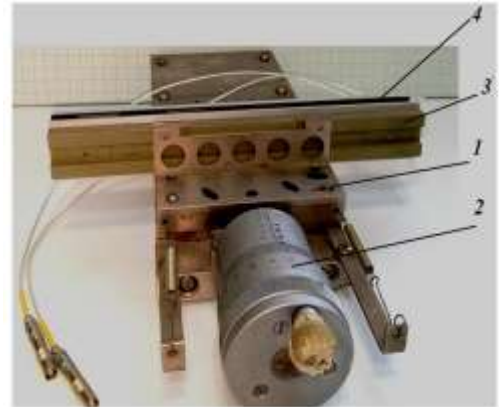


Рисунок 5 – Встановлення сенсора і заземленої поверхні на пристрої

Перед встановленням на випробувальний пристрій поверхня електродів сенсора 3 та поверхні металевієї пластини 4, звернена до поверхні електродів сенсора повинні бути зачищені від бруду пилу та вологи. На поверхнях також має бути лаку або фарби. Також поверхня пластини 4, повинна бути ідеально плоскою, без вигинів, подряпин, ям тощо.

Методика випробувань. Випробування проводилося методом вимірювань мостом EUCOL 2836 LCR METER електричної ємності C_{12} між системою електродів 1 і 2 в процесі зміни відстані до заземленої поверхні за допомогою мікрометричної голівки стенду в діапазоні від 2,0 до 10,0 мм і зняттям відповідних показів з моста EUCOL 2836 LCR METER. Функціональна схема стенду для проведення випробувань наведена на рис. 7. Ємність C_{12} вимірювалась під час прямої і зворотної зміни відстані d з розрахунком середнього значення.

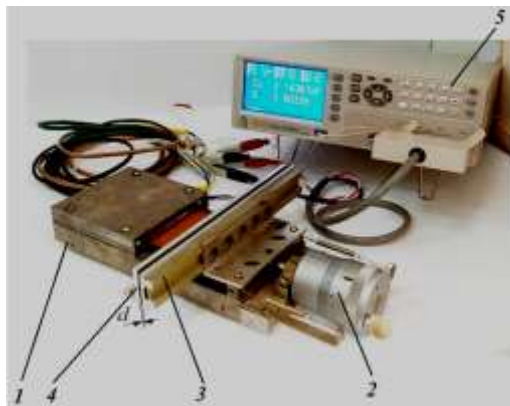


Рисунок 6 – Вимірювання інформативної електричної ємності сенсора

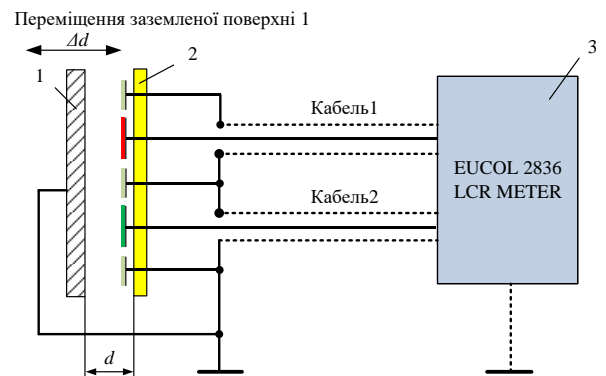


Рисунок 7 – Схема вимірювання інформативної електричної ємності сенсора

На рисунку 8 наведено графіки функцій $C_{12} = f(d)$ отриманих експериментальним шляхом (графік 1) і розрахованих теоретично (графік 2). Експериментальні значення відрізняються від розрахованих теоретично через додавання постійної складової, яка обумовлюється ємністю між системою електродів 1 і 2 через діелектричний проміжок 2 (рис.2).

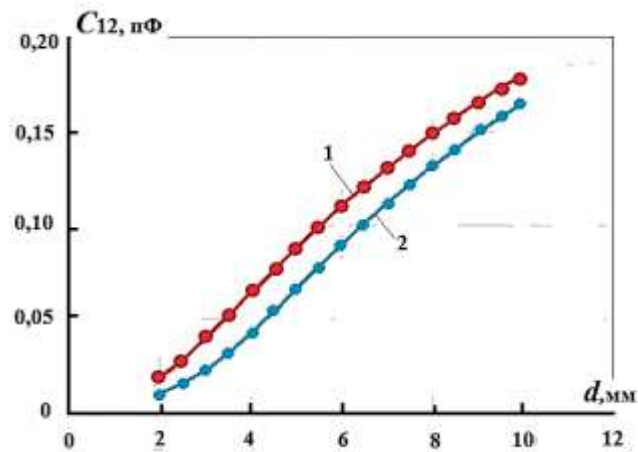


Рисунок 8 – Графіки залежності $C_{12} = f(d)$ отриманої:
1 – експериментально, 2 – теоретично.

Висновки. У статті представлено результати експериментального визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між розточенням осердя статора та полюсами ротора в потужному гідрогенераторі, який забезпечує більшу точність вимірювання завдяки новій геометрії системи компланарних паралельних електродів. Запропонований сенсор використовує інноваційну геометрію компланарних паралельних електродів, що дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань. Вдосконалена система сенсорів сприяє більш ефективному контролю стану гідрогенератора та підтримці його стабільної роботи, що є критично важливим в умовах підвищених вимог до надійності енергетичної інфраструктури. Дослідження підтвердило функціональну спроможність сенсора і вірність теоретичних розрахунків. Отримані результати підтверджують можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою паралельних компланарних електродів для вимірювання повітряного проміжку між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М в діапазоні від 2 до 10 мм.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» Шифр «ПАРАМЕТР-Д», реєстраційний номер (0122U000136) та проектом Національного фонду досліджень України «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакмулюючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» з виконання наукових досліджень і розробок «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (номер 2022.01/0069).

Інформаційні джерела

1. Глебов І. А., Домбровський В. В., Дукштау А. А., Папер А. С., Пінський Г. Б., Школьник Є.В. Гідрогенератори. 1982. 368 с.
2. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
3. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. М-во енергетики та захисту довкілля України. Офіц. вид. ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
4. Overview of Typical Factors Affecting the Air Gap of a Hydrogenerator. [Online]. Available: https://library.vibrosystem.com/en/Application_Notes/AN006-a.pdf. Accessed at May 13.05.2024.
5. Xu B., Chen D., Zhang H., Li C., Zhou J. Shaft mis-alignment induced vibration of a hydraulic turbine generating system considering parametric uncertainties. Journal of Sound and Vibration. 2018. №435, Pp. 74-90. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.08.008.
6. Wu Q., Zhang L., Ma Z. A model establishment and numerical simulation of dynamic coupled hydraulic-mechanical-electric-structuralsystem for hydropower station. Nonlinear Dynamics. 2017. № 87(1). Pp. 459-474. DOI:10.1007/s11071-016-3053-1.
7. Zhanga J., Zhanga L., Ma Z., Wanga X., Wuc Q., Fand Z. Coupled bending-torsional vibration analysis for rotor-bearing system with rub-impact of hydraulic generating set under both dynamic and

static eccentric electromagnetic excitation. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021, № 147. Pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110960.

8. Левицький А. С., Федоренко Г. М., Грубой О. П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

9. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. [Online]. Available: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap. Accessed at May 13.05.2024.

10. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. [Online]. Available: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>. Accessed at May 13.05.2024.

11. Iris Power AGTracII. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>. Accessed at May 13.05.2024.

12. LS121 and ILS731 air-gap measurement system. [Online]. Available: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf. Accessed at May 13.05.2024.

13. Левицький А. С., Рассовський В. Л., Зайцев Є. О. Ємнісний сенсор з системою компланарних електродів для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах. *Технічна електродинаміка*. 2023. №. 3. С. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>.

14. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М. Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр., 2016. Вип.43. С. 134-136.

¹Rassoskyi V., ²Zaitsev Ie., ²Levytskyi A.

¹ PJSC "Ukrhydroenergo"

²Institute of Electrodynamics of the National Academy Sciences of Ukraine

STUDY OF THE CAPACITIVE SENSOR OF THE AIR GAP IN THE HYDROGENERATOR WITH PARALLEL COPLANAR ELECTRODES

The paper describes the design, circuit and technological features of a capacitive sensor of the air gap (AG) between the bore of the stator core and the rotor poles in a capsule hydrogenerator, formed by a system of strip parallel coplanar electrodes. The system contains high-potential, low-potential and grounded electrodes. The change in electrical capacitance between the system of high-potential electrodes and low-potential electrode systems functionally depends on the change in the distance between the common plane of the sensor electrodes at the rotor poles, which is the value of the air gap. A method for experimentally determining the sensor conversion function is outlined. The equipment and measuring instruments used described. The research methodology for simulating changes in AG involves the use of a special device for parallel plane movement of a flat-grounded plate, which imitates the surface of a rotor pole in a machine. The plate moves along the device carriage relative to the common surface of the sensor electrodes, which fixed on the device. A micrometer head carries out the task of movement and its registration. Tabular and graphical data illustrating the experimentally determined transformation function obtained. A comparison of the experimental results with the theoretical ones confirmed the correctness of the proposed principles for constructing the sensor. The use of a sensor makes it possible to increase the accuracy of measuring AG in hydrogenerator, which will ultimately improve the assessment of the current technical condition of the machine.

Key words: hydrogenerator, air gap between the stator and rotor, capacitive sensor, experimental sample.

УДК 681.121.89.082.4

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-19

Роман В. І., Масняк О. Я., Костик І. В.

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

В статті детально розглянуто параметри налаштування комп'ютерного пакету для обчислювальної гідродинаміки SolidWorks Flow Simulation на етапі узагальненої процедури CFD-аналізу «Set Up a Flow Simulation Project» та їх варіанти встановлення. Також, в статті наведено конкретний приклад покровового підбору параметрів SolidWorks Flow Simulation для моделювання похибки вимірювання витрати двоканального хордового ультразвукового витратоміра, зумовленої впливом спотворення структури потоку (профіль швидкості) – що є найбільш типовою задачею при дослідженні витратомірів цього типу. За результатами прикладу показано, що кут встановлення місцевого опору «два 90° коліна в різних площинах» по відношенню до двоканального ультразвукового витратоміра, значно впливає на похибку вимірювання витрати, особливо для малих швидкостей потоку. При збільшенні швидкості, похибка вимірювання витрати ультразвукового витратоміра стабілізується, і майже не змінює свої значення.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, обчислювальна гідродинаміка, параметри налаштування, SolidWorks Flow Simulation, похибка вимірювання витрати.

Постановка проблеми. Точність вимірювання витрати та кількості дороговартісних плинних енергоносіїв (до прикладу, природний газ), має важливе значення для промисловості України, зокрема в умовах повномасштабної війни. При постійному удорожчанні та дефіциті цінних енергоносіїв на вітчизняному та світовому ринках, застосування високоточних засобів обліку стає запорукою стабільності існування як споживачів, так і генеруючих компаній. Це зумовлює постійний розвиток засобів обліку, зокрема і ультразвукових витратомірів (УЗВ).

В УЗВ, як і у решти витратомірів, присутні слабкі сторони. Найбільших проблем для УЗВ під час роботи в реальних умовах, створює спотворена структура потоку (профіль швидкості) на його вході. Це викликано тим, що не завжди вдається дотримати достатньої довжини прямолінійної ділянки вимірювального трубопроводу (ВТ) між входом УЗВ та джерелом спотворення (коліна, трійники тощо) [1]. Щоб усунути або зменшити цей вплив, необхідно так чи інакше проводити додаткові дослідження по місцю роботи УЗВ або відтворювати їх в лабораторії [1]: підбирати пристрої підготовки потоку / кондиціонери потоку; проводити перекалібрування УЗВ «по місцю»; підбирати новий УЗВ з більшою кількістю акустичних каналів (АК) тощо. Сучасний рівень розвитку комп'ютерів та методів обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD), дозволяє доповнювати такі досліди результатами математичного моделювання УЗВ для умов, наближених до реальних. Маючи в першу чергу результати CFD-моделювання, науковець чи конструктор, може суттєво звузити поле пошуку проблеми економлячи при цьому час та гроші на реальні експерименти.

Аналіз останніх досліджень. SolidWorks Flow Simulation є одним із сучасних комп'ютерних пакетів для CFD-моделювання, поряд із ANSYS Fluent, Siemens Simcenter STAR-CCM+ та OpenFOAM. Оскільки більшість потоків, що зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними, в Flow Simulation їх моделювання (як і потоків з ламінарним чи перехідним режимом) виконується за допомогою усереднених за Фавром рівнянь Нав'є-Стокса [2]. Проте, застосування Flow Simulation для моделювання потоків, поширене переважно в працях українських науковців [3-5], і не містить чіткого алгоритму підбору параметрів його налаштування для моделювання саме УЗВ. Це створює враження епізодичності, та неможливості чіткого відтворення / повторення результатів наявних досліджень задля порівняння (чи спростування). Також, це може ускладнювати процес успішного (завершеного) моделювання УЗВ студентами, які обмежені часом навчального заняття. Адже невірний налаштований CFD-пакет вимагатиме занадто багато часу або даватиме занадто «грубі» результати моделювання УЗВ.

Мета роботи. Зважаючи на вище сказане, метою даної статті є детальний огляд параметрів налаштування CFD-пакету SolidWorks Flow Simulation та демонстрація прикладу їх підбору для моделювання похибки вимірювання витрати УЗВ.

Викладення основного матеріалу. Мета даної статті є логічним продовженням дослідження, опублікованого в роботі [6], де на базі узагальненої процедури CFD-аналізу [7], було розроблено алгоритм побудови тривимірного макету УЗВ. Наступним кроком згідно узагальненої процедури CFD-аналізу, є безпосереднє моделювання УЗВ в CFD-пакеті.

SolidWorks Flow Simulation використовується дослідниками для вирішення задач в галузі аеродинаміки твердих тіл, процесів теплообміну систем охолодження, процесів фільтрації тощо. Також він містить функціонал для моделювання областей, що обертаються – на цій базі можна прогнозувати напірні характеристики вентиляторів і насосів. Додатково, Flow Simulation оснащений двома модулями: Flow Simulation HVAC Module – для поглибленого аналізу впливу навколишнього середовища у приміщенні на людей та обладнання, у тому числі із застосуванням розширеної моделі теплообміну випромінюванням для врахування об'ємного поглинання; Electronics Cooling Module – для теплового розрахунку електронних пристроїв.

SolidWorks Flow Simulation для вирішення поставленої задачі застосовує числовий метод скінчених об'ємів (Finite volume method, FVM), який має такі особливості [8]:

1. Використовується структурована розрахункова сітка, утворена координатними лініями так, що вузли цієї сітки можуть бути пронумеровані з допомогою цілочисельних векторів, розмір яких залежить від розміру системи координат.

2. Для дискретизації розв'язку використовуються комірки розрахункової сітки, причому в межах однієї комірки розв'язок рахується постійним, тобто не прив'язаний до якої-небудь конкретної точки.

У випадку складної конфігурації ВТ з УЗВ, коли граничні умови задачі змінюються не прямолінійно (повороти, перепади діаметрів), виникає потреба збільшення розрахункових комірок для підвищення точності отриманих результатів на цій ділянці тривимірного макету. Для цього структурована сітка Flow Simulation володіє адаптивною функцією подрібнення.

Після того, як тривимірний макет УЗВ побудовано [6], користувач приступає до підбору параметрів налаштування CFD-пакету під конкретну задачу моделювання витратоміра. Згідно [2], в SolidWorks Flow Simulation цей етап узагальненої процедури CFD-аналізу (рис.1) називається «Set Up a Flow Simulation Project» [2].

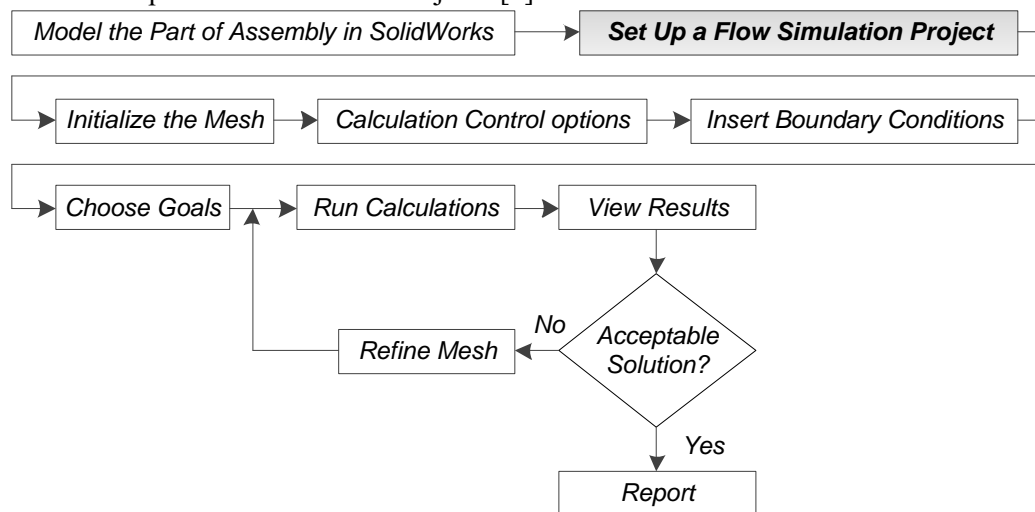


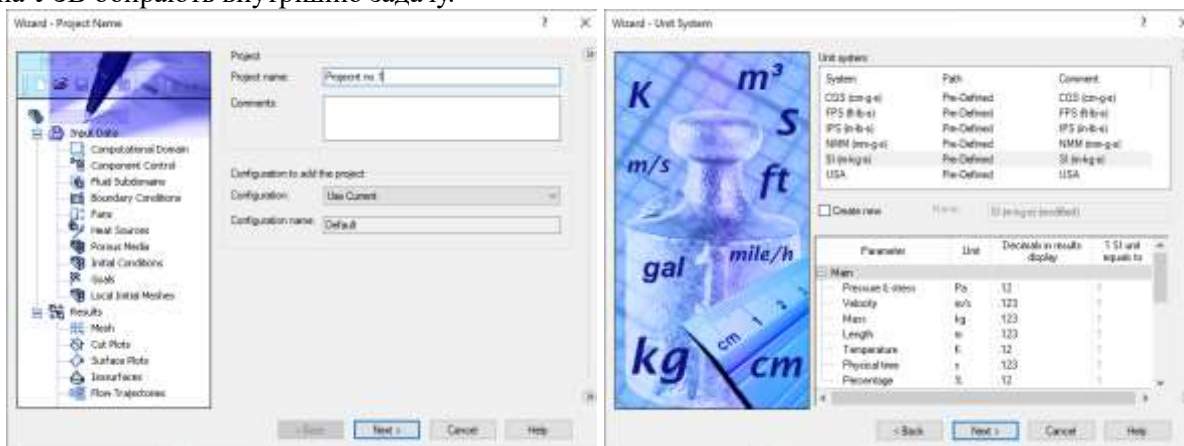
Рисунок 1 – Узагальнена процедура CFD-аналізу аналізу в SolidWorks Flow Simulation [2]

Перш ніж приступити до розгляду параметрів «Set Up a Flow Simulation Project», необхідно наголосити, що всі подальші параметри стосуватимуться режиму роботи CFD-пакету Flow Simulation «Wizard». А отже, користувач повинен першочергово вказати назву проекту, створити коментар (за потреби) і провести конфігурацію – коли для одного й того самого тривимірного макету УЗВ можна створювати довільну кількість проектів з різними параметрами налаштування CFD-пакету. При цьому, конкретній конфігурації надається відповідне ім'я (рис.2,а). Друге, що повинен виконати користувач, це обрати систему вимірювання, а також визначити, в яких одиницях вимірювання будуть відображатися параметри потоку (рис.2,б). За необхідності, користувач може створити власну систему. До прикладу, нами обрано типову для України метричну систему вимірювання SI (m-kg-s).

Розглянемо детально всі параметри налаштування CFD-пакету SolidWorks Flow Simulation (етап «Set Up a Flow Simulation Project») для моделювання гідродинаміки потоку:

1. Параметр «Analysis type» (рис.3,а). Визначає тип задачі CFD-аналізу. Він має два

варіанти: зовнішня (External), стосується випадків дослідження обтікання тіл середовищем, та ефекти, які виникають при цьому; внутрішня (Internal), дослідження течії в середині замкнутого простору, та ефектів, які виникають при цьому. Для моделювання впливу гідродинаміки потоку на УЗВ обирають внутрішню задачу.



а) б)
Рисунок 2 – Вікна Flow Simulation Wizard: а) Project Name; б) Unit System

2. Параметр «Physical Features» (рис.3,а). Дозволяє додати до CFD-аналізу різні фізичні явища та процеси, що підвищують точність та реалістичність, а також налаштовують моделювання відповідно до специфічних вимог і умов експлуатації УЗВ. До основних фізичних особливостей, які можуть бути враховані у SolidWorks Flow Simulation 2022 для внутрішньої задачі відносять такі варіанти даного параметру: Fluid Flow – аналіз і прогнозування поведінки рідинних і газових потоків; Conduction – аналіз теплопередачі у твердих тілах та рідинах; Time-dependent – дослідження динамічної поведінки систем, де параметри змінюються з часом; Gravity – врахування гравітаційних сил, що впливають на потік при моделюванні природної конвекції та інших гравітаційних ефектів; Rotating – врахування обертання частин тривимірних макетів, таких як вентилятори, пропелери або турбіни; Free Surface – моделювання поведінки рідини на межі з іншою фазою (наприклад, вода і повітря). Для моделювання УЗВ Flow Simulation автоматично вибирає активним тільки компонент Fluid Flow.



а) б)
Рисунок 3 – Вікна Flow Simulation Wizard: а) Analysis Type; б) Default Fluid

3. Параметр «Fluids» (рис.3,б). Дозволяє обрати тип середовища, який буде використано під час CFD-аналізу. Серед наявних типів представлено: гази (Gases), рідини (Liquids), неньютонівські рідини (Non-Newtonian Liquids), стисливі рідини (Compressible Liquids), «реальні» гази (Real Gases), пара (Steam). Окрім цього, користувач може створити власний тип середовища. В контексті CFD-аналізу УЗВ, потрібно враховувати їх призначення – якщо вимірювання тільки газових потоків, то обираємо гази (Gases), до прикладу повітря або метан.

4. Параметр «Flow Type» (рис.3,б). Стосується режиму потоку. Для цього параметру передбачено три варіанти: ламінарний (Laminar), ламінарний та турбулентний (Laminar and Turbulent), турбулентний (Turbulent). Для CFD-аналізу УЗВ обираємо «Laminar and Turbulent», адже це одна із основних переваг витратомірів цього типу – одним виконанням працювати в

широкому діапазоні витрат (швидкостей потоку).

5. Параметр «Default Wall Thermal Condition» (рис.4,а). Визначає стандартні теплові умови на стінках геометрії моделі, тобто як буде розраховуватись теплообмін між середовищем та твердими поверхнями тривимірного макету. Ці умови можна налаштувати для усього моделювання або індивідуально для конкретних поверхонь. Основні варіанти цих умов: Adiabatic Wall (адіабатична стінка), коли немає теплового обміну через стінку, тобто тепло не передається через неї; Heat Flux (тепловий потік), коли користувач може задати тепловий потік через стінку (кількість тепла, що передається через одиницю площі за одиницю часу); Specified Temperature або просто Temperature, коли температура стінки задається постійною величиною, і не змінюється протягом моделювання (симуляції); Heat Transfer Rate (швидкість передачі тепла), описує кількість теплової енергії, яка передається через певну поверхню або між об'єктами за одиницю часу. При моделюванні впливу гідродинаміки потоку на похибку УЗВ, рекомендуємо обирати адіабатичну стінку.

6. Параметр «Roughness» (рис.4,а). Використовується для опису шорсткості поверхонь, з якими взаємодіє потік. Він впливає на гідродинамічні властивості потоку, зокрема на коефіцієнт тертя і втрати тиску, що можуть бути критичними для точності моделювання. Імітуючи нове обладнання чи калібрувальну установку для нового УЗВ, рекомендуємо при моделюванні обирати 0 мікрон (мікромметр). Якщо імітуємо «старий» УЗВ, щоб оцінити вплив накипу на похибку вимірювання витрати, то значення шорсткості встановлюється відповідно до певних норм [9]: труба із незначним нальотом іржі (150 мікрон), оцинкована труба (130 мікрон), труба покрита накипом (1250 мікрон) тощо.

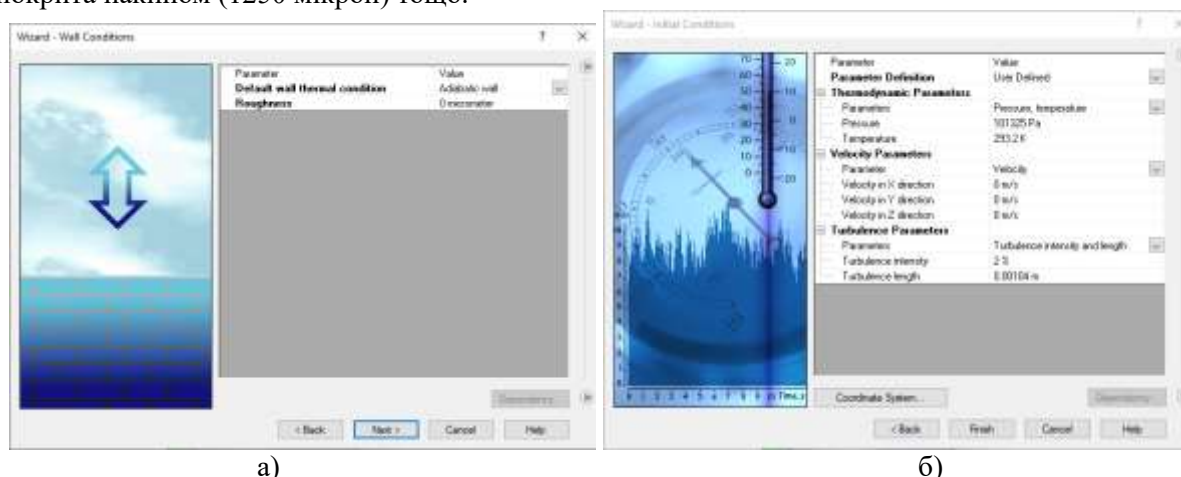


Рисунок 4 – Вікно Flow Simulation Wizard: а) Wall Conditions; б) Initial Conditions

7. Параметр «Thermodynamic Parameters» (рис.4,б). Дозволяє налаштувати основні термодинамічні характеристики потоку, такі як тиск, температура та густина. SolidWorks Flow Simulation надає можливість користувачу обрати початкові або граничні умови для тиску (p), температури (T) і густини (ρ), щоб відобразити реальні умови експлуатації УЗВ. На даному етапі налаштування CFD-аналізу, йде мова саме про початкові умови – вони визначають початковий стан цих термодинамічних параметрів (тиск, температура та густина) у всій області тривимірного макету на старті моделювання, а також впливають на подальший розвиток і динаміку потоку. Користувач задає їх як константи або як залежні від інших змінних (наприклад, температура може змінюватись з часом).

8. Параметр «Velocity Parameters» (рис.4,б). Визначає початковий розподіл швидкості рідини чи газу у просторі (у трьох ортогональних напрямках – X , Y і Z). Варіанти цього параметра: Velocity in X direction (швидкість у напрямку X), задає компоненту швидкості уздовж осі X для всіх точок області моделювання; Velocity in Y direction (швидкість у напрямку Y), задає компоненту швидкості уздовж осі Y для всіх точок області моделювання; Velocity in Z direction (швидкість у напрямку Z), задає компоненту швидкості уздовж осі Z для всіх точок області моделювання. Користувач може вказати окремі значення для кожної компоненти швидкості (X , Y , Z). Значення можуть бути однаковими для всієї області моделювання або змінюватися залежно від просторових координат.

9. Параметр «Turbulence Parameters» (рис.4,б). Надає користувачу кілька компонентів, що визначають початкові умови турбулентного потоку. Це дуже важливі компоненти для моделювання турбулентності в рідині або газі, оскільки вони впливають на точність і стабільність

результатів CFD-аналізу. Компоненти цього параметру:

1. Turbulence Intensity (інтенсивність турбулентності, I), визначає рівень турбулентних флуктуацій швидкості у відсотках від середньої швидкості потоку. Інтенсивність турбулентності 5 % означає, що турбулентні коливання швидкості складають 5 % від середньої швидкості потоку. Це важливий компонент для моделювання обтікання тіл і внутрішніх потоків.

2. Turbulence Length (довжина турбулентності, L), є характеристичною довжиною найбільших вихорів у турбулентному потоці. Якщо довжина турбулентності становить 0,1 м, це означає, що найбільші турбулентні вихори мають розмір приблизно 0,1 м. Важливий компонент для визначення масштабу турбулентних структур у потоці при моделюванні турбулентного розпаду і переміщенні вихорів.

3. Turbulence Energy (енергія турбулентності, k) характеризує кінетичну енергію турбулентних флуктуацій швидкості. Ця енергія вимірюється в Джоулях на кілограм (J/kg) і є мірою інтенсивності турбулентних рухів у потоці. Даний компонент встановлює початок розподілу енергії турбулентних флуктуацій у k-ε і k-ω моделях турбулентності.

4. Turbulence Dissipation (дисипація турбулентності, ε) характеризує швидкість розсіювання енергії турбулентності до менш масштабних вихорів і в'язкої дисипації. Вимірюється в квадратних метрах за секунду в кубі (m^2/s^3) і визначає, як швидко турбулентна енергія переходить у внутрішню енергію через в'язке розсіювання. Даний компонент встановлює початок розподілу дисипації турбулентної енергії в моделях турбулентності, що враховують процеси розсіювання енергії.

Проблема, яка виникає при виборі цих компонентів, полягає в тому, що користувач має можливість вибрати їх значення як по-замовчуванню, так і власноручно розрахувати [10]. Flow Simulation додатково групує ці компоненти в дві моделі турбулентності, з такими значенням по-замовчуванню [2]:

I-L модель (I = 2 %; L – визначається автоматично за розміром тривимірного макету);

k-ε модель (k = 1 J/kg (m^2/s^2); ε = 1 W/kg (m^2/s^3)).

В таблиці 1 зібрано всі параметри налаштування SolidWorks Flow Simulation на етапі «Set Up a Flow Simulation Project» та їх варіанти встановлення.

Таблиця 1 – Параметри налаштування SolidWorks Flow Simulation

№	Назва параметра	Варіанти
1	Analysis type	Internal, External
2	Physical Features	Fluid Flow, Conduction, Time-dependent, Gravity, Rotating, Free Surface
3	Fluids	Gases, Liquids, Non-Newtonian Liquids, Compressible Liquids, Real Gases, Steam
4	Flow Type	Laminar, Laminar and Turbulent, Turbulent
5	Default Wall Thermal Condition	Adiabatic Wall, Heat Flux, Specified Temperature, Heat Transfer Rate
6	Roughness	Roughness
7	Thermodynamic Parameters	тиск, температура, густина
8	Velocity Parameters	Velocity in X direction, Velocity in Y direction, Velocity in Z direction
9	Turbulence Parameters	Turbulence Intensity, Turbulence Length, Turbulence Energy, Turbulence Dissipation

Приклад підбору параметрів налаштування SolidWorks Flow Simulation для моделювання двоканального хордового ультразвукового витратоміра. Продемонструємо підбір описаних вище параметрів налаштування SolidWorks Flow Simulation на конкретному прикладі. Розглянемо випадок моделюванні впливу кута розташування місцевого опору (МО) «два 90° коліна в різних площинах» [9] по відношенню до двоканального хордового УЗВ газу на відстані 0D (рис.5). Параметри налаштування SolidWorks Flow Simulation для цього прикладу наведені в таблиці 2.

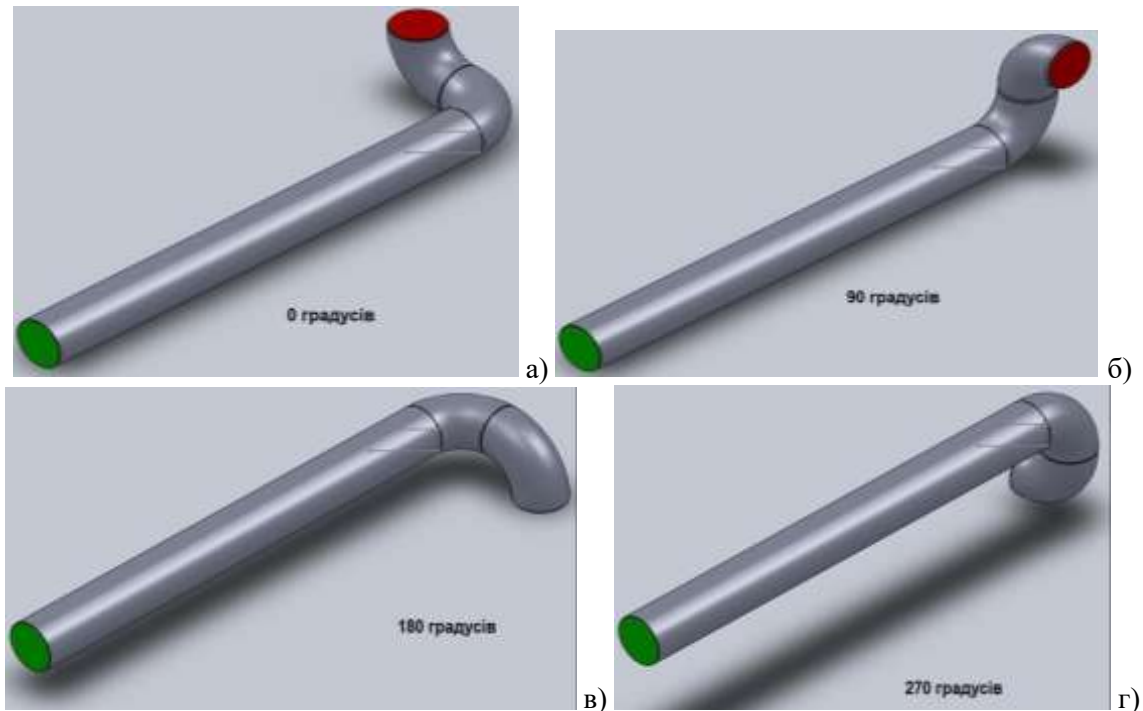


Рисунок 5 – Кут встановлення МО «два 90° коліна в різних площинах» відносно УЗВ:
а) 0°; б) 90°; в) 180°; г) 270°

Таблиця 2 – Приклад налаштування SolidWorks Flow Simulation при моделюванні УЗВ

№	Назва параметра	Значення
1	Analysis type	Internal
2	Physical Features	Fluid Flow
3	Fluids	Gases: Air (повітря)
4	Flow Type	Laminar and Turbulent
5	Default Wall Thermal Condition	Adiabatic Wall
6	Roughness	Roughness = 0 мікрон
7	Thermodynamic Parameters	$p = 101325$ Па, $T = 293,2$ К, ρ – визначається автоматично, і відповідає густині обраного типу газу ($\rho_{\text{повітря}} = 1,204$ кг/м ³)
8	Velocity Parameters	0 м/с, 0 м/с, 0 м/с
9	Turbulence Parameters	$k = 1$ J/kg (м ² /с ²), $\epsilon = 1$ W/kg (м ² /с ³)

Наведемо інші параметри SolidWorks Flow Simulation про які не було сказано в цій роботі, але які важливі для подальшого CFD-аналізу (згідно рис.1) [2, 10, 11]:

- дроблення базової розрахункової сітки на рівні 7 (Initialize the Mesh);
- граничні умови на внутрішніх поверхнях кришок тривимірного макету (Insert Boundary Conditions): масова витрата в діапазоні 0,0013...0,2175 кг/с на вході та статичний тиск 101325 Па на виході;
- акустичні канали УЗВ розміщені на відстані $0,5 * R = 25$ мм відносно осі потоку.

Обробка результатів CFD-моделювання виконується на базі отриманих масивів значень швидкості (u) та густини потоку для всієї множини точок базової розрахункової сітки вздовж імітаторів двох хордових АК УЗВ (рис.8).

Відносна похибка відтворення (вимірювання) витрати двоканального хордового УЗВ газу розраховується за формулою $error = 100(q_{m,CFD} - q_{m,et})/q_{m,et}$, де $q_{m,et}$ – еталонне значення масової витрати, яке вказано на внутрішній поверхні «кришки» тривимірного макету, а $q_{m,CFD}$ – масова витрата УЗВ розрахована як $\pi R^2(w_1 u_{L1} \rho_{L1} + w_2 u_{L2} \rho_{L2})$, де u_{L1} , u_{L2} та ρ_{L1} , ρ_{L2} – усереднені швидкість та густина потоку вздовж АК1 і АК2, отримані за результатами CFD-моделювання. Вагові коефіцієнти АК УЗВ w_1 та $w_2 = 0,5$, а $R = 50$ мм, ϵ внутрішнім радіусом ВТ.

Результати CFD-моделювання похибки $error$ для різних кутів встановлення МО «два 90° коліна в різних площинах» відносно УЗВ наведено на рис.6.

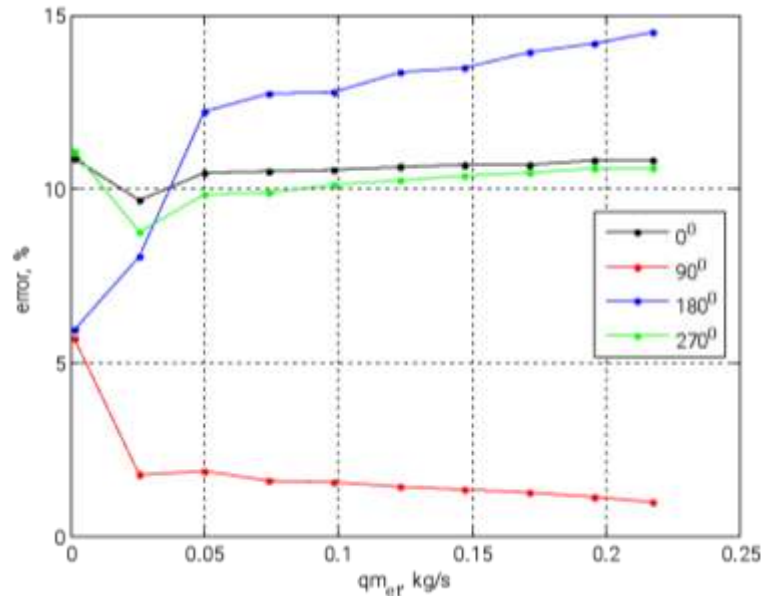


Рисунок 6 – Залежність похибки еггог відносно витрати та кута встановлення МО «два 90° коліна в різних площинах» відносно двоканального хордового УЗВ на відстані 0D

Як видно з рисунку 6, двоканальний хордовий УЗВ особливо чутливий до спотворень структури потоку на низьких витратах (швидкостях потоку). Орієнтація МО «два 90° коліна в різних площинах», а отже структури спотвореного потоку, значною мірою впливає на його похибку і мають такі характеристики впливу: похибки кутів 90 та 180° майже ідентичні за значенням, але протилежні за знаком; похибки кутів 0 та 270° однакові за знаком і за значенням. Зі збільшенням швидкості потоку, вплив спотворень стабілізується, і стає незмінним при одній і тій самій відстані між МО і УЗВ – в цьому, конкретному випадку, це відстань в 0D.

Висновки та подальші дослідження. В роботі детально розглянуто параметри налаштування CFD-паketу SolidWorks Flow Simulation та варіанти їх встановлення. Наведено конкретний приклад підбору параметрів налаштування Flow Simulation для моделювання похибки вимірювання витрати двоканального хордового УЗВ в умовах спотворення структури потоку. Подальша наукова робота, в контексті описаної в роботі тематики, вимагає досліджень впливу варіативності параметрів налаштування Flow Simulation на точність та якість моделювання УЗВ. До прикладу, як впливатиме неадіабатична стінка тривимірного макету на результати моделювання УЗВ, адже такі умови краще наближені до реальних умов експлуатації такого типу витратомірів.

Інформаційні джерела

1. ISO 17089-1:2010 Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, 2010.
2. J. Matsson, An introduction to SolidWorks Flow Simulation 2023. SDC Publications, 2023.
3. Комп'ютерне моделювання руху повітряних потоків у циклонах / Є. М. Лютий, Л. О. Тисовський, А. В. Ляшеник, В. І. Полоз // Науковий вісник НЛТУ України, 16(7), 2006. – С.143-150. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2006/16_7/143_Liutyj_16_7.pdf
4. Батлук В. А., Василів Р. М., Батлук В. В. Дослідження аеродинаміки принципово нової конструкції апарата за допомогою комп'ютерного моделювання. Наукові записки (Українська академія друкарства), 2(14), 2008. С.108-115.
5. Заболотний К. С., Жупієв О. Л., Косенко Ю. О. Розробка методики повірочних розрахунків дискових затворів з використанням пакетів SolidWorks Flow Simulation і SolidWorks Simulation. Віснику машинобудування та транспорту, 2017. С.49-57. <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/article/view/95>
6. Роман В. І., Прокопів В. О. Алгоритм побудови тривимірного макету ультразвукового витратоміра для його CFD-аналізу. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», 53, 2023. С.300-308. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-44>
7. Shaw C. T. Using computational fluid dynamics. Prentice Hall International, 1992.

8. T. Staubli, B. Luscher, F. Senn, M. Widmen “CFD optimized acoustic flow measurement and laboratory verification”, in Proc. International conference “Hydraulics, Water Resources, Coastal and Environmental Engineering (HYDRO-2007)”, Granada, Spain, 2007.

9. Пістун С. П., Лесовой Л. В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів : Видавництво ЗАТ «ІЕОЕ», 2006. 576 с.

10. Roman V., Matiko F., Kostyk I. Investigation of turbulence parameters influence on the results of CFD modeling of flow in an ultrasonic flowmeter. Journal of Energy Engineering and Control Systems, 7(1), 2021. pp.73-78. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2021.01.073>

11. Матіко Ф. Д., Роман В. І., Масняк О. Я. Особливості налаштування CFD-програм для підвищення ефективності моделювання витратомірів. Журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів», 9(4), 2017. С.97-104. <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i4.827>

Roman V., Masnyak O., Kostyk I.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SOLIDWORKS FLOW SIMULATION SET UP PARAMETERS FOR SIMULATING ULTRASONIC FLOW METERS

The article thoroughly examines the parameters for configuring the computer package SolidWorks Flow Simulation at the "Set Up a Flow Simulation Project" stage of the generalized CFD analysis procedure and their setup options. Additionally, the article provides a specific step-by-step example of selecting SolidWorks Flow Simulation parameters for modeling the measurement error of a two-path chordal ultrasonic flowmeter caused by the influence of flow structure distortion (velocity profile) - a typical task when researching this type of flowmeter. Based on the example, it is shown that the installation angle of the pipe fitting "two 90° bends in different planes" relative to the two-path ultrasonic flowmeter significantly affects the flow measurement error, especially at low flow velocities. As the velocity increases, the flow measurement error of the ultrasonic flowmeter stabilizes and almost does not change its value.

Key words: ultrasonic flowmeter, computational fluid dynamics, set up parameters, SolidWorks Flow Simulation, flow measurement error

УДК 625.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-20

Федосов С. А., Захарчук Д. А., Глушпенко А.

Луцький національний технічний університет

ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ GPS

У даній роботі проведено критичний аналіз останніх досліджень і публікацій, пов'язаних з системою глобального позиціонування (GPS), розглянуто і описано основні принципи функціонування GPS. Детальний аналіз найвідоміших (найцитованіших) публікацій авторитетних світових науковців демонструє широкий спектр прикладного застосування GPS, а також способи можливого використання для розв'язку проблем в недалекому майбутньому. Приладобудування фізичного світу через великі мережі бездротових сенсорних вузлів, особливо для програм, таких як моніторинг навколишнього середовища, вимагає, щоб ці вузли були дуже малими, легкими, неприв'язаними і непомітними. Проблема локалізації, де даний вузол фізично розташований у мережі, є складною, але надзвичайно важливою для багатьох із цих програм. Високі витрати на збір даних для багатьох застосувань у науках про Землю посилюються віддаленістю та недоступністю багатьох польових об'єктів, що робить недоцільними дешевші, більш портативні геодезичні платформи (наприклад, наземне лазерне сканування або GPS).

Ключові слова: система глобального позиціонування, публікації, застосування, приладобудування.

Постановка проблеми. Протягом усієї історії існування людей, визначення поточного місцезнаходження, було справою не з простих. Особливо, якщо знаходишся в незнайомому місті, чи навіть країні. Сьогодні з цим набагато легше, адже появились системи глобального супутникового позиціонування – від англ. *Global Position System* (GPS).

Глобальна система позиціонування GPS є невід'ємною частиною нашого сучасного світу, використовується в найрізноманітніших галузях, починаючи від навігації транспортних засобів і закінчуючи геодезією та науковими дослідженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прибережна зона південно-східного Техасу завдяки своєму унікальному географічному розташуванню та геологічним характеристикам стикається з низкою геологічних проблем, таких як осідання ґрунту, затоплення та берегова ерозія. У дослідженні [1] намагаються оцінити останні випадки осідання ґрунту і пов'язану з ними швидкість, зосереджуючись на розумінні їх наслідків для затоплення. Використовуючи Persistence Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR), у цьому дослідженні використовуються дані супутника Sentinel-1 SAR із спостереженнями на низхідній орбіті з січня 2020 року по березень 2023 року. Результати показують, що як північно-західні, так і східні регіони Х'юстона були досліджені з розрахованою швидкістю до 2 см/рік. Ця тенденція узгоджується з даними, отриманими за допомогою GPS і вимірювань рівня ґрунтових вод. Пропагуючи інтеграцію вимірювань InSAR, GPS і підземних вод, дослідження [1] прагнуло зробити цінний внесок у зм'якшення небезпеки, пов'язаної з просіданням і повеннями, у зоні південно-східного Техасу.

Дослідження [2] підкреслило цінність дрібномасштабних досліджень пересування таких видів, як морські черепахи, які рідко спливають на поверхню, завдяки здатності GPS-міток зберігати і повторно завантажувати дані. Автори використали GPS-мітки, здатні заповнювати дрібномасштабні локації, щоб задокументувати моделі пересування черепах-головарів у прибережній бухті на північному заході Флориди, США. Пов'язані з іридієм GPS-мітки були розміщені на черепахах у нерітичному місці пошуку їжі на північному заході Флориди. Після фільтрації телеметричних даних розташування точок було перетворено на лінії руху, а потім об'єднано з вихідним файлом точок, щоб визначити маршрути та оцінити швидкість руху. Майбутнє використання цих тегів може стати потужним інструментом для кращого розуміння дрібномасштабних моделей пересування морських черепах.

Супутникове навігаційне визначення місця розташування стало незамінним компонентом повсякденного життя, де точне визначення та швидка конвергенція мають вирішальне значення для надання своєчасної та точної інформації про місцезнаходження. Однак через демпфування цілочисельної неоднозначності та системних залишкових помилок швидка конвергенція впровадження точного позиціонування точки (*Precise Point Positioning* (PPP)) є серйозною проблемою. Щоб вирішити цю проблему, у документі [3] пропонується новий метод точного

позиціонування точки з нульовою базовою фазою несучої фази (CZS-PPP) і його модель синтезу без іоносфери. Застосовуючи запропонований підхід CZS-PPP в окремих сценаріях, що включають BDS-3, GPS і налаштування подвійної системи, систематично перевірялась ефективність методу. Представлена методика CZS-PPP демонструє усунення цілочисельних неоднозначностей і ефективне придушення системних залишків у порівнянні зі звичайним методом. Запропонований підхід продемонстрував чудову продуктивність у різних системах, пропонуючи багатообіцяючий новий шлях для досягнення швидкої конвергенції PPP у BDS/GNSS.

Аналіз даних для оптимізації спортивних результатів і запобігання травмам становить величезний інтерес для спортивних команд і наукової спільноти. Однак спортивні дані часто рідкісні, і їх важко отримати через законодавчі обмеження, небажання ділитися та брак кадрових ресурсів, призначених для процесу обробки даних. Ці обмеження ускладнюють розробку автоматизованих систем для аналізу, які потребують великих наборів даних для навчання. Тому в [4] представлено SoccerMon, найбільший доступний сьогодні набір даних про футболістів, який містить як суб'єктивні, так і об'єктивні показники. SoccerMon може не тільки відіграти важливу роль у розробці кращих систем аналізу та прогнозування для футболу, але й надихнути подібні дії зі збору даних в інших сферах, які можуть отримати користь від суб'єктивних звітів спортсменів, інформації про місцезнаходження GPS та/або даних часових рядів загалом.

Мета роботи полягає в описі основних принципів функціонування GPS, аналізі ефективності і проблем використання, а також перспектив його подальшого ефективного і практичного застосування.

Викладення основного матеріалу. Розпочнемо з основних принципів функціонування системи глобального супутникового позиціонування. GPS складається з трьох основних сегментів. Супутниковий сегмент включає 24 супутники, які обертаються навколо Землі на орбіті. Точніше, вони розташовані саме на високій орбіті, приблизно на висоті 20 000 км. І це дозволяє їм охоплювати велику площу поверхні Землі. Управлінський сегмент включає наземні станції, котрі відомі як контрольно-коригувальні станції. Вони відповідають за керування та коригування супутників, а також за поширення точного часу. І останній, сегмент користувача. Він включає всі GPS-приймачі, які можуть отримувати сигнали від супутників, щоб визначати своє місцезнаходження.

Принцип роботи GPS базується на математичній концепції триангуляції. Приймачі, наприклад навігатори, отримують сигнали мінімум від трьох супутників, а потім використовують дані часових затримок для розрахунків, результати яких дають визначити відстані до кожного супутника. Супутники постійно надсилають нові сигнали, котрі містять інформацію про час відправки, тобто завжди оновлюють ці дані. Приймачі GPS фіксують час, коли отримують сигнал, і розраховують часову затримку між моментом відправки та моментом отримання сигналу. Кожна сигнальна хвиля, яка приходить від супутника, може бути розглянута як сферична хвиля, що поширюється у всіх напрямках від супутника. Таким чином, коли приймач отримує сигнал від трьох супутників, він може визначити своє місцезнаходження там, де сфери перетинаються. Так як сигнали потребують певного часу для того, щоб подолати відстань між супутником і приймачем, будь-які затримки у відправленні або прийманні сигналу можуть призвести до неточності у визначенні місцезнаходження. Для цього GPS-приймачі також можуть корегувати ці затримки, для досягнення більшої точності.

Застосовувати GPS можна в дуже широкому переліку сфер. Від простого особистого користування, застосування в наукових дослідженнях, і до над важливого військового. Далше буде саме про застосування навігаційних систем у різних сферах життя людей.

Станом на червень 2024 року у наукометричній базі Scopus відображено понад 160 тис. документів за період з 1944 до 2024 рр., пов'язаних з системою глобального позиціонування (рис. 1). Різке зростання публікацій з 90-их років XX ст., швидше за все, пов'язане з стрімким розвитком інформаційних технологій і широким застосуванням цифрових систем і у глобальному позиціонуванні.

У документі [5] представлено новий набір даних, отриманий з універсалу VW, для використання в дослідженнях мобільної робототехніки та автономного водіння. Автори записали сценарії дорожнього руху з частотою 10–100 Гц за допомогою різноманітних датчиків, таких як кольорові та сірі стереокамери з високою роздільною здатністю, лазерний сканер Velodyne 3D і високоточна інерціальна навігаційна система GPS/IMU. Різноманітні сценарії відображають реальні дорожні ситуації та варіюються від автомагістралей у сільській місцевості до міських сцен із багатьма статичними та динамічними об'єктами. Усі дані були відкалібровані,

синхронізовані та з мітками часу. Набір даних також містить мітки об'єктів у формі тривимірних треклетів, і надано онлайн-тести для стерео, оптичного потоку, виявлення об'єктів та інших завдань. Загалом, у документі [5] описано платформу запису, формат даних і утиліти, які надають автори.

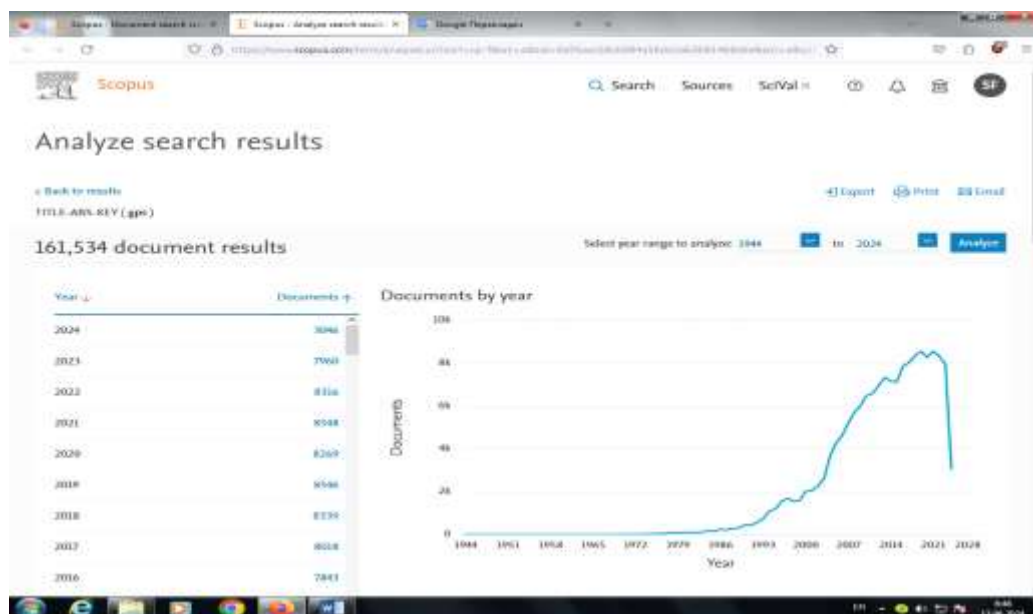


Рисунок 1 – Кількість публікацій за роками, пов'язаних з системою глобального позиціонування

Приладобудування фізичного світу через великі мережі бездротових сенсорних вузлів, особливо для програм, таких як моніторинг навколишнього середовища, вимагає, щоб ці вузли були дуже малими, легкими, неприв'язаними та непомітними. Проблема визначення того, де даний вузол фізично розташований у мережі, є складною, але надзвичайно важливою для багатьох із цих програм. Такі практичні міркування, як невеликий розмір, обмеження факторів, вартості та потужності вузлів, перешкоджають покладанню на GPS усіх вузлів у цих мережах. У статті [6] розглянуто методи локалізації та оцінки ефективності дуже простого методу вимірювання зв'язку для локалізації у зовнішньому середовищі, який використовує властиві цим пристроям можливості радіочастотного зв'язку. Фіксована кількість опорних точок у мережі з областями покриття, що перекриваються, передають періодичні сигнали маяків. Вузли використовують просту метрику зв'язності, яка більш стійка до примх навколишнього середовища, щоб зробити висновок про близькість до даної підмножини цих контрольних точок. Вузли локалізуються до центроїда своїх найближчих опорних точок. Тоді точність локалізації залежить від відстані між двома сусідніми контрольними точками та діапазону передачі цих контрольних точок. Початкові експериментальні результати показують, що точність для 90 % точок даних знаходиться в межах однієї третини відстані поділу.

Мережі з десятків до сотень постійно працюючих точних приймачів GPS виникають у просторових масштабах від 100 до 103 км. Щоб обчислювальне навантаження, пов'язане з аналізом таких даних, було економічно доцільним, один із підходів полягає в тому, щоб спочатку визначити точні позиції супутника GPS і поправки годинника з глобально розподіленої мережі приймачів GPS [7]. Потім дані з локальної мережі аналізуються шляхом оцінки параметрів, специфічних для приймача, за допомогою даних, специфічних для приймача; параметри супутника утримуються фіксованими на своїх значеннях, визначених у глобальному рішенні. Це «точне позиціонування точки» дозволяє щодня аналізувати дані від сотень до тисяч сайтів за допомогою комп'ютерів із продуктивністю 40 Мфлопс, одержуючи результати, порівняні за якістю з одночасним аналізом усіх даних. Системи відліку для глобальних і мережевих рішень можуть бути вільними від спотворень, накладених помилковими довірчими обмеженнями на будь-які сайти.

Топографічна зйомка високої роздільної здатності традиційно пов'язана з високими матеріально-технічними витратами, тому збір даних часто передається спеціалізованим стороннім організаціям. Високі витрати на збір даних для багатьох застосувань у науках про Землю посилюються віддаленістю та недоступністю багатьох польових об'єктів, що робить

недоцільними дешевші, більш портативні геодезичні платформи (наприклад, наземне лазерне сканування або GPS). У документі [8] описано революційну, недорогу, зручну для користувача фотограмметричну техніку для отримання наборів даних високої роздільної здатності в діапазоні масштабів, яка називається «Structure-from-Motion» (SfM). Традиційні фотограмметричні методи електронного копіювання вимагають відомості про тривимірне розташування та положення камер або тривимірне розташування наземних контрольних точок, щоб полегшити триангуляцію та реконструкцію сцени. Навпаки, метод SfM вирішує позицію камери та геометрію сцени одночасно та автоматично, використовуючи дуже надлишкове коригування групи на основі відповідних функцій у кількох зміщених зображеннях, що перекриваються. Техніка SfM є значним прогресом у галузі фотограмметрії для застосування в геонауках. Результати та досвід показують, що SfM є недорогим, ефективним і гнучким підходом до зйомки складної топографії.

Авторами [9] розглянуто різні останні підходи до створення цифрових карт ґрунту на основі шарів даних географічних інформаційних систем (ГІС), відзначено деякі спільні риси і запропоновано загальну структуру для майбутнього. Обговорюються різні методи, які використовувалися або могли бути використані для встановлення кількісних зв'язків між властивостями або класами ґрунтів та їхнім «середовищем». Атрибути рельєфу, отримані з цифрових моделей рельєфу, та спектральні смуги відбиття із супутникових зображень використовувалися найчастіше, але є великий потенціал для нових шарів даних. Загальна структура, яку автори [9] називають методом *scorpan-SSPFe* (функція просторового прогнозування ґрунту з просторово автокорельованими помилками), є особливо актуальною для тих місць, де інформація про ґрунтові ресурси обмежена. Він базується на семи прогнозних факторах скорпану, узагальненні п'яти факторів Дженні. Нарешті обговорюються можливі застосування, проблеми та вдосконалення.

Однак, перше що спадає на думку при згадці про GPS, це навігатор в машині. Знаходити оптимальний шлях пункту призначення, отримувати інструкції з руху, уникати трафіку та інших перешкод на дорозі. Всі ці можливості нам дає система супутникового позиціонування. Також GPS використовують і в сфері логістики. Зокрема, для відстеження руху вантажних чи пасажирських засобів. Моніторингу поставок, планування маршрутів, та загальної оптимізації роботи транспортної системи.

Ще одна сфера вміщає в собі повітряну та морську навігацію. Точне визначення місцезнаходження суден і літаків, також є важливою та відповідальною задачею. Адже від цього залежить не тільки ефективність тих чи інших маршрутів цих транспортів, а і їхня безпека. І в геодезії з картографією GPS відіграє значну роль. Він банально спрощує дослідження в цих науках. Адже може визначити географічні точки, і робити це доволі точно. У свою чергу, це вже дозволяє картографам створювати точні карти, котрі потім будуть використовуватись в багатьох галузях.

Наступна сфера, не надто очевидна, однак, чи щодня користуємося результатами її дослідницької роботи. Метеорологія, саме системи супутникового позиціонування використовують у вимірюванні змін рельєфу, і моніторингу клімату та природних явищ. Крім цього, GPS використовують і для моніторингу землетрусів, та інших геологічних явищ, допомагаючи вченим розуміти природу цих явищ та передбачати їхні наслідки для людей і природи.

GPS також є важливою складовою системи навігації для військових цілей. Військові використовують GPS для розвідки, визначення місцезнаходження ворогів, навігації та координації військових дій.

Завершую це список найбільш побутове, загальноповсякденне використання. Наприклад, в смартфонах, спортивних годинниках, та інших електронних засобах, для трекінгу активності, місцезнаходження, геотування фотографій і в багатьох інших цілях.

Однією з можливостей навігаційних технологій, є розвиток інтерактивних систем навігації, що відкриють нові форми туризму. Це, наприклад, може включати в створення персоналізованих маршрутів, які враховують індивідуальні вподобання користувача та його історію маршрутів. Чому б нею не скористатися? Також можливі створення аудіо-гідів і віртуальних екскурсій, які би використовували GPS для автоматичного надання інформації про місцевість, прямо під час подорожі.

Висновки. Глобальна система позиціонування є одним із ключових інструментів у нашому житті, вона змінила спосіб, яким ми взаємодіємо зі світом. Від навігації транспортних засобів до наукових досліджень, GPS має безліч застосувань і продовжує розвиватися. І з кожним роком дає нам все більш точні та ефективні інструменти, які роблять наше життя все зручнішим.

Інформаційні джерела

1. Nur A., Nam B., Choi S., Kim Y. Monitoring of ground subsidence using PS-InSAR technique in the Southeast Texas (SETX) Region. *International Journal of Geo-Engineering*. 2024. Vol. 15, № 1. 13.
2. Lamont M., Slone D., Reid J., Butler S., Alday J. Deep vs shallow: GPS tags reveal a dichotomy in movement patterns of loggerhead turtles foraging in a coastal bay. *Movement Ecology*. 2024. Vol. 12, № 1. 40.
3. Cai C., Lv K., Cai Y., Wu M., Cheng L. A static precise single-point positioning method based on carrier phase zero-baseline self-differencing. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. 12590.
4. Midoglu C., Kjæreng Winther A., Boeker M., Riegler M.A., Halvorsen P. A large-scale multivariate soccer athlete health, performance, and position monitoring dataset. *Scientific Data*. 2024. Vol. 11, № 1. 553.
5. Geiger A., Lenz P., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: The KITTI dataset. *International Journal of Robotics Research*. 2013. Vol. 32, № 11. P. 1231-1237.
6. Bulusu N., Heidemann J., Estrin D. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications*. 2000. Vol. 7, № 5. P. 28-34.
7. Zumberge J., Heflin M., Jefferson D., Watkins M., Webb F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102, № B3. P. 5005-5017.
8. Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012. № 179. P. 300-314.
9. McBratney A., Mendonça Santos M., Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 2003. Vol. 117, № 1-2. P. 3-52.

Fedosov S., Zakharchuk D., Glushpenko A.
Lutsk National Technical University

PRINCIPLES OF OPERATION AND APPLICATION OF GPS

This paper critically analyzes recent research and publications related to the Global Positioning System (GPS), and discusses and describes the basic principles of GPS operation. A detailed analysis of the most famous (most cited) publications by reputable world scientists demonstrates a wide range of applications of GPS, as well as possible ways to use it to solve problems in the near future. Instrumentation of the physical and technical world through huge networks of wireless sensor nodes, in particular for problems such as environmental monitoring, requires that these nodes be very small, light, untethered, and unobtrusive. The problem of localization, where a given node is physically located in the network, is complex but extremely important for many of these applications. The high cost of data collection for many applications in Earth sciences is exacerbated by the remoteness and inaccessibility of many field sites, which makes cheaper, more portable geodetic platforms (e.g., terrestrial laser scanning or GPS) impractical.

Keywords: *Global Position System, publications, applications, instrument making.*

УДК 004.9: 007.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-21

Фетісенко С. В., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМІВ ГРУПОВОЇ ПОВЕДІНКИ РОБОТІВ

Робота присвячена дослідженню проблеми ефективної координації роботів для спільної роботи та розробці програмного забезпечення для управління групою роботів на основі механізмів групової поведінки. Розроблено програмне забезпечення для візуалізації результатів розподілу завдань для групи роботів використовуючи алгоритми СВАА та СВВА. Результати представлені для 2D та 3D варіантів. Проведено оцінку впливу параметрів та розміру завдань на групову поведінку роботів.

Ключові слова: мультироботні системи, групова поведінка, моделювання, СВАА, СВВА.

Постановка проблеми. Із запровадженням часткової автоматизації з використанням засобів керування та комп'ютерів із програмованою пам'яттю в 70-х роках, також відомої як третя промислова революція, використання автоматизації у виробничих процесах без втручання людини значно зросло. Одним із прикладів цього є роботи, які виконують запрограмовані послідовності без втручання людини. Тепер, із запровадженням четвертої промислової революції, також відомої як індустрія 4.0, виробничі процеси, які вже використовують комп'ютерні технології, об'єднані в мережу, у якій усі комп'ютери можуть обмінюватися відповідною інформацією.

Прикладом таких мереж є мережі автономних мобільних роботів. Застосування мобільних роботів розширилося від традиційних наземних завдань збору та доставки до повітряних, підводних і навіть космічних застосувань. Експлуатація таких засобів також розширилася від одного робота до систем з кількома роботами. У таких системах роботи повинні постійно спілкуватися з виробничими та складськими зонами, щоб точно знати, коли транспортувати певний матеріал до певного місця на виробництві.

Актуальність проведення дослідження проблеми ефективної координації роботів для спільної роботи обумовлена сучасними викликами у галузі робототехніки та автоматизації. Зростання зацікавленості у використанні груп роботів для вирішення різноманітних завдань вимагає розвитку ефективних механізмів групової поведінки. Групова поведінка роботів має стратегічне значення для підвищення продуктивності та функціональності робототехнічних систем.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження кооперативних багатоагентних роботів акцентуються на трьох ключових аспектах: типах агентів (як однорідні, так і неоднорідні), архітектурі керування (реактивна, пошук консенсусу та гібридна) і комунікації (неявна і явна). Вибір і розробка архітектури керування та зв'язку мають визначальне значення для забезпечення ефективної координації між агентами, враховуючи їх збалансовану взаємодію та поведінку [1].

Централізоване і розподілене управління – це два підходи до управління багатьма агентами. У централізованому контролі глобальна інформація використовується для розрахунку шляху, траєкторії та позицій агентів [2].

Інформація може бути передана агентам через відповідне середовище зв'язку, що є перевагою, оскільки агенти можуть отримувати інформацію від центрального процесора. Проте головна проблема централізованого контролю полягає в тому, що зі збільшенням кількості агентів обчислення стають надто великими, оскільки є лише один централізований процесор, що керує всією системою. Велике обчислення, час і енергоспоживання призводять до проблем. Таким чином, для вирішення цього, запропоновано гібридний підхід [2, 3], який збалансовує централізоване та розподілене управління [4].

Розподілений контроль виявився масштабним, адаптивним, гнучким і надійним в області багатьох агентів як у статичному, так і в динамічному середовищі. У розподіленому управлінні головна проблема полягає в ефективному та надійному розподілі завдань між неоднорідними агентами, що є складнішим порівняно з однорідними агентами.

Обмежений діапазон сприйняття та низька пропускну здатність є фізичними обмеженнями в розподіленому підході. З обмеженою локальною інформацією агент не може ефективно контролювати поведінку групи.

Оскільки мультиагентні роботи повинні взаємодіяти та спілкуватися для ефективної співпраці, проблема досягнення консенсусу у вигляді узгодження між агентами стала важливим об'єктом дослідження протягом останніх років.

Управління формуванням є ключовим аспектом для координації та контролю групи мультиагентних роботів [5].

При розробці алгоритмів для формування мобільних роботів важливо враховувати численні аспекти, такі як стабільність структури, управління різними конфігураціями, забезпечення безпеки та врахування невизначеностей у розташуванні [5]. Додатково вказується на аспекти, пов'язані з генерацією структури, її перетворенням, визначенням та відслідковуванням, а також розподілом обов'язків у процесі створення.

Існує три основні стратегії управління формуванням, запропоновані дослідниками [5], такі як: на основі поведінки, віртуальна структура, лідер-підлеглий. Кожен метод управління формуванням має свої переваги та недоліки.

Метою роботи є розробка програмної системи для управління групою роботів на основі механізмів групової поведінки.

Викладення основного матеріалу. Для програмної реалізації алгоритму аукціону на основі консенсусу (СВАА) та алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) для розподілу завдань було обрано мову програмування Python.

За основу взято процедурний підхід до програмування, який передбачає розбиття коду на окремі функції. Цей підхід сприяє більшій модульності та організованості коду, що робить його зрозумілішим.

Алгоритм аукціону на основі консенсусу (СВАА) з графічним виводом. Алгоритм Cooperative Bargaining Auction Algorithm (СВАА) для розподілу завдань між роботами включає в себе кілька елементів, таких як ініціалізація списку роботів за допомогою СВАА агентів, створення повністю з'єднаної мережі та ітеративний процес аукціонування та узгодження.

Розглянемо алгоритм поетапно.

Перший елемент – ініціалізація СВАА агента включає початкову позицію агента та кількості завдань. Також створюються переліки в яких зберігається інформація про те, які завдання були призначені роботам, а також про виграшні ставки, які пов'язані з цими завданнями. Визначаємо початковий бал для кожного завдання на основі евклідової відстані.

Другий елемент – вибір завдання агентом на основі локальної інформації. Якщо агент ще не взявся за жодне завдання, він обирає завдання з більшим балом, ніж відповідна виграшна ставка. Після вибору завдання він позначає його як виконане та оновлює виграшну ставку для цього завдання.

Третій елемент – оновлення призначень завдань. Цей елемент оновлює призначення завдань на основі інформації про виграшні стави від сусідів, перевіряє можливе випередження та визначає переможця за оновленим списком виграшних ставок. Якщо агент не є переможцем, він звільняє призначення завдання. Після цього повертається інформація про те, чи збігся агент з попереднім станом призначення завдань.

Четвертий елемент – відправлення повідомлень. Повертає інформацію виграшних ставок агента.

Основна частина алгоритму – це аукціонування та узгодження розподілу завдань між роботами. Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму аукціону на основі консенсусу (СВАА) з графічним виводом у 2D варіанті для чотирьох роботів наведено на рисунку 1.

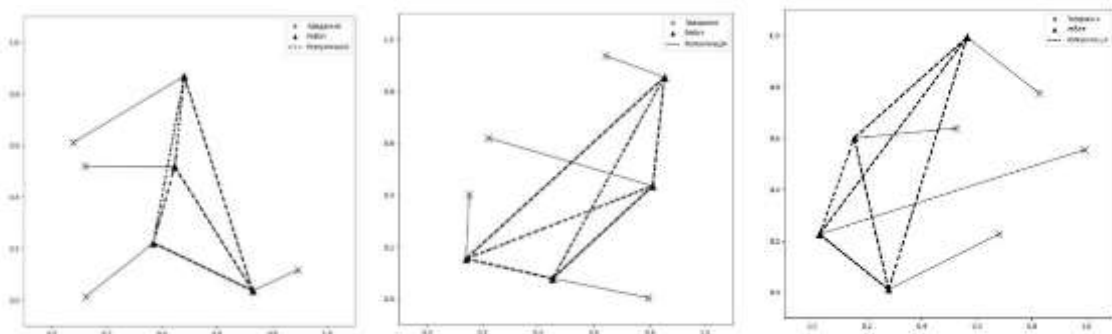


Рисунок 1 – Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму аукціону на основі консенсусу (СВАА) у 2D варіанті для чотирьох роботів

Основна різниця між 2D та 3D варіантами полягає у вимірах простору та кількості координат для кожного завдання та агента.

Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму аукціону на основі консенсусу з графічним виводом у 3D варіанті для чотирьох та шести роботів наведено на рисунку 2.

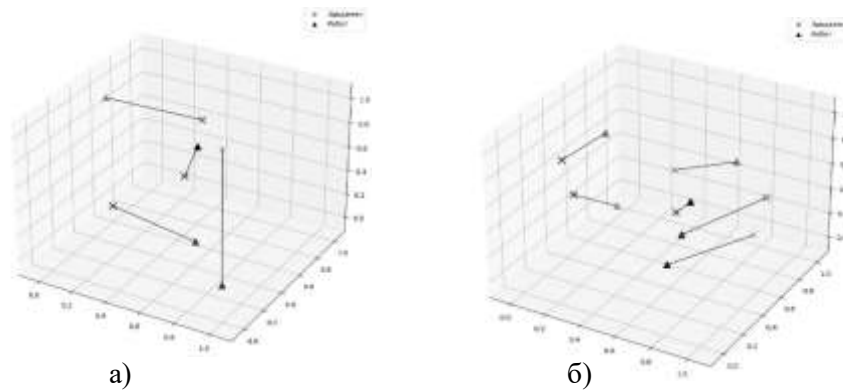


Рисунок 2 – Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму аукціону на основі консенсусу (СВАА) у 3D варіанті: а) чотири роботи; б) шість роботів

Алгоритм пакета на основі консенсусу (СВВА) з графічним виводом. Алгоритм Cooperative Bundle-Based Multi-Robot Task Allocation (СВВА) призначений для ефективного розподілу завдань між роботами у мультиагентних системах. Він включає такі основні етапи.

Перший етап – ініціалізація агента. На цьому етапі кожен агент у системі ініціалізується з унікальним ідентифікатором, швидкістю, кількістю завдань, які він може виконати, кількістю агентів загалом у системі та розміром бандлу (групи) завдань, який агент може взяти на себе одночасно. Під час ініціалізації формуються структури даних, такі як масиви з виграшними ставками, масиви для позначення виконаних та призначених завдань, що допомагають агентам в подальших обчисленнях та координації. Цей етап дозволяє створити початковий стан для кожного агента у системі, з урахуванням його характеристик та параметрів, необхідних для ефективного виконання завдань.

Другий етап – вибір завдань. На цьому етапі кожен агент вибирає завдання на основі локальної інформації та власної стратегії. Якщо агент ще не взявся за жодне завдання, він обирає те, що має більший бал, ніж відповідна виграшна ставка. Для кожного завдання агент має певний бал, який може бути визначений, наприклад, на основі евклідової відстані до завдання чи інших параметрів. Після вибору завдання агент позначає його як виконане та оновлює виграшну ставку для цього завдання. Цей етап допомагає агентам ефективно вибирати завдання для виконання з урахуванням їхньої власної локальної інформації та стратегій.

Третій етап – оновлення призначень завдань. На даному етапі агент оновлює призначення завдань на основі інформації, яку він отримав від інших агентів. Ця інформація включає в себе виграшні ставки, що були представлені сусідніми агентами за певні завдання. Агент перевіряє можливі випередження та визначає переможця за оновленим списком виграшних ставок. Якщо агент не є переможцем, він звільняє призначення завдання та повертає його в пул доступних завдань. Цей етап дозволяє агентам адаптуватися до змін в системі та узгоджувати свої дії з іншими учасниками з метою досягнення оптимального розв'язку.

Четвертий етап – відправлення повідомлень. На цьому етапі агент відправляє інформацію про свої виграшні ставки та виконані завдання сусіднім агентам. Ця інформація може включати в себе такі дані, як виграшні ставки за кожне завдання, список виконаних завдань та інші важливі параметри. Взаємодія та обмін інформацією між агентами є важливим елементом алгоритму СВВА і допомагає координувати їхні дії з метою досягнення оптимального розподілу завдань.

П'ятий етап – аукціонування та узгодження розподілу завдань між роботами. На цьому етапі запускається цикл, в якому відбувається процес аукціонування та узгодження. Кожен агент пропонує свою ціну за виконання певного завдання. Потім вони конкурують між собою, щоб визначити, хто отримає право виконати це завдання. Після визначення переможця, завдання призначається цьому роботу, і процес узгодження завдань продовжується з наступними завданнями та роботами. Інформація про оновлені призначення та виграші виводиться для аналізу. Після того, як всі роботи збіглися у розподілі завдань, алгоритм виходить з циклу.

Шостий етап – вивід результату. На завершальному етапі виводиться результат розподілу завдань між роботами.

Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) для дванадцяти завдань з графічним виводом у 2D варіанті для чотирьох роботів наведено на рисунку 3.

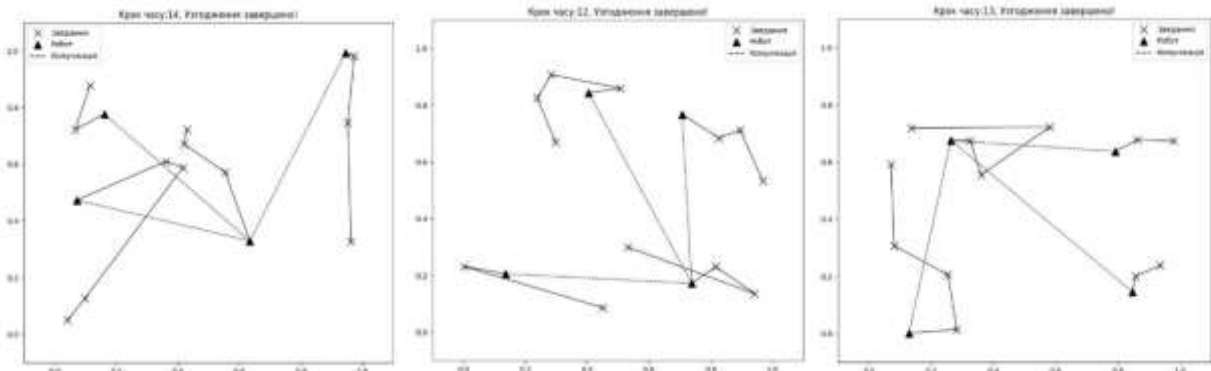


Рисунок 3 – Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) у 2D варіанті для чотирьох роботів

Основна різниця між 2D та 3D полягає у кількості координат для кожного завдання та агента.

Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) з графічним виводом у 3D варіанті для чотирьох роботів і шести, восьми, десяти та дванадцяти завдань наведено на рисунку 4.

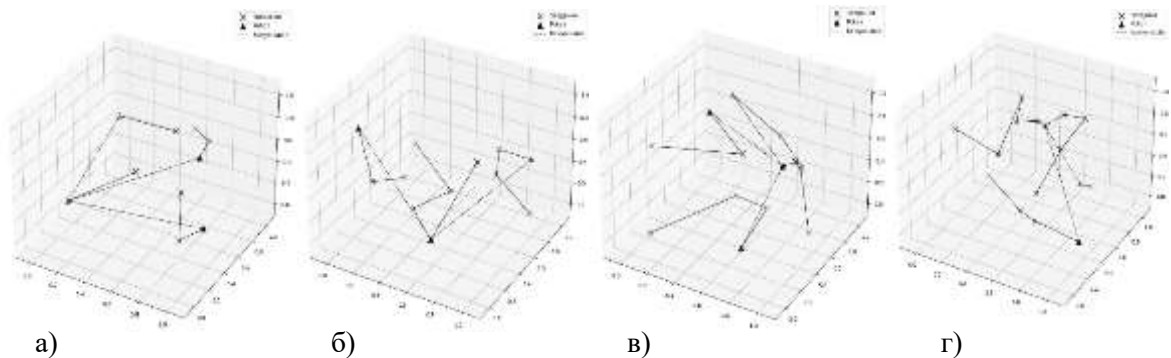


Рисунок 4 – Приклади роботи розподілу завдань з використанням алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) з графічним виводом у 3D варіанті для чотирьох роботів і а) шести завдань, б) восьми завдань, в) десяти завдань, г) дванадцяти завдань

Розглянуто вплив розміру завдань та параметрів на групову поведінку роботів за допомогою алгоритмів СВВА (Consensus-Based Bundle Algorithm) та СВВА (Consensus-Based Bundle Algorithm). Такий аналіз є важливим для оптимізації роботи алгоритмів та покращення їхньої ефективності в реальних умовах застосування.

Виконано програмну реалізацію алгоритму СВВА з різною кількістю роботів і завдань, коли кількість роботів дорівнює 50, 100, 150, 200, а кількість завдань дорівнює кількості роботів.

Визначено, що алгоритм СВВА має тенденцію збільшувати час виконання при збільшенні обсягу оброблюваних даних. Такий ріст може бути пов'язаний зі збільшенням обчислювальної складності алгоритму або збільшенням кількості операцій, які потрібно виконати для обробки кожного завдання.

Отримані дані описано за допомогою квадратичної регресії. Отримана регресія добре описує збільшення часу виконання алгоритму СВВА від кількості завдань і може використовуватись для прогнозування часу роботи алгоритму.

Виконано програмну реалізацію алгоритму СВВА для п'яти роботів з різною кількістю завдань, кількість завдань змінювали від 10 до 50 з кроком 10.

З форми отриманої залежності видно, що час розподілу збільшується зі зростанням кількості завдань. Зростання часу розподілу прискорюється, особливо при збільшенні кількості

завдань після певного значення (після 30 або 35). З огляду на це, припускаємо, що форма розподілу носить експоненціальний характер.

Отримане рівняння гарно описує те, як час роботи алгоритму СВВА змінюється зі збільшенням кількості завдань. Його можна використовувати для прогнозування часу роботи алгоритму залежно від кількості завдань.

Висновки. Таким чином, запропоновано програмну реалізацію двох алгоритмів на основі консенсусу: аукціону на основі консенсусу (СВАА) та алгоритму пакету на основі консенсусу (СВВА) для ефективного розподілу завдань у групі роботів (агентів). Результати роботи програм продемонстрували, що обидва алгоритми можуть бути успішно використані для розподілу завдань у децентралізованих системах з великою кількістю роботів (агентів). Проаналізовано вплив кількості завдань на час їх розподілу між роботами згідно алгоритмів СВАА і СВВА. Відзначено, що кількість завдань впливає на час роботи алгоритмів СВАА та СВВА, який збільшується зі збільшенням завдань. Зазначено, що для опису цього часу в алгоритмі СВАА підходить квадратична регресія, а для СВВА добре описує цю залежність експоненціальний розподіл.

Збільшення кількості завдань суттєво збільшує середній час виконання, що може вказувати на ускладнення пошуку компромісу між роботами. Проте кожна ітерація алгоритму СВВА призводить до зменшення кількості нерозподілених завдань, що свідчить про покращення координації та скорочення часу вирішення конфліктів, а отже, часу на кожну наступну ітерацію.

Отримані результати підтвердили ефективність розробленого алгоритму та його здатність адаптуватися до різних умов та вимог, що робить його потенційно корисним для широкого кола застосувань у реальних умовах.

Інформаційні джерела

1. Parker L-E. Heterogeneous Multi Robot Cooperation. URL: https://www.researchgate.net/publication/34328142_Heterogeneous_multi-robot_cooperation (дата звернення 20.05.2024).
2. Brunete A., Hernando M., Gamba E., Torres J.. A behavior based control architecture for heterogeneous modular, multi configurable, chained micro robots. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092188901200173X> (дата звернення 20.05.2024).
3. Simonin O., Grunder O. A cooperative multi robot architecture for moving a paralyzed robot. URL: https://www.researchgate.net/publication/228795153_A_cooperative_multi-robot_architecture_for_moving_a_paralyzed_robot (дата звернення 20.05.2024).
4. Franco M-L., Sanchez E., Alanis A. Franco C., Daniel N. Decentralized control for stabilization of nonlinear multi agent systems using neural inverse optimal control. URL: https://www.researchgate.net/publication/279517678_Decentralized_Control_for_Stabilization_of_Nonlinear_Multi-Agent_Systems_Using_Neural_Inverse_Optimal_Control (дата звернення 20.05.2024).
5. Chen Y., Wang Z. Formation control: A review and a new consideration. URL: https://www.researchgate.net/publication/224623514_Formation_control_A_review_and_a_new_consideration (дата звернення 20.05.2024).

Fetisenko S., Gumeniuk L.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF MECHANISMS OF GROUP BEHAVIOR OF ROBOTS

The article is devoted to the study of the problem of effective coordination of robots for joint work and the development of software for managing a group of robots based on group behavior mechanisms. The software for visualizing the results of task distribution for a group of robots using CBAA and CBBA algorithms was developed. The results are presented for 2D and 3D variants. The influence of parameters and task size on the group behavior of robots is evaluated.

Keywords: multi-robot systems, group behavior, modeling, CBAA, CBBA.

УДК 621.9.02

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-22

Швець С. В., Швець Р. С., Швець У. С.

Сумський державний університет

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА СИЛУ РІЗАННЯ

В статті виконане дослідження впливу швидкості деформування на змінювання сил опору. Відомо, що експериментальні точки не збігаються зі степеневою лінією тренду і така ситуація пояснюється похибкою експерименту. Аналіз результатів робіт, отриманих за різних умов різними дослідниками показав можливість синусоїдальної залежності сили різання від швидкості різання. Для перевірки такої гіпотези, проведено змінювання швидкості різання за рахунок змінювання діаметра оброблюваної деталі при незмінній частоті обертання шпинделя. Такий підхід виключає можливий вплив обертань деталей верстата. Отримані в такий спосіб під час точіння результати (значення сил різання) дозволили передбачити екстремальні значеннями функції. Вони не пов'язані з обертанням деталей верстата, що підтверджує вплив виключно швидкості деформування на синусоїдальну залежність сили опору.

Ключові слова: швидкість, деформація, сила, різання, синусоїда, залежність.

Постановка проблеми. Для формування емпіричних залежностей сил різання від параметрів режиму різання використовуються переважно степеневі вирази [1, 2, 10] виду

$$P_t = C_t \cdot t^x, P_s = C_s \cdot s^y, P_v = C_v \cdot v^z. \quad (1)$$

Проте експериментальні точки не завжди збігаються з лінією тренду, рис. 1, і така ситуація пояснюється похибкою експерименту. Експериментальні результати на рисунку 1 апроксимуються виразом $P = 430,11 \cdot v^{-0,044}$. Як видно, похибка, відхилення від лінії тренду, сягає майже 16%.

$v, \text{ м/с}$	$P, \text{ Н}$	Пох., %
0.07	506	4,7
0.11	489	3,2
0.23	469	2,2
0.29	405	10,8
0.46	375	15,7
0.58	394	10,5
0.72	494	13,2
0.92	450	4,3
1.15	469	9,8
1.82	431	2,9
2.3	469	13,1
2.63	431	4,6
4.6	375	6,7
5.76	366	8,1

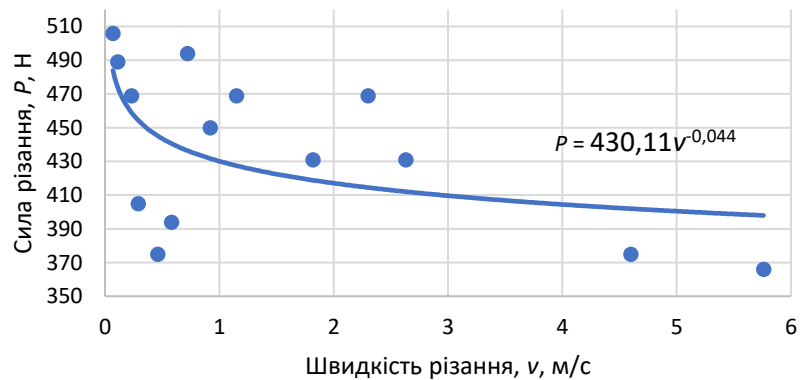


Рисунок 1 – Експериментальні значення головної складової сили різання сталі 40Х під час змінювання швидкості різання, $t = 1 \text{ мм}$, $s = 0,12 \text{ мм/об}$.

Отримані результати набагато точніше окреслюються залежністю

$$P = 436 + 70 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{0,59}\right), \quad (2)$$

показаною на рисунку 2. Тому виникає припущення про синусоїдальну залежність сили опору деформації від швидкості деформування.

Аналіз останніх досліджень. Для підтвердження цієї гіпотези проаналізовано результати робіт, отримані за різних умов різними дослідниками.

Ококріє І. Р. та Tartibu L. К. експериментально досліджували вплив швидкості різання при фрезеруванні титанового сплаву TI-6AL-4V-ELI [3]. Цей метал містить 89,69 % Ti, 6 % Al, 4 % V, 0,13 % O2. Швидкість різання змінювалася за зміни частоти обертання шпинделя n . Використовувалися три значення n (2000, 2500, 3000 об/хв) при трьох значеннях хвилинної подачі (150, 200, 300 мм/хв) та трьох значеннях глибини різання (0,3, 0,6, 0,9 мм), табл. 1.

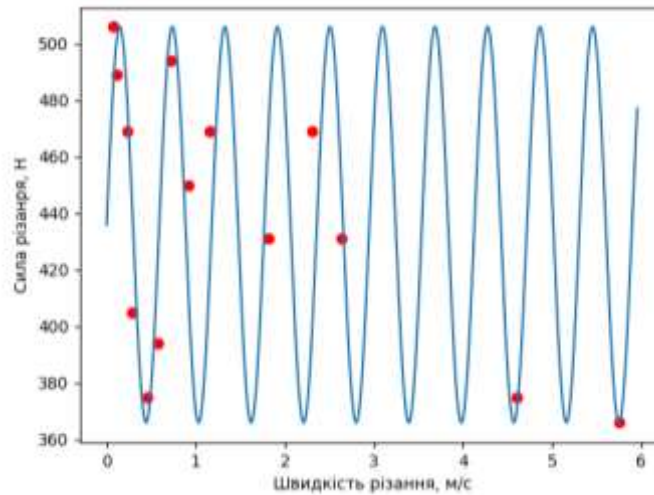


Рисунок 2 – Синусоїда через експериментальні точки

Таблиця 1 – Експериментальні результати сили різання під час обробки сплаву ТІ-6АL-4V-ЕLІ [3, табл. 6]

Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Глибина різання, мм	Сила різання, Н
200	150	0,3	80
200	200	0,6	65
200	300	0,9	56
2500	150	0,6	35
2500	200	0,9	75
2500	300	0,3	70
3000	150	0,9	58
3000	200	0,3	30
3000	300	0,6	75

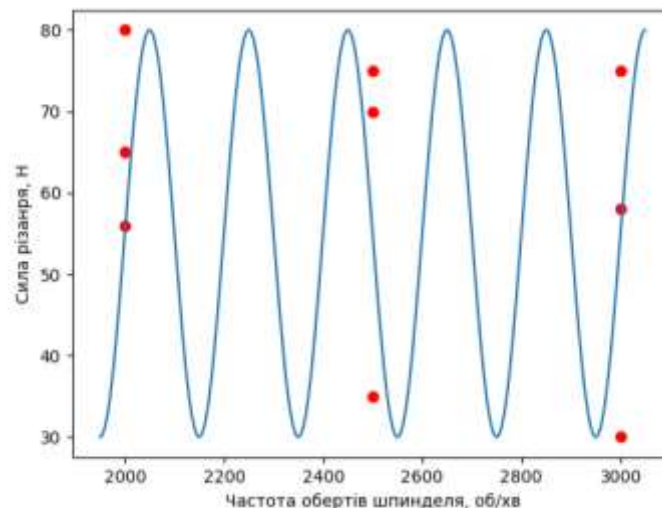


Рисунок 3 – Синусоїдальна залежність сили різання від частоти обертання шпинделя [3]

Сили різання при кожній частоті обертання шпинделя вимірювалися три рази, але використовувалися різні значення хвилинної подачі і глибини різання. Незважаючи на відмінності в площі зрізування при отриманні залежності експериментальних точок сили різання від кожної швидкості різання, вони досить близько розташовуються по відношенню до синусоїдальної кривої (3), рис. 3,

$$P = 55 + 25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{200}\right). \quad (3)$$

Thangarasu S. K., Shankar S., Thomas A Tony, Sridhar G. вимірювали сили різання при точінні заготовки з м'якої сталі для різних комбінацій швидкості різання, подачі та глибини різання [4]. Експерименти заплановані на основі конструкції Тагучі для створення емпіричної формули, табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність сили різання від частоти обертання шпинделя при різних значеннях

глибини різання та подачі [4, табл. 6.1, 10.1]

n , об/хв	S , мм/об	t , мм	P , Н	n , об/хв	S , мм/об	t , мм	P , Н
90	0,2	0,2	366,75	90	0,2	0,2	374,74
90	0,2	0,4	372,39	90	0,2	0,4	381,60
90	0,2	0,6	380,85	90	0,2	0,6	386,38
90	0,4	0,2	393,08	90	0,4	0,2	394,36
90	0,4	0,4	400,60	90	0,4	0,4	403,19
90	0,4	0,6	410,01	90	0,4	0,6	412,02
90	0,6	0,2	423,92	90	0,6	0,2	421,83
90	0,6	0,4	433,14	90	0,6	0,4	436,54
90	0,6	0,6	444,24	90	0,6	0,6	447,33
180	0,2	0,2	472,26	180	0,2	0,2	475,78
180	0,2	0,4	478,47	180	0,2	0,4	480,69
180	0,2	0,6	492,76	180	0,2	0,6	494,42
180	0,4	0,2	505,93	180	0,4	0,2	510,12
180	0,4	0,4	513,64	180	0,4	0,4	520,91
180	0,4	0,6	523,23	180	0,4	0,6	527,77
180	0,6	0,2	534,14	180	0,6	0,2	544,45
180	0,6	0,4	541,85	180	0,6	0,4	551,32
180	0,6	0,6	551,44	180	0,6	0,6	558,18
270	0,2	0,2	583,23	270	0,2	0,2	591,54
270	0,2	0,4	589,43	270	0,2	0,4	594,48
270	0,2	0,6	598,09	270	0,2	0,6	606,25
270	0,4	0,2	608,62	270	0,4	0,2	613,12
270	0,4	0,4	616,33	270	0,4	0,4	626,85
270	0,4	0,6	624,98	270	0,4	0,6	637,65
270	0,6	0,2	637,77	270	0,6	0,2	644,51
270	0,6	0,4	646,80	270	0,6	0,4	659,23
270	0,6	0,6	656,01	270	0,6	0,6	668,06

Тому в таблиці немає відомостей про вплив швидкості різання на сили різання при постійних подачі та глибині різання. У зв'язку з цим із таблиці 2 вибрані швидкості різання і відповідні значення сил різання при однакових значеннях площі зрізування, $S \cdot t$. Отримано такі залежності:

$$S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2, P = 452,6 + 159,52 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36,4}\right), \quad (4)$$

$$S \cdot t = 0,12 \text{ мм}^2, P = 509,31 + 128,4599 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right), \quad (5)$$

$$S \cdot t = 0,24 \text{ мм}^2, P = 534,62 + 124,61 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right), \quad (6)$$

$$S \cdot t = 0,36 \text{ мм}^2, P = 556,15 + 111,909 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right). \quad (7)$$

Залежність (4), при $S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2$, показана на рисунку 4.

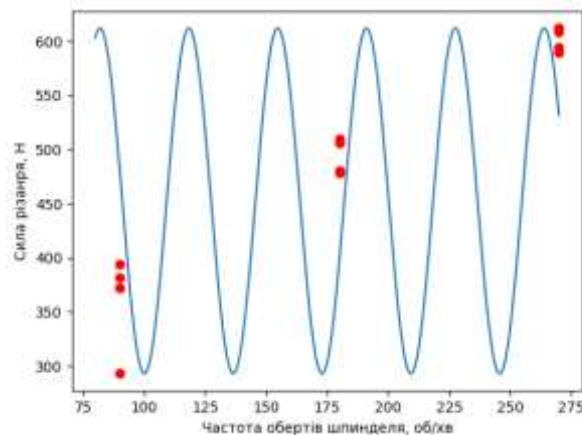


Рисунок 4 – Залежність сили різання від частоти обертання шпинделя [4] при площі зрізування $S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2$

Gunay M., Korkut I., Aslan E., Seker U. представили дослідження впливу швидкості різання на основну силу різання за різних значень переднього кута [5, табл. 4].

Таблиця 3 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних значень переднього кута [5, табл. 4]

Передній кут, γ°	Швидкість різання, v , м/хв				
	80	100	120	150	180
- 5	1676	1680	1658	1682	1665
-2,5	1666	1659	1652	1640	1658
0	1660	1654	1650	1643	1601
2,5	1618	1615	1614	1624	1600
5	1608	1610	1612	1617	1599
7,5	1605	1606	1608	1604	1597
10	1602	1600	1599	1596	1568
12,5	1568	1576	1569	1559	1577

Виконувалося точіння сталі AISI 1040. Основна сила різання вимірювалася для восьми різних передніх кутів в діапазоні від негативного до позитивного та п'яти швидкостей різання,

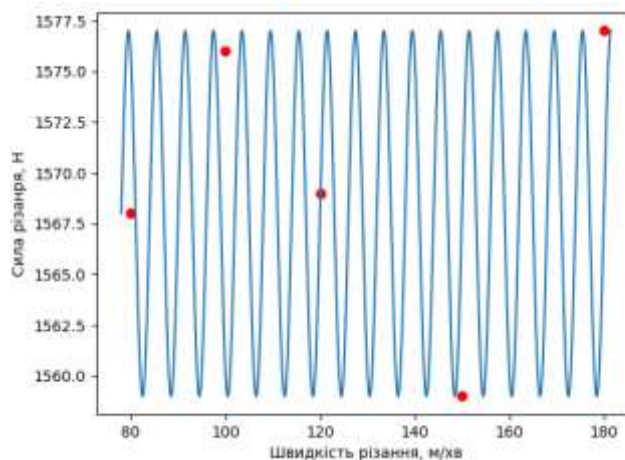


Рисунок 5 – Вплив швидкості різання на силу різання [5], формула (15)

при цьому глибина різання та подача залишалися постійними. Експериментальні точки залежностей сили різання від швидкості різання за різних значень переднього кута потрапляють на відповідну синусоїду (8) – (15), рисунок 5.

$$\gamma = -5, P = 1670 + 12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (8)$$

$$\gamma = -2,5, P = 1653 + 13 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (9)$$

$$\gamma = 0, P = 1630,5 + 29,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (10)$$

$$\gamma = 2,5, P = 1612 + 12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (11)$$

$$\gamma = 5, P = 1608 + 9 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (12)$$

$$\gamma = 7,5, P = 1602,5 + 5,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (13)$$

$$\gamma = 10, P = 1585 + 17 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (14)$$

$$\gamma = 12,5, P = 1568 + 9 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right). \quad (15)$$

Korkmaz M. E., Yasar N., Günaş M. провели експериментальне дослідження сил різання [6, рис. 6] при точінні жаростійкого сплаву Nimonic 80A, який містить 0,052 відсотка С, 0,06 Si, 0,02 Mn, 1,35 Al, 0,05 Co, 0,8 Fe, 2,43 Ti, 19,2 Cr і близько 70 відсотків Ni. Представлена в [6]

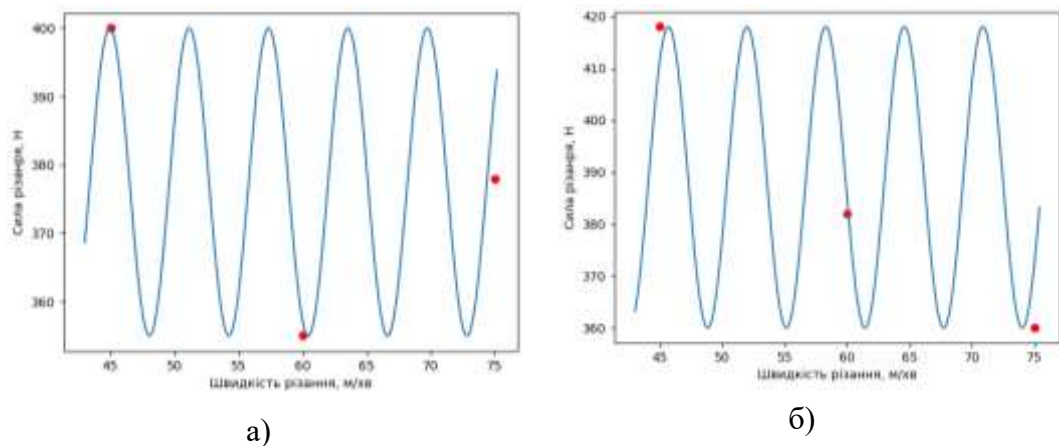


Рисунок 6 – Вплив швидкості різання на величину сил різання [6]:

$$a) t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 377,5 + 22,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right);$$

$$б) t = 1 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 389 + 29 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right)$$

гістограма відбиває вплив швидкості різання на сили різання при глибинах різання 0,5, 1 і 1,5 мм. За кожної з глибин призначалися подачі 0,1, 0,2, 0,3 мм/об. Вплив швидкості різання на сили різання апроксимується синусоїдальними кривими (16) – (23) та показано на рисунку 6.

$$t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 377,5 + 22,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right), \quad (16)$$

$$t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 498,5 + 13,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right), \quad (17)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 389 + 29 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (18)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 601,5 + 36,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (19)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 862,5 + 62,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,32}\right), \quad (20)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 525 + 25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (21)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 830 + 30 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (22)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 1157,5 + 37,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,32}\right). \quad (23)$$

Korkut I. та Mehmet B. визначили значення сил різання при точінні сталі AISI 1117 на верстаті з ЧПК Johnford TC35 [7, табл. 3]. Вимірювання виконані при швидкостях різання 50, 75, 100, 125, 150 м/хв для глибин різання 1 та 2 мм. При кожній призначеній швидкості різання та глибині різання використовувалися 5 подач: 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3 мм/об. Охолоджувальна рідина при випробуваннях не використовувалась. Через отримані експериментальні точки

залежності сили різання від швидкості різання з достатньою точністю проходить синусоїдальна крива (рис. 7) та результати експерименту апроксимуються формулами (24)-(33).

$$t=1 \text{ мм}, s=0,1 \text{ мм/об}, P = 255,5 + 27,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (24)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,15 \text{ мм/об}, P = 315,5 + 48,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (25)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,2 \text{ мм/об}, P = 326,5 + 52,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (26)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,25 \text{ мм/об}, P = 379,5 + 53,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (27)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,3 \text{ мм/об}, P = 448,5 + 34,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (28)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,1 \text{ мм/об}, P = 610,5 + 134,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (29)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,15 \text{ мм/об}, P = 866,5 + 126,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (30)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,2 \text{ мм/об}, P = 1070 + 190 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (31)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,25 \text{ мм/об}, P = 1156,5 + 216,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (32)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,3 \text{ мм/об}, P = 1331 + 255 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right). \quad (33)$$

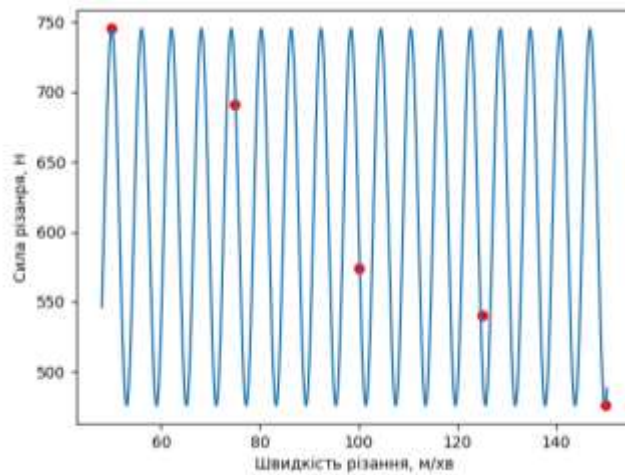


Рисунок 7 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за експериментом [7] при $t = 2 \text{ мм}$, $s = 0,1 \text{ мм/об}$,

$$P = 610,5 + 134,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right)$$

Ślusarczyk L., Franczyk E. досліджували вплив швидкості різання на сили різання при точінні титанового сплаву GRADE 2 [8] до складу якого входять 0,3 відсотка Fe, 0,08 C, 0,03 N, 0,25 O, 0,015 H відповідно до стандарту EN 10204-3.1. Експериментальні залежності представлені в таблицях 6, 9, 12 [8] апроксимовані формулами (34) - (42), одна з яких відображена на рисунку 8 та 9.

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0048.txt, P = 61,55 + 10,0499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,01}\right), \quad (34)$$

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0153.txt, P = 139,3 + 14,399 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (35)$$

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0249.txt, P = 225,7 + 58,6 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,95}\right), \quad (36)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0249.txt, P = 833,8499 + 8,4499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (37)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0153.txt, P = 576,15 + 2,35 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (38)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0048.txt, P = 207,7 + 28,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (39)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, P = 169,35 + 6,5499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (40)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t177-0153.txt, P = 386,75 + 17,55 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,95}\right), \quad (41)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file t177-0249.txt}, P = 569,75 + 9,75 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,93}\right). \quad (42)$$

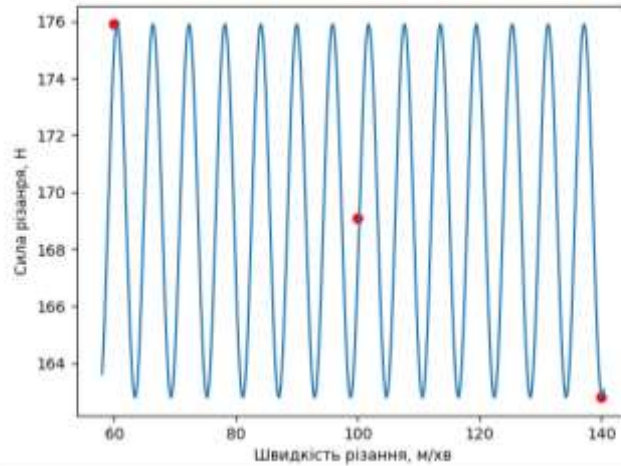


Рисунок 8 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [8, табл. 9] при $t = 1,77 \text{ мм}$, $s = 0,048 \text{ мм/об}$.

$$P = 169,35 + 6,5499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right)$$

Chuangwen X., Ting X., Xiangbin Y., Jilin Z., Wenli L., Hua yuan L. провели експериментальні випробування при різанні нержавіючої мартенситної сталі 1X13 твердосплавним інструментом з покриттям [2]. Використовувалася подача в межах $s = 0,05 - 0,085 \text{ мм/об}$ та глибина різання $t = 1,5 - 5 \text{ мм}$.

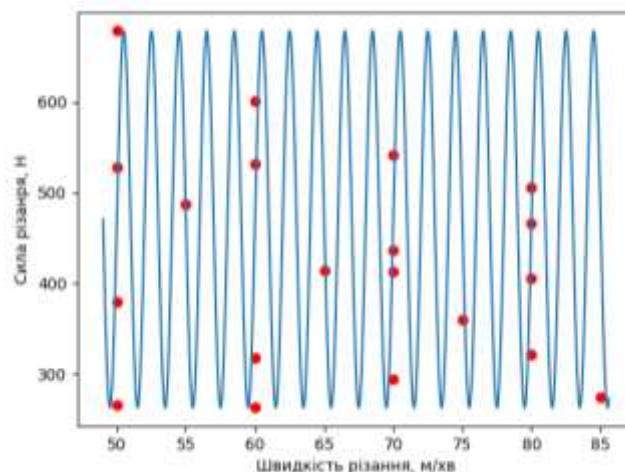


Рисунок 9 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [2, табл. 3]

Результати [2, табл. 3] апроксимуються, рис. 9, формулою

$$P = 470,5 + 207,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{2}\right). \quad (43)$$

Zoltan Iosif Korka Z., Micloşină C.-O., Sojocaru V. провели експериментальне дослідження сил різання при точінні металу [9]. При подачі $0,2 \text{ мм/об}$ та глибині різання $0,5 \text{ мм}$ швидкість різання змінювалася від $43,96$ до $175,84 \text{ м/хв}$ [9, табл. 2]. Результати апроксимуються, рисунок 10, формулою:

$$P = 399 + 61 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right). \quad (44)$$

Harun Gökçe виконав дослідження впливу швидкості різання на сили різання при фрезеруванні нержавіючої сталі Custom 450 [11].

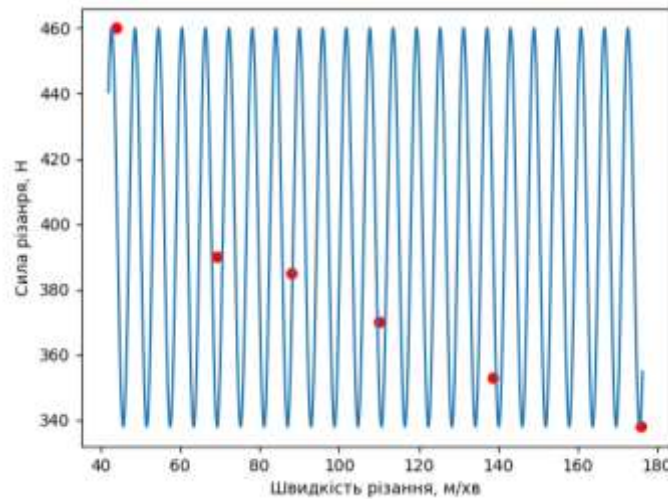


Рисунок 10 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [9, табл. 2]

Таблиця 4 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних подач [11, табл. 5]

v , м/хв	40	80	120	160	40	80	120	160
P , Н	311,2	308,8	306,1	325,5	315,4	287,3	334,7	315,6
s , мм/об	0,05	0,1	0,15	0,2	0,1	0,05	0,2	0,15
v , м/хв	40	80	120	160	40	80	120	160
P , Н	325,7	343,4	289,1	309,5	336,4	330,4	321,2	296,7
s , мм/об	0,15	0,2	0,05	0,1	0,2	0,15	0,1	0,05

При подачі $s = 0,05$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 299,25 + 11,95 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right). \quad (45)$$

Графік залежності (45) показаний на рисунку 11 а.

При подачі $s = 0,15$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 254,205 + 76,195 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,6}\right). \quad (46)$$

Графік залежності (46) показаний на рисунку 11 б.

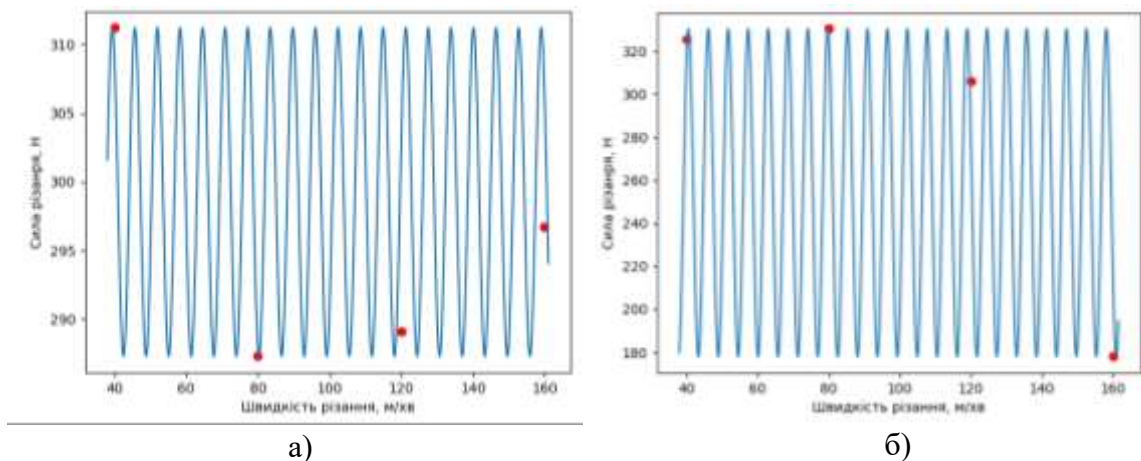


Рисунок 11 – Залежність сили різання від швидкості різання [11, табл. 5], а) $s = 0,05$ мм/об; б) $s = 0,15$ мм/об

При подачах $s = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 260,705 + 82,695 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,6}\right). \quad (47)$$

Графік залежності (47) показаний на рисунку 12.

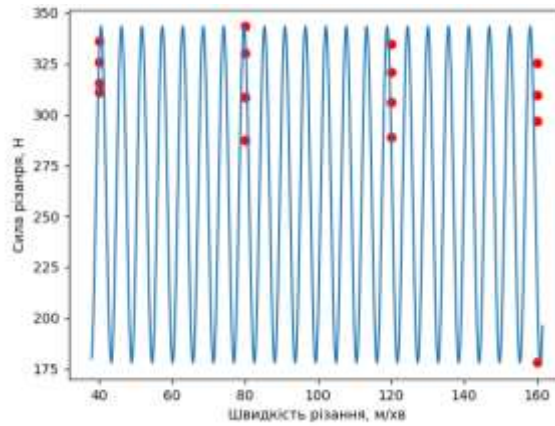


Рисунок 12 – Залежність сили різання від швидкості різання [11, табл. 5],
 $s = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ мм/об

Balasubramaniyan Singaravel, Thangiah Selvaraj експериментально досліджували сили різання при точінні сталі HSLA [12]. За різних подач, $s = 0,07; 0,15; 0,23$ мм/об, та глибин різання, $t = 0,5; 0,1; 1,5$ мм, визначалися сили різання залежно від швидкості різання, табл. 5. Залежність як формула

$$F = 536,5 + 279,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right). \quad (48)$$

Таблиця 5 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних подач і глибин різання [12, табл. 3]

v , м/хв	95	95	95	155	155	155	215	215	215
P , Н	379	429	816	312	414	507	262	364	402
s , мм/об	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23
t , мм	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	1	1,5	0,5
v , м/хв	95	95	95	155	155	155	215	215	215
P , Н	373	455	526	276	342	397	257	335	364
s , мм/об	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23
t , мм	1,5	0,5	1	1	1,5	0,5	1,5	0,5	1

Графік залежності (48) показаний на рисунку 13.

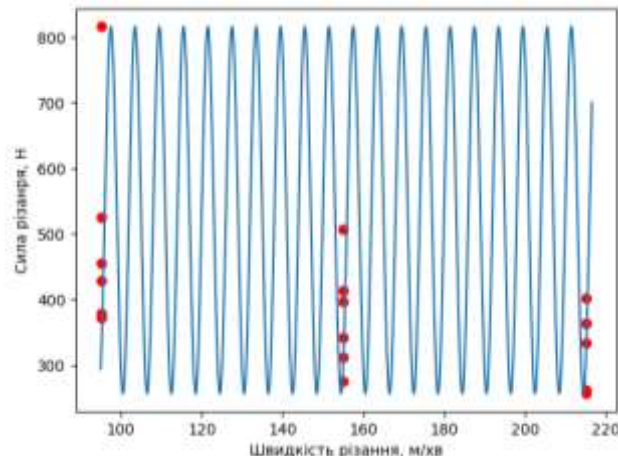


Рисунок 13 – Залежність сили різання від швидкості різання при різних подачах [12],
 $s = 0,07; 0,15; 0,23$ мм/об, та глибинах різання, $t = 0,5; 0,1; 1,5$ мм

Мета роботи - дослідження впливу швидкості деформування на поведінку сил опору.

Експериментальна перевірка гіпотези. Для підтвердження синусоїдальної залежності сил різання саме від швидкості деформування, проведено змінювання швидкості різання за рахунок змінювання діаметра оброблюваної деталі при незмінній частоті обертання шпинделя. Такий підхід виключає можливий вплив обертань деталей верстата.

За формулою (2), рисунок 2, визначені значення швидкостей різання, при яких можливі екстремальні значення функції. Швидкості різання, за яких можливі мінімальні значення сили різання на рисунку 2

$$v_{min} = v_0 + i \cdot p, \quad (49)$$

де $v_0 = 1,01$ м/с – найменше значення швидкості різання, якому відповідає мінімум функції (2) на графіку, рис. 2;

$i = 1, \dots, 7$ – порядковий номер і кількість мінімальних значень функції (2);

$p = 0,59$ м/с – крок залежності (2).

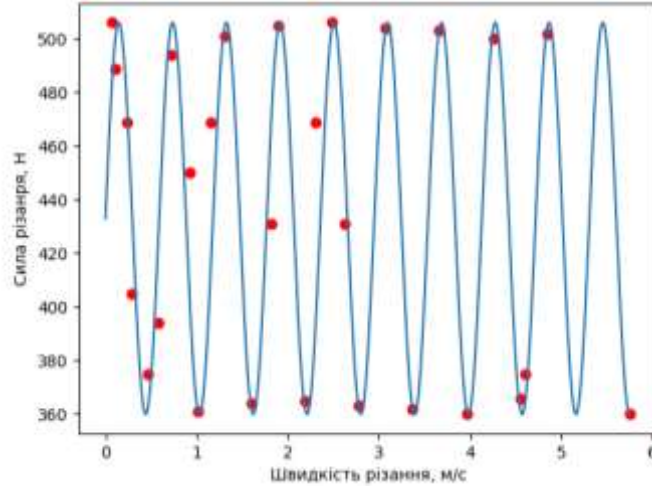


Рисунок 14 – Прогнозовані екстремальні значення функції (2) і рис. 2

За формулою (49) $v_{min} = 1,01; 1,6; 2,19; 2,78; 3,37; 3,96; 4,55$ м/с. На підстав цього, при частоті обертання шпинделя $n = 1250$ об/хв, визначені відповідні діаметри деталі, які забезпечать саме такі швидкості різання

$$d_{min} = (v_{min} \cdot 1000 \cdot 60) / (\pi \cdot n), \quad (50)$$

$$d_{min} = 15,432; 24,446; 33,461; 42,475; 51,49; 60,504; 69,519 \text{ мм.}$$

Значення швидкості різання, за яких можливі максимальні значення сили різання на рисунку 2

$$v_{max} = v_0 + i \cdot p + p/2, \quad (51)$$

За формулою (51) $v_{max} = 1,305; 1,895; 2,485; 3,075; 3,665; 4,255; 4,845$ м/с. Відповідні діаметри деталі, які забезпечать саме такі швидкості різання

$$d_{max} = (v_{max} \cdot 1000 \cdot 60) / (\pi \cdot n), \quad (52)$$

$$d_{max} = 19,939; 28,953; 37,968; 46,983; 55,997; 65,012; 74,026 \text{ мм.}$$

Отримані в такий спосіб під час точіння результати (значення сил різання) виявилися екстремальними значеннями функції (2), рисунок 14. Вони були спрогнозовані і не пов'язані з обертанням деталей верстата, що підтверджує вплив виключно швидкості деформування на синусоїдальну залежність сили опору.

Висновки. Проведені дослідження літературних джерел та експериментальні результати дозволяють зазначити:

1. Спостерігається синусоїдальна залежність сил опору деформування від швидкості деформації.
2. Екстремальні значення синусоїдальної функції можна передбачити.
3. Період синусоїди залежить від властивостей матеріалу, що обробляється.
4. При змінюванні подачі та глибини різання змінюється величина сили різання, рис. 3, 4, 12, 13, а період синусоїдальної залежності залишається незмінним.
5. Залежність не пов'язана з обертанням деталей верстата, а формується виключно швидкістю деформування.
6. На даний час немає задовільних пояснень такого явища, а тому неможливо надати рекомендації щодо практичного застосування встановлених фактів.

Інформаційні джерела

1. Dubovska, R.; Majerik, J. & Baska, I. Experimental measurement of cutting forces in the turning technology / DAAAM International scientific book 2012 pp. 255-266 Chapter 22
2. Chuangwen X., Ting X., Xiangbin Y., Jilin Z., Wenli L., Huaiyuan L. Experimental tests and empirical models of the cutting force and surface roughness when cutting 1Cr13 martensitic stainless steel with a coated carbide tool / Advances in Mechanical Engineering 2016, Vol. 8(10) 1-10, 2016, doi: 10.1177/1687814016673753
3. Okokpujie I., Tartibu L. Experimental analysis of cutting force during machining difficult to cut materials under dry, mineral oil, and TiO₂ nano-lubricant / Journal of measurements in engineering. december 2021, volume 9, issue 4.
4. Thangarasu S. K. , Shankar S., Thomas A Tony, Sridhar G. Prediction of Cutting Force in Turning Process-an Experimental Approach / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 310 (2018) 012119, doi:10.1088/1757-899X/310/1/012119
5. Gunay M., Korkut I., Aslan E., Seker U. Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force / Journal of Materials Processing Technology 166 (2005) 44–49, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.07.092
6. Korkmaz M., Yasar N., Günay M. Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy / Engineering Science and Technology, an International Journal 23 (2020) 664-673.
7. Korkut I., Boy M. Experimental Examination of Main Cutting Force and Surface Roughness Depending on Cutting Parameters / Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 54(2008)7-8, 531-538.
8. Łukasz Ślusarczyk, Emilia Franczyk. The experimental determination of cutting forces in a cutting zone during the orthogonal turning of a GRADE 2 titanium alloy tube / Technical transactions mechanics, 8(2019) doi: 10.4467/2353737XCT.19.088.10867.
9. Zoltan Iosif Korka Z., Micloșină C.-O., Cojocaru V. An Experimental Study of the Cutting Forces in Metal Turning / Analele universității “Eftimie murgu” reșita, anul XX, No. 2, 2013, p 25-32.
10. Kuzinovski, M., Trajčevski, N., Cichosz, P. Investigation of cutting forces during machining process by high speed turning, Journal of Production Engineering, Vol. 12, No.1, pp. 29-32.
11. Gökçe H. Experimental and numerical investigation of cutting forces and temperatures in milling of custom 450 steel / Archiwes of Metallurgy and Materials, 67 (2022), 3, pp. 843-853, doi: <https://doi.org/10.24425/amm.2022.139674>.
12. Balasubramanian Singaravel, Thangiah Selvaraj. Experimental investigation on cutting forces, specific cutting pressure, co-efficient of friction and shear energy in turning of HSLA steel / Management and Production Engineering Review, Volume 7, Number 1 (2016), pp. 71-76 doi: 10.1515/mper-2016-0008

Shvets S., Shvets R., Shvets U.

Sumy State University

INFLUENCE OF SPEED OF DEFORMATION ON CUTTING FORCE

In the article, a study of the influence of the deformation rate on the change in the resistance forces was carried out. It is known that the experimental points do not coincide with the power line of the trend and this situation is explained by the error of the experiment. Analysis of the results of work obtained under different conditions by different researchers showed the possibility of a sinusoidal dependence of the cutting force on the cutting speed.

To test this hypothesis, the cutting speed was changed by changing the diameter of the processed part at a constant spindle speed. This approach excludes the possible influence of rotations of machine parts. The results (values of cutting forces) obtained in this way during turning made it possible to predict the extreme values of the functions. They are not related to the rotation of the machine parts, which confirms the influence of only the deformation rate on the sinusoidal dependence of the resistance force.

Key words: speed, deformation, force, cutting, sinusoid, dependence.

**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 (290x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтитула 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 (Рис. 1. Схема ...) 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. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

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 або англійською мовами. Вартість публікації становить **70 грн.** за 1 сторінку.

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.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Здано у виробн. 30.12.2024 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 14. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.