

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2025-26

Збірник наукових праць

Випуск 26
(травень, 2025)

Луцьк 2025

УДК 004, 538, 616, 621, 681

Рекомендовано до друку науково-технічною радою Луцького національного технічного університету, протокол №12 від 23 травня 2025 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, травень 2025 р. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 110 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	Герайчук 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	Богущ Вісніцкі (Bogusz Wisnicki) , PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
11	Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek) , PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецинська морська академія, Poland.
12	Станіслав Іван (Stanislaw Iwan) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
13	Збігнев Матушак (Zbigniew Matuszak) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
14	Андрушак Ігор Євгенович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Луцький національний технічний університет, Україна.
15	Ткачук Анатолій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
16	Гулай Любомир Дмитрович , доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
17	Денисюк Віктор Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
18	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 комп'ютерної інженерії та безпеки, 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	Лишук 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	
Denysiuk V., Ptashenchuk V. METHOD OF CALIBRATION OF SINGLE-CHANNEL ELECTROCARDIOGRAPHS.....	6
Tatarchuk D., Didenko Yu., Poplavko Yu., Boikynia A., Tkachenko N., Oliinyk O. OPTICALLY SWITCHED LOGIC CIRCUITS.....	16
Гевко О. В., Паляниця Ю. Б. BLUETOOTH НАВУШНИКИ ІЗ МЕДИКО-ДІАГНОСТИЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ.....	21
Гевко Ів. Б., Стібайло О. Ю., Лещук Р. Я., Гупка А. Б., Гурик О. Я. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ШНЕКОВИХ СПІРАЛЕЙ ОСНАЩЕНИХ ЛОПАТЕВИМИ, РІЗАЛЬНИМИ ТА ПОДРІБНЮВАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	29
Гребьонкін Є. О., Заворотний В. Ф. МУЛЬТИСЕНСОРНІ ПЛАТФОРМИ НА ОСНОВІ МЕМС ДЛЯ АНАЛІЗУ ГАЗІВ.....	38
Громнюк С. І., Вергун В. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ СПОСОБОМ, ЯКИЙ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ З РІЗНИМИ НАПРЯМКАМИ ПОДАЧІ.....	51
Денисюк В. Ю. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	57
Дячун А. Є., Федоревич В. М., Грасовник В. Ю., Гинда Т. Ю., Деріш О. Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВКИ З НАВИВНИМИ СТРІЧКОВИМИ ПРУЖНИМИ ГВИНТОВИМИ ЗАТИСКНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	66
Луньов С. В. РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge	74
Мазур К. С. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОГЛИНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ.....	79
Сахнюк І. О., Федосєєва І. К., Битков М. Х. СТАНДАРТИЗАЦІЯ ПЕВНИХ ПОЛОЖЕНЬ У СФЕРІ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ....	88
Симонюк В. П., Божко К. М., Мушкет К. Я. ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ЯК ОСНОВА ДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЇЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК.....	93
Якимчук Н. М., Євсюк М. М. АДАПТИВНИЙ МОНІТОРИНГ КОГНІТИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ОБМЕЖЕНОЇ ВИДИМОСТІ ЦІЛІСНОСТІ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	98

UDC 615.47

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-1

Denysiuk V., Ptashenchuk V.

Lutsk National Technical University

METHOD OF CALIBRATION OF SINGLE-CHANNEL ELECTROCARDIOGRAPHS

The article describes the method of calibration of single-channel electrocardiographs, the measurement results of which determine medical treatment strategies for patients. Therefore, it is important that the device is accurate, because incorrect measurements can lead to incorrect diagnosis and subsequent complications. Ensuring the accuracy of electrocardiograph measurement results improves the reliability of medical conclusions, and timely calibration allows you to identify problems and eliminate them before serious problems arise. The methods and means of electrocardiograph calibration, the conditions for electrocardiograph calibration and preparation for it are considered. The method of electrocardiograph calibration is described.

Keywords: *electrocardiograph, calibration, error, diagnostics, accuracy, sensitivity, pulse, signal, recording.*

Problem statement. An electrocardiograph is one of the most important measuring instruments in medical practice for diagnosing and monitoring the cardiovascular system, which allows doctors to assess the electrical activity of the heart. This allows you to detect various disorders, such as arrhythmias, ischemic changes, hypertrophy of the heart muscles and other pathologies. Therefore, ensuring the accuracy of electrocardiographs and the reliability of measurements is critical for the correct diagnosis and treatment of heart diseases. Electrocardiographs are legally regulated measuring instruments and are therefore subject to mandatory verification. The inter-verification interval of electrocardiographs is regulated by the order of the Ministry of Economic Development of Ukraine dated October 13, 2016 No. 1747 «On approval of inter-verification intervals of legally regulated measuring instruments in operation by categories» and is one year [1].

Research problem. The quality, efficiency and safety of medical services provided to citizens in medical and preventive institutions largely depend on the technical condition of medical devices. The use of faulty medical devices leads to low efficiency of the procedure or incorrect diagnosis of the patient. Therefore, it is necessary to constantly monitor the accuracy of the equipment used in medical institutions, because the accuracy of the diagnosis and the correctness of treatment, and therefore the health and life of patients, directly depend on it [2].

Analysis of recent research and publications. Electrical potentials generated by living cells, organs and tissues of humans and animals are called bioelectric and are the subject of study of one of the large sections of modern electrophysiology. Since bioelectric potentials reflect subtle physiological processes in the body, any functional and pathological changes in the studied systems and organs affect their parameters and form. The need to record these changes arises in the study of life processes, diagnostics, treatment and prevention of diseases, monitoring the condition and working capacity of a person [3].

The electrocardiogram (ECG) of healthy people largely depends on their physique, age, conditions for recording bioelectric potentials and their registration. However, on the ECG curve, it is always possible to distinguish certain teeth and intervals that reflect the sequence of excitation of the heart muscle. In the event of diseases, the amplitude of the teeth and their duration, as well as the duration of the intervals between the teeth, can change significantly [4].

Electrocardiographs are verified in accordance with the requirements of DSTU 9202:2022 "Metrology. Electrocardiographs. Verification Methodology". The verification results are considered positive if their metrological and technical characteristics meet the requirements declared by the manufacturer. Positive results of the verification of a measuring instrument are certified by issuing a verification certificate. Verification of electrocardiographs ensures the quality of medical services and guarantees the accuracy of data, which meets modern standards and reduces risks for patients [5].

A modern electrocardiograph is a complex electronic device that has many technical characteristics. The quality of electrocardiography depends on the serviceability and accuracy of the electrocardiograph. One of the main parameters of the electrocardiograph is the sensitivity of the signal amplification path, the speed of movement of the recording medium and the amplitude-frequency characteristic. Modern electrocardiographs have regulated errors of sensitivity and speed at

the level of 5%. The amplitude-frequency characteristic affects the absence of distortions of the shape of the recorded cardiac signal curve. Electrocardiographs belong to legally regulated measuring instruments and therefore are subject to verification [6].

The purpose of the work is to develop a method for verifying single-channel electrocardiographs to ensure the accuracy of ECG measurement results and improve the reliability of medical conclusions.

Presentation of the main material. Single-channel electrocardiographs EK1K-01 with pen recording via copying tape onto chart paper are designed to measure the dependence of the difference in potentials of the electric field of the heart on time for the study and diagnosis of the state of the human cardiovascular system and establish methods and means of their primary and periodic verification.

The following operations should be performed during verification [5]:

- external inspection;
- testing;
- determination of metrological characteristics;
- determination of relative error of voltage measurement;
- determination of relative error of sensitivity setting;
- determination of relative error of recording medium speed setting;
- determination of relative error of time interval measurement;
- determination of transient characteristic emission;
- determination of common-mode signal attenuation coefficient;
- determination of internal noise level brought to the input;
- determination of recording hysteresis;
- determination of amplitude-frequency characteristic parameters;
- determination of time constant;
- determination of internal calibrator error;
- determination of input impedance;
- determination of sensitivity at additional input and its error;
- determination of sensitivity at additional output and its error.

When verifying electrocardiographs, the following verification tools should be used:

- DC source B5-43 with a voltage range of (0-10) V;
- special-form signal generator type GS-15 with a frequency range of (10-8-10-3) Hz and a voltage setting error of $\pm 3\%$;
- universal oscilloscope S1-68, in which the voltage measurement error in the sensitivity range from 2 mV/cm to 50 V/cm does not exceed 5%;
- electronic frequency counter type Ch3-36 with a frequency range from 10 Hz to 50 MHz and an error of $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ MHz;
- universal voltmeter type B7-16A with a measurement range of (10-4-103) V;
- ruler-500 with a measurement limit of 500 mm and a division value of 1 mm;
- caliper Shts-P- 250-0.05 GOST 166-89;
- voltmeter S-50/1 with a measurement limit of 15 V, accuracy class 0,5;
- reference microscope MPB-2 with a scale division value of 0,05 mm;
- voltage divider DNS-0 with a basic error of the division coefficient $\pm 3\%$;
- low-frequency signal generator G3-56/1 or G3-109 with a frequency range of 20 Hz-200 kHz.

It is allowed to use other, newly developed, or currently in use means of verification that have been certified by state bodies or, with their permission, departmental metrological services, with a measurement error not exceeding 1/3 of the permissible error of the specified parameter.

All verification operations, except those specifically stipulated, must be carried out at:

- ambient temperature $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- relative humidity $(60 \pm 15)\%$ at air temperature $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- supply voltage deviation from the nominal value $\pm 2\%$;
- atmospheric pressure $(101,3 \pm 4)$ kPa (750 ± 30) mm Hg).

The listed conditions are necessary for verification tools.

Before performing verification, install and prepare for operation the electrocardiograph being verified and the verification tools. Measuring tools used during verification must be designed in accordance with DSTU 9202:2022 «Metrology. Electrocardiographs. Verification Methodology».

When calibrating the electrocardiograph, unless otherwise specified, the following settings must be set:

- sensitivity – 10 mm/mV.
- recording medium feed speed – 25 mm/s.
- lead switch in position – «1».
- low-pass filter – off.

The signal to the electrocardiograph input should be supplied via the KEPEV-A cable TU 16-943.053-86.

External inspection. During the external inspection, the following are checked:

- the presence of a technical description for the electrocardiograph;
- the absence of signs of corrosion and noticeable mechanical damage;
- the presence of the completeness of the electrocardiograph being verified, which is being verified;

- the absence of damage to the lead cable and the additional input and output cable.

Testing. The electrocardiograph being verified is tested no earlier than 1 minute after it is turned on.

During the test, the following are checked:

- the presence of a recording line, when the record button is pressed; in this case, the recording line should be visible on the movable carrier;
- the presence of calibration signals, setting the sensitivity by pressing the calibration button and switching the sensitivity, in this case, calibration pulses of different magnitudes should be recorded on the record, depending on the set sensitivity.

Determination of metrological characteristics. The relative error of voltage measurement is determined when connecting to the electrocardiograph input the maximum values of the equivalent electrode impedances of the electrical equivalent of the object according to the scheme (Fig. 1) by recording test rectangular pulses of positive and negative polarity with a frequency of 1 Hz, which are fed to the electrocardiograph input via the KEPEV-A cable in any of the leads in the voltage range and values of the set sensitivity specified in Table 1 (switch S3 – in the open state, S4 – in position «2»).

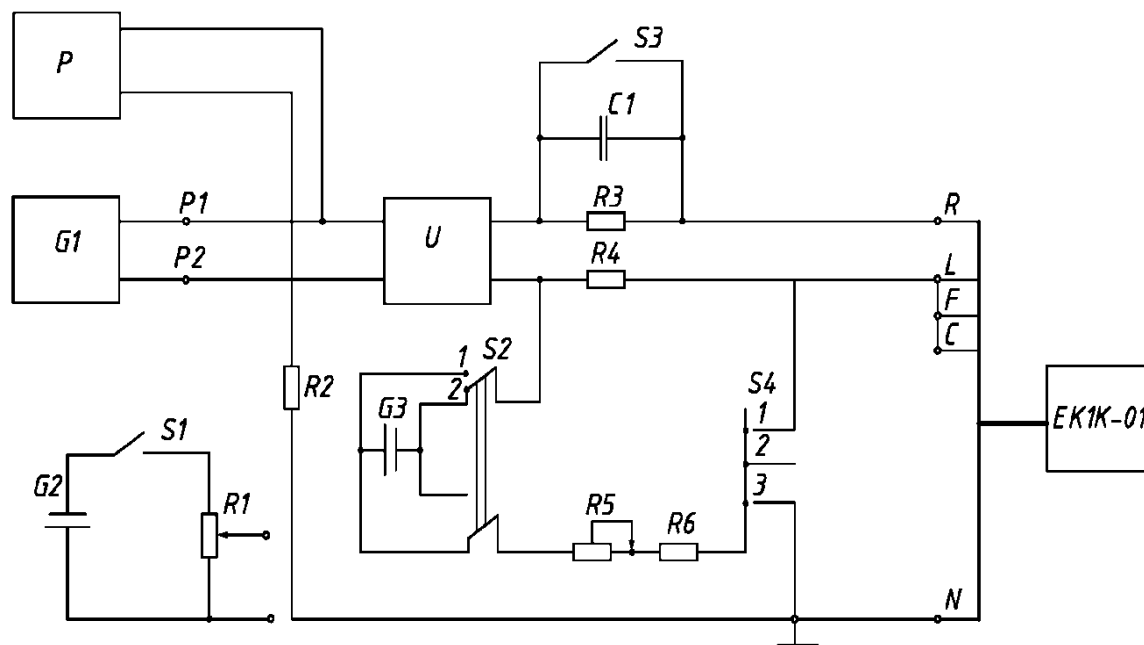


Figure 1 – Scheme for determining the voltage measurement error:

EK1K-01 – electrocardiograph under test; capacitor C1 – K73-9 100V-047 μ F, $\pm 10\%$; G1 – special-shaped signal generator G6-15; G1, G2 – DC power supply type B5-43; P – universal voltmeter type B7-16A. Resistors: R1 – SP4-1V-0,25-1 k Ω – A; R2 – S2-29V-0,25-100 Ω $\pm 0,4\%$ – 1,0 A; R3 – MLT-0,125-51 k Ω $\pm 5\%$; R4 – S2-29V-0,25-100 Ω $\pm 0,1\%$ – 1,0 A; R5 – SP4-1v-0,25-470 Ω – A; R6 – MLT-0,125-100 Ohm $\pm 5\%$; S1 – KMA1-1 button; S2 – P2T-1-1V switch, S3 – MT1 microtumbler; S4 – PR3P34 switch; U – DNS-0,1 voltage divider

The voltage divider U (Fig. 1) is used with a division ratio of 1:100, and pulses with an amplitude according to Table 1, but 100 times larger, with an allowable error of $\pm 1\%$ are fed to the input of the divider from the generator G1. The amplitude of the pulses is set by the compensation method, using an oscilloscope C1-68, a universal voltmeter of the B7-16A type and a DC power supply of the B5-43 type.

Table 1 – Voltage ranges and set sensitivity values

Set sensitivity mm/mV	Pulse amplitude at the electrocardiograph input, mV		
5	0,4		4
10	0,2		2
20	0,03	0,1	1

On the recording, the amplitude of the pulse image is measured without taking into account one width of the recording line.

The measurements are repeated with a differential supply to the leads of the lead cable and with a supply between the leads N and all other leads of the lead cable from the source G3 of a constant voltage of $\pm(300 \pm 15)$ mV. Switch S4 is in positions «1» and «3» at positions «1» and «2» of the switch S2. Switch S3 is in the open state.

The relative error of voltage measurement is determined by formula (1):

$$\delta_n = \frac{U_R - U_{in}}{U_{in}} \cdot 100, \quad (1)$$

where δ_n – relative error of voltage measurement, %;

$U_R = h_n / S_n$ – range of voltage measured by the electrocardiograph, mV;

U_{in} – range of voltage supplied to the input of the electrocardiograph, mV;

h_n – linear size of the range of the registered signal, mm;

S_n – nominal value of the set sensitivity, mm/mV.

The voltage measurement error should not exceed:

– $\pm 20\%$ in the range from 0,1 to 0,5 mV;

– $\pm 10\%$ in the range from 0,5 to 4 mV.

The image of the input signal of 0,03 mV should be visible on the recording medium. Repeat the measurement by swapping the wires R and L of the lead cable.

To check the upper value of the range of registered voltages (5 mV), the switch S4 is set to position «2», the DC power source G2 with resistor R1 and button S1 is connected to points P1 and P2 instead of the generator G1 in one and the other polarities. Resistor R1 is used to set the voltage at points P1 and P2 ($5 \pm 0,025$) V, using a voltmeter of type B7-16A.

With an electrocardiograph sensitivity of 5 mm/mV, shift the zero line position $\pm(15 \pm 1)$ mm and press the S1 button, record positive and negative pulses, respectively. The signal amplitude on the record should be (25 ± 3) mm.

Determination of the relative error of sensitivity setting. The relative error of sensitivity setting is determined by applying a sinusoidal signal with a frequency of 2,5 Hz and a amplitude of 2 mV to the electrocardiograph input, according to the scheme (Fig. 1) with an electrocardiograph sensitivity of 10 mm/mV. Record 5 periods of the input signal. The measurement is repeated for sensitivities of 20 and 5 mm/mV and input signals of 1 and 4 mV, respectively.

The relative error of sensitivity setting in percent is calculated by the formula (2):

$$\delta_s = \frac{S_m - S_{in}}{S_{in}} \cdot 100, \quad (2)$$

де $S_m = h_n / U_{in}$ – measured sensitivity value, mm/mV;

h_n – linear size of the recorded signal range, mm;

U_{in} – input voltage range, mV;

S_{in} – nominal value of the set sensitivity.

The sensitivity setting error should not exceed $\pm 5\%$.

Determination of the relative error of the recording medium speed setting. The relative error of the recording medium speed setting is determined according to the scheme (Fig. 1) by applying to the

electrocardiograph input a rectangular signal with a amplitude of 0.5 mV and a frequency of 2,5 Hz with a permissible deviation of $\pm 1\%$ at a sensitivity of 10 mm/mV and a media speed of 25 mm/s. The frequency setting is controlled by a frequency meter of the Ch3-36 type. At least 20 periods of the input signal are recorded (Fig. 2).

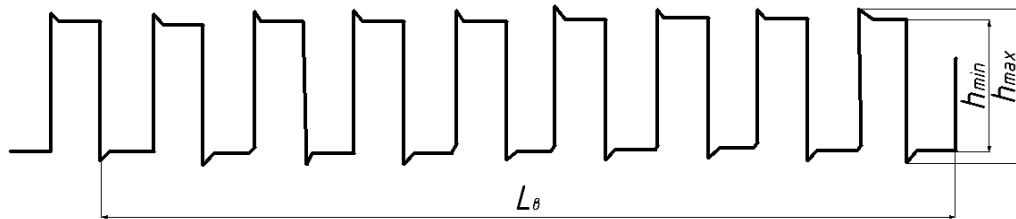


Figure 2 – Recording a rectangular signal

The relative error of the recording medium speed setting δ_v , in percent, is calculated by formula (3):

$$\delta_v = \frac{v_m - v_n}{v_n} \cdot 100, \text{ B}, \quad (3)$$

where $v_m = \frac{2L_m}{nT_n}$ – measured value of speed of movement of the recording medium, mm/s;

L_m – length of the recording section, mm, on which $n/2$ periods of the recorded signal fit;

n – number of half-periods of the recorded signal;

T_n – period of the signal supplied to the input of the electrocardiograph, s;

v_n – nominal value of the set speed of movement of the recording medium, mm/s.

Measurements and calculations are repeated at a speed of 50 mm/s with a test signal frequency of 5,0 Hz with a permissible deviation of $\pm 1\%$. The relative error in establishing the speed of movement of the recording medium should not exceed $\pm 5\%$ in any recording area.

Determination of the relative error in measuring time intervals. The relative error in measuring time intervals equal to 0,1; 0,5; 1,0 s is carried out at a speed of movement of the recording medium of 25 and 50 mm/s in accordance with this method and is determined by the formula (4):

$$\delta_i = \frac{T_m - T_{in}}{T_{in}} \cdot 100, \quad (4)$$

where δ_i – relative error of measurement of time intervals, %;

$T_m = L_m/v_n$ – measured time interval, s;

L_m – linear size of the section, records on which consist of n half-periods ($n = 1; 5, 10$);

v_n – nominal value of the set speed of movement of the recording medium, equal to 25 and (or) 50 mm/s;

$T_{in} = n/2F$ – time interval supplied to the input of the electrocardiograph, s;

F – signal frequency, Hz.

The relative error of measuring time intervals should not exceed $\pm 10\%$.

Determination of the overshoot on the transient characteristic. The overshoot is determined at a sensitivity of 10 mm/mV and a speed of movement of the recording medium of 50 mm/s in the middle position of the zero line. Test pulses with a amplitude of 1 mV and a frequency of 2,5 Hz are applied to the input of the electrocardiograph using this method with the switch S3 closed. The amplitude of the pulse image on the recording is measured (Fig. 3).

The overshoot on the transient characteristic is determined by the formula (5):

$$\delta_e = \frac{h_{\max}^e - h_{\min}^e}{2h_{\min}^e} \cdot 100, \quad (5)$$

where δ_e – the emission on the transient characteristic, %;

$h_{\max}^e, h_{\min}^e$ – the measured values of the linear dimensions of the recorded signal amplitudes with

and without the emission, respectively, mm (Fig. 2).

The emission on the transient characteristic should not exceed 10 %.

Determination of the attenuation coefficient of the common-mode signal. The attenuation coefficient of the common-mode signal is determined by applying a sinusoidal voltage with a frequency of 50 Hz to the electrocardiograph inputs through the electrical equivalent of the object (C3, R1 and R2, C3) according to the scheme shown in Figure 3, at all positions of the lead switch.

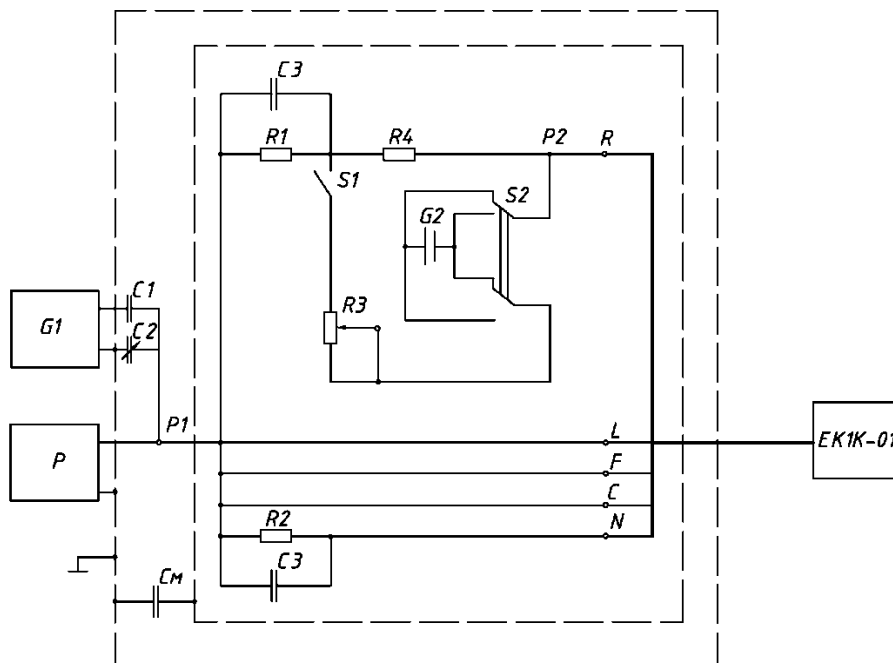


Figure 3 – Scheme for checking the attenuation coefficient of the common-mode signal:
 EK1K-01 – electrocardiograph being verified. Capacitors: C1 – KM-5b-M47-100 pF ± 10%;
 C2 – KPK-2-10-100 pF; C3 – K73-9-100 V-0,047 μF ± 10%; Cm – mounting capacitance;
 G1 – low-frequency signal generator G3-56/1; G2 – element 332 GOST 12333-74; P – voltmeter
 electrostatic system type C50/1. Resistors: R1 – MLT-0,125-51 kΩ ± 5%; R2 – MLT-0,125-51 kΩ ±
 5%; R3 – SP4-1B-0,25-470 Ohm-A; R4 – MLT-0,125-100 Ω ± 5%; S1 – MT1 micro-tumbler;
 S2 – P2T-1-1B switch

The capacitance C2 is adjusted so that at point P1 the voltage relative to ground is 10 V ± 5% with the cable disconnected from the electrocardiograph and the voltage at the output of the generator G1 set to 20 V ± 3%.

The attenuation coefficient of common-mode signals in different taps is checked by connecting the tap cable wires in series at point P2 (Fig. 3) in accordance with Table 2, and while simultaneously applying a constant voltage of ± 300 kV to the input. The constant voltage of ± (300 ± 15) kV is applied by closing the switch S1 and changing the position of the switch S2.

Table 2 – Tap switch positions when connecting the cable

Cable connection of leads that connect to point P2	Lead switch position
R	I – aVR
L	III – aVL
F	II – aVF
C	V
N	under all conditions

The attenuation coefficient of in-phase signals is determined by the formula (6):

$$K_c = \frac{V_c}{h_n} S_n \cdot 10^R, \quad (6)$$

where K_c – attenuation coefficient of common-mode signals;

V_c – voltage range at point P1 with the lead cable disconnected ($V_c = 2\sqrt{2} \cdot 10$), V;

h_n – linear size of the recorded signal range, mm/mV;

S_n – set sensitivity, mm/mV.

The attenuation factor of common-mode signals must be at least 28,000 in any lead.

Determination of the level of internal noise brought to the input. An electrical equivalent of the object is connected to the input of the electrocardiograph (Fig. 3), while the signal source is short-circuited. The level of internal noise is determined at a sensitivity of 20 mm/mV and a speed of 50 mm/s by directly measuring the track noise width on the recording for 10 s (defined as the excess of the zero line width without taking into account single emissions).

The level of internal noise, brought to the input, is determined by formula (7):

$$U_n = \frac{10^3 \cdot h_{mn}}{S_n}, \quad (7)$$

where U_n – internal noise level, brought to the input, μ V;

h_{mn} – linear dimension of the maximum noise amplitude measured on the record, excluding the width of the recording line (single emissions are not taken into account), mm;

S_n – nominal value of the set sensitivity, mm/mV.

The noise level brought to the input should not exceed 25 μ V. Determination of recording hysteresis. Recording hysteresis is determined by applying test rectangular pulses with a frequency of 0,5 Hz to the input of the electrocardiograph according to the scheme (Fig. 1) through a differential circuit consisting of a capacitor with a capacity of 0,5 μ F and a resistor of 100 k Ω . The differential circuit is switched on after the voltage divider. The pulse amplitude is 2 mV with a sensitivity of 10 mm/mV. The switch S3 is closed, S4 is in position «2». The hysteresis value λ is measured on the recording (Fig. 4) without taking into account one recording line width.



Figure 4 – Recording hysteresis

The recording hysteresis should not exceed 0,5 mm. Determination of the amplitude-frequency characteristics parameters. The amplitude-frequency characteristics parameters are determined by applying sinusoidal signals with an amplitude of 1 mV to the electrocardiograph input according to the scheme (Fig. 1) without applying a constant voltage to the input (switch S4 in position «2»). By changing the signal frequency from 0,1 to 75 Hz, the signal amplitude is maintained constant and a sinusoidal signal is recorded. The ratio of the linear size of the amplitude of the recorded signal at the i -th frequency to the linear size of the amplitude of the recording signal at a frequency of 10 Hz is determined by the formula (8):

$$\delta_F = \frac{A(f_i)}{A(f_0)} \cdot 100, \quad (8)$$

where δ_F – ratio of the linear size of the amplitude of the recorded signal at the i -th frequency to the linear size of the amplitude of the recorded signal at a frequency of 10 Hz, %;

$A(f_i)$ – linear size of the image range of a sinusoidal signal of the i -th frequency ($i = 0.1; 0.5; 1; 20; 30; 40; 50; 60; 75$ Hz) on the recording, mm;

$A(f_0)$ – linear size of the image range of a sinusoidal signal with a frequency of 10 Hz on the recording, mm.

The ratio of the linear size of the amplitude of the registered signal at the i -th frequency to the linear size of the amplitude of the registering signal at a frequency of 10 Hz in the range from 0,1 to 60 Hz should be within the range from 90 to 105 %, and at a frequency of 75 Hz – from 70 to 105 %.

Determination of the time constant. The time constant is determined according to the scheme (Fig. 1), switch $S3$ is closed, $S4$ is in position «2», with a sensitivity of 10 mm/mV by applying rectangular pulses with a amplitude of 2 mV and a frequency of no more than 0,2 Hz to the electrocardiograph input. The speed of movement of the recording medium is 50 mm/s.

The time constant τ is defined as the time for the signal to decay to level 0,37 according to Figure 5 without taking into account emissions. The image on the transient response record should be monotonic within the effective recording width, directed towards the zero line. The time constant should be at least 3,2 s.

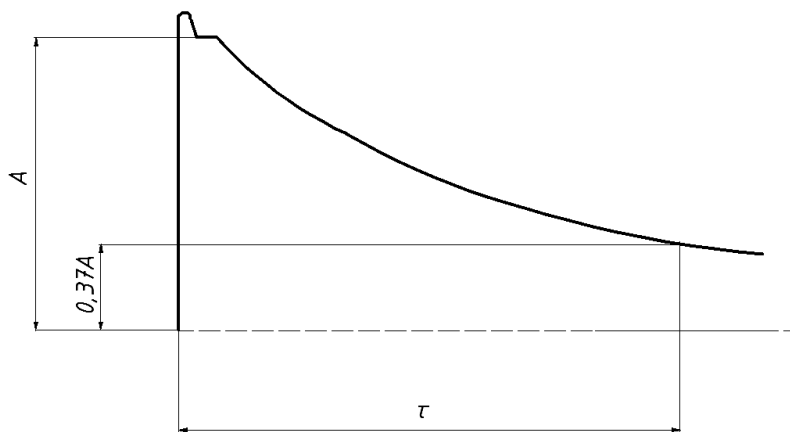


Figure 5 – Recording of the transient response

Determination of the error of the internal calibrator. The error of the internal calibrator is determined by recording the external signal and the internal calibrated signal. According to the scheme (Fig. 1), a rectangular signal with a amplitude of 1 mV and a frequency of 2,5 Hz must be applied to the input of the electrocardiograph and recorded. Then record the calibrated pulse from the internal calibrator (by pressing the appropriate button). The error of the internal calibrator in percent is determined by formula (9):

$$\delta_{i.c.} = \left| \frac{h_c - h_{es}}{h_{es}} \right| \cdot 100, \quad (9)$$

where $\delta_{i.c.}$ – error of the internal calibrator, %;

h_c – linear size of the recorded signal range of the internal calibrator, mm;

h_{es} – linear size of the recorded external signal range, mm.

The error of the internal calibrator should not exceed $\pm 5\%$. Determination of input impedance. The input impedance is determined by applying to the input of the electrocardiograph a test sinusoidal signal with an amplitude of 1 mV and a frequency of 10 Hz with a permissible deviation of ± 1 Hz at a sensitivity of 10 mm/mV according to the scheme (Fig. 6), switches $S1$, $S2$ are closed.

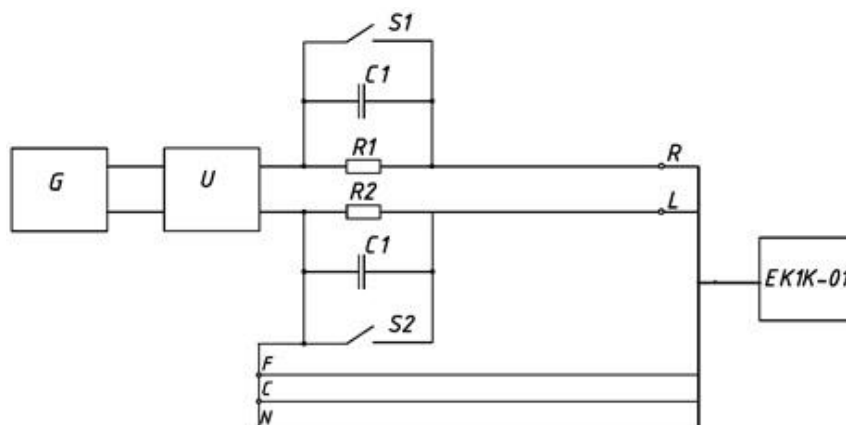


Figure 6 – Scheme for determining the total input impedance: EK1K-01 – electrocardiograph being verified; $C1$, $C2$ – capacitor K73-9-100V-4700 pF $\pm 10\%$; G – signal generator of a special form, type G6-15; $R1$, $R2$ – resistor MLT-0,125-620 k Ω $\pm 5\%$; $S1$, $S2$ – micro-tumbler MT1; U – voltage divider, type DNS-01

Then the same signal is fed to the inputs of the electrocardiograph through additional resistors R_1 , R_2 , switches S_1 , S_2 are open. Repeat the measurement by changing the wires R and L of the lead cable.

The input impedance is calculated by the formula (10):

$$Z_{in} = Z_2 \left| \frac{H_{n2}}{H_{n1} - H_{n2}} \right|, \quad (10)$$

where Z_{in} – input impedance, kOhm;

H_{n1} – linear size of the recorded signal range without series-connected impedance Z_2 , mm;

$H_{n2} = \frac{A_{max} + A_{min}}{2}$ – linear size of the recorded signal amplitude with the impedance of the

output Z_2 connected in series (Fig. 7), mm;

Z_2 – the value of the series impedance is 527 kOhm at a frequency of 10 Hz.

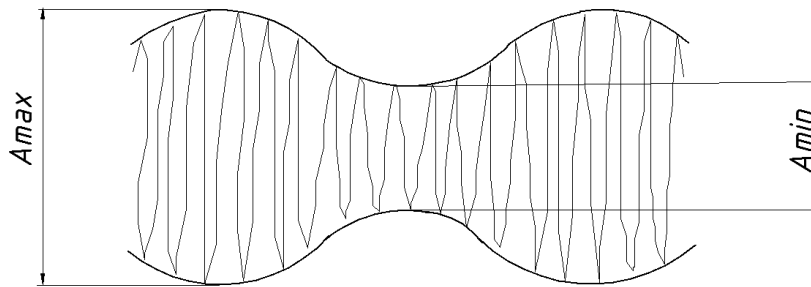


Figure 7 – Signal recording when measuring input

The input impedance must be at least 5 MΩ. Determination of the sensitivity of the additional input and its errors. The sensitivity of the additional input is determined by applying to the additional input via the TE4.853.248 cable a rectangular pulse signal with a frequency of 1 Hz and an amplitude of 1 V with a permissible deviation of $\pm 1\%$ according to the scheme (Fig. 8).

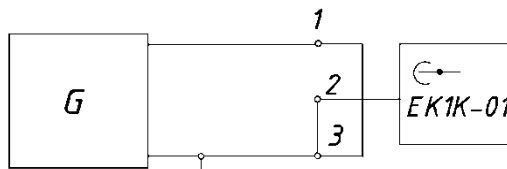


Figure 8 – Scheme for determining the sensitivity of the additional input:
EK1K-01 – electrocardiograph under test; G – special-shaped signal generator G6-15

The required accuracy of setting the pulse amplitude can be ensured at the output of a special-shaped signal generator of the G6-15 type by the compensation method using an oscilloscope C1-68, a universal voltmeter B7-16A and a DC power supply of the B5-43 type. The amplitude of the pulse signal image is measured on the recording and the sensitivity error at the additional input is determined by the formula (11):

$$\delta_{a.i.} = \left(\frac{h_{es}}{2U_{a.i.}\xi_{n1}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (11)$$

where $\delta_{a.i.}$ – sensitivity error for additional input, %;

h_{es} – the amplitude of the pulse signal image on the recording, mm;

$U_{a.i.}$ – the amplitude of the pulse signal image on the recording, mm;

ξ_{n1} – nominal sensitivity value for additional input $\xi_{n1} = 20$ mm/V.

Repeat the measurements and calculations by swapping the positions of cable wires 1 and 2 (3 – grounding wire of cable TE4.853.248). The sensitivity error for the additional input should not exceed $\pm 5\%$. Determination of sensitivity by additional output and its errors. Sensitivity by additional output is determined by measuring with a voltmeter B7-16A the voltage at a load of $10 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, connected to the red and black wires of the cable TE4.853.248. The cable TE4.853.248 is connected to

the additional output of the electrocardiograph. A sinusoidal signal with an amplitude of 1 mV with a permissible deviation of 0,01 mV and a frequency of 20 Hz is applied to the input of the electrocardiograph according to the scheme (Fig. 1.)

The sensitivity error at the additional output is determined by the formula (12):

$$\delta_{a.i.} = \left(\frac{U_{a.ix.} \sqrt{2}}{U_{in} \xi_{n2}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (12)$$

where $\delta_{a.i.}$ – sensitivity error for additional output, %;

$U_{a.i.}$ – voltage on the load connected to the additional output, V;

U_{in} – signal amplitude at the input of the electrocardiograph, mV;

ξ_{n2} – nominal value of sensitivity for additional output, $\xi_{n2} = 1 \text{ V/mV}$.

The sensitivity error for the additional output should not exceed $\pm 5\%$.

Conclusions. Electrocardiographs that meet the requirements of this methodology are considered suitable for use. They are subjected to branding in a way that excludes the possibility of disassembling and repairing the electrocardiograph without breaking the brand, and certificates of initial state verification are issued for them in the form established by the Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activities» on the procedure for conducting verification of legally regulated measuring instruments in operation and recording its results. Periodic verification is carried out by the bodies of the departmental metrological service in accordance with the established procedure at least once a year. Electrocardiographs that do not meet the requirements of this methodology are unsuitable for use, and a certificate is issued for them in the established form, indicating the reasons for unsuitability.

Information sources

1. Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine No. 1747 dated October 13, 2016 «On approval of the inter-verification intervals of legally regulated measuring instruments in operation, by categories». URL: <https://surl.li/dvtggb> (date of access: February 26, 2025).
2. Electrocardiograph Calibration: Ensuring the Accuracy of Medical Measurements. URL: <https://surl.li/zavnsb> (access date: 27.02.2025).
3. Avrunin O. G., Semenets V. V., Abakumov V. G., Gotra Z. Yu., Zlepko S. M., Kipensky A. V., Pavlov S. V. Fundamentals of registration and analysis of biosignals: a textbook. Kharkiv: KhNURE, 2019. 400 p.
4. Pavlov S. V., Avrunin O. G., Zlepko S. M., Bodiansky E. V., Kolisnyk P. F., Lysenko O. M., Chaykovsky I. A., Filatov V. O. Intelligent technologies in medical diagnostics, treatment and rehabilitation: monograph. Vinnytsia: PP «TD Edelweiss and K», 2019. 260 p.
5. DSTU 9202:2022 «Metrology. Electrocardiographs. Verification Methodology». URL: <https://surl.li/xblvdj> (access date: 01.03.2025).
6. Fundamentals of electrocardiography. URL: <https://surl.li/xgcdur> (access date: 01.03.2025).

Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИКА ПОВІРКИ ОДНОКАНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІВ

В статті описано методику перевірки одноканальних електрокардіографів, від результатів вимірювань яких визначають медичні стратегії лікування для пацієнтів. Тому важливо, щоб прилад був точним, адже невірні вимірювання можуть призвести до неправильного діагнозу та подальших ускладнень. Забезпечення точності результатів вимірювань електрокардіографів покращує надійність медичних висновків, а вчасна перевірка дозволяє виявляти проблеми та усувати їх до виникнення серйозних неполадок. Розглянуто методи та засоби перевірки електрокардіографа, умови перевірки електрокардіографа і підготовки до неї. Описано методику проведення перевірки електрокардіографа.

Ключові слова: електрокардіограф, перевірка, похибка, діагностика, точність, чутливість, імпульс, сигнал, запис.

UDC 538.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-02

Tatarchuk D., Didenko Yu., Poplavko Yu., Boikynia A., Tkachenko N., Oliinyk O.

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

OPTICALLY SWITCHED LOGIC CIRCUITS

The development of information technologies at the present stage requires the development of new, more modern and more complex electronic equipment. Devices with controllable characteristics are being increasingly introduced. A separate direction of development of such devices is the development of circuits with the possibility of switching the circuit during operation without the need for its dismantling and reassembly. One of the possible ways to effectively solve this problem is the development of optically switched circuits. Optical switching provides a number of advantages over other switching methods, the main of which are the complete absence of electrical influence of the control circuit on the controlled circuit, the simplicity of the process of rapid reconfiguration of the circuit, as well as resistance to the influence of external electric and magnetic fields. This work shows the principle possibility of creating devices with optical switching of the circuit without the need to perform dismantling and assembly operations of this device. The paper presents the results of research on a logic circuit assembled on the basis of discrete electronic components, which can be optically switched as a logical 2AND-NOT element or as a logical 2OR-NOT element.

Keywords: photoconductivity, commutation, semiconductors, optical control, logic circuits.

Formulation of the problem. Modern society is largely dependent on the development of information technologies, which are actively penetrating all spheres of human activity. Such dependence requires constant updating and improvement of information technologies, which, in turn, leads to the need to improve their hardware base. An important direction for improving the hardware base is the development of devices with controllable characteristics. At the same time, much attention is paid to the development of technologies in which device reconfiguration is possible without their dismantling and reassembly. Today, a large number of methods are known for controlling the characteristics of electronic devices [1-6]:

- mechanical;
- electromechanical;
- electronic;
- magnetic;
- combined and etc.

In turn, they can be divided into two separate groups.

The first of these groups of methods is based on changing the properties of the active materials that make up the device, which can be implemented on the basis of magnetic, electrical or optical effects.

The second group of methods is based on changing the properties of the system by moving the parts of the system relative to each other.

The methods of the first group are characterized by a high level of internal losses, and their use at frequencies above 30...40 GHz is currently ineffective due to fundamental limitations in the millimeter wavelength range. The methods of the second group introduce a minimal level of losses into the microwave system and do not have fundamental limitations in the millimeter wave range. But, unfortunately, they have a relatively slow control speed and high control voltage.

Analysis of recent research and publications. Recently, much attention has been paid to optical methods for controlling the characteristics of electronic devices. This is due to a number of advantages of the optical control method: the complete absence of electrical influence of the control circuit on the controlled circuit, the simplicity of the process of rapid reconfiguration of the circuit, as well as resistance to the influence of external electric and magnetic fields.

For example, in article [7] a tunable all-optical microwave filter based on a photonic crystal cavity was experimentally demonstrated. In article [8] the microwave photonic filters with high rejection ratios and large tuning ranges of the central frequency and bandwidth were proposed and experimentally demonstrated. In one of our previous works, the possibility of transmitting information through conductive channels formed optically on the surface of a semiconductor material was demonstrated [9]. The possibility of implementing a microstrip microwave filter with optical control was also demonstrated [10]. However, the practical implementation of optically controlled devices requires additional research.

In one of our previous works, the possibility of transmitting information through conductive channels formed optically on the surface of a semiconductor material was demonstrated [9]. The possibility of implementing a microstrip microwave filter with optical control was also demonstrated [10]. However, the practical implementation of optically controlled devices requires additional research.

Setting objectives. This work is a continuation of the authors' previous work and is devoted to investigating the possibility of practical implementation of optically controlled devices.

Presenting main material. As mentioned above, the purpose of the work is to investigate the possibility of changing the logical function of the circuit optically. For the experimental study, it was decided to implement a circuit on a single component basis that would allow switching the logical function AND-NOT to OR-NOT and vice versa optically.

In order to simplify the implementation of the experimental stand to demonstrate the principle of operation, common discrete components were used: 2N7002 field effect transistors and PFW2051 photoresistors. The circuit consists of three transistors and three photoresistors, which are irradiated at the appropriate moment.

Each photoresistor is a so-called model of the photoconductor path (Fig. 1). When resistor R_1 is illuminated and resistors R_2 and R_3 are not illuminated, we have a logical element 2AND-NOT (Fig. 2). If the resistor R_1 is not illuminated and the resistors R_2 and R_3 are illuminated, we have a logical element 2OR-NOT (Fig. 3).

The photoresistors were illuminated by a white light laser with a power of 5 mW from the distance of 2 cm and from the distance 0.8 cm.

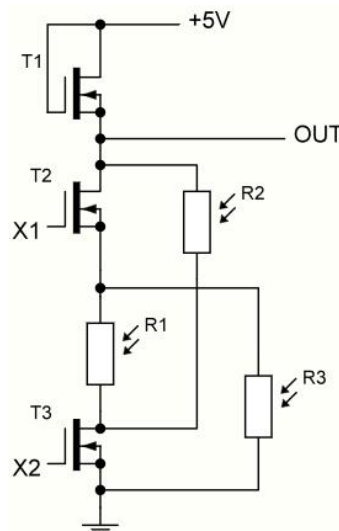


Figure1 – Schematic diagram of the test stand

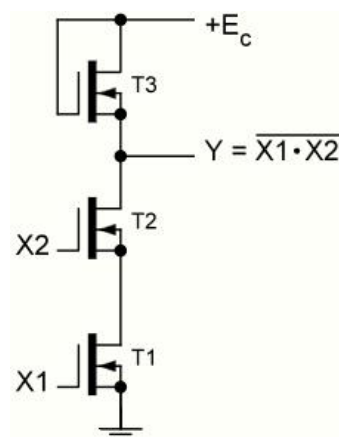


Figure 2 – Element 2 AND-NOT

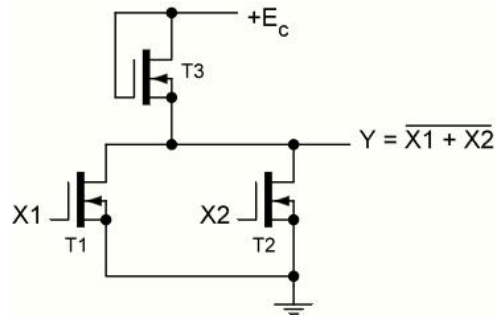


Figure 3 – Element 2 OR-NOT

The resistance of the photoresistor during illumination was 81 Ohm, and the dark resistance was 16 MΩ. When the distance between the laser and the surface of the photoresistor was reduced from 2 cm to 0.8 cm, the resistance was approximately 40 ohms.

Using a rectangular pulse generator, sequences of rectangular pulses were applied to the inputs X_1 and X_2 , and the resulting signal was recorded from the output y . The high level of the input signals was 5 V and the low level was 0.2 V.

The input signals and the output signal were visualized using a multi-channel oscilloscope. The corresponding oscillograms are shown in Fig. 4 (element 2AND-NOT) and Fig. 5 (element 2OR-NOT).

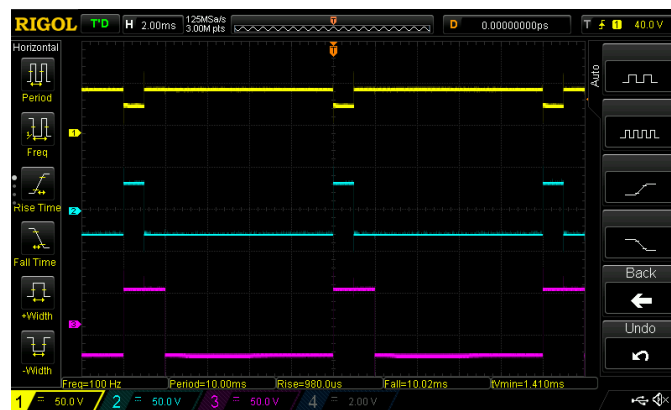


Figure 4 – Oscillograms for element 2AND-NOT: X1 – blue, X2 – violet, y – yellow

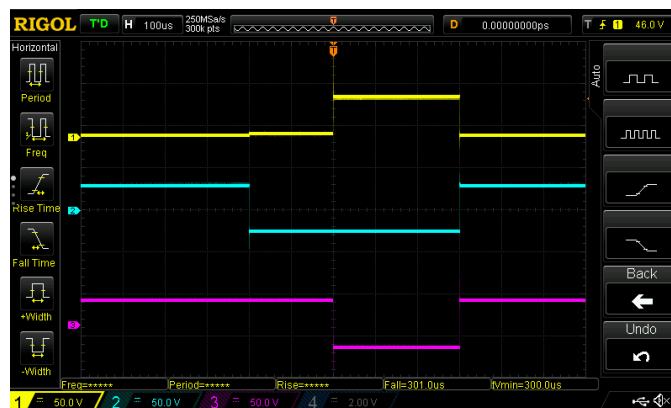


Figure 5 – Oscillograms for element 2OR-NOT: X1 – blue, X2 – violet, y – yellow

For comparison, truth tables for the considered circuits are provided (Tables 1, 2)

Table 1 – Truth table for logical element 2AND-NOT

X1	X2	Y
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Table 2 – Truth table for logical element 2OR-NOT

X1	X2	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

It should be noted that during the experiment it was found that the high-level voltage for the 2 AND-NOR circuit and the low-level voltage for the 2 OR-NOR circuit significantly depend on how many transistors, one or two, are in the open state, which is quite understandable from the point of view of the theory of electrical circuits. Thus, the high-level voltage for the 2 AND-NOR circuit was approximately 4.5 V when two transistors (T1 and T2) were in the closed state and approximately

3.2 V when only one of the transistors was in the closed state. Similarly, for the 2 OR-NOR circuit, the low-level voltage was 2.4 V with one open transistor and 1.4 V with two open transistors. However, this problem can be significantly reduced by using transistors with lower resistance in the open state, or by circuit means using a comparator.

Conclusions. Based on the obtained results, the following conclusions can be drawn:

- as a result of the work, it was possible to implement a circuit with the possibility of optical switching by setting active components as a logical element 2 AND-NOT or as a logical element 2 OR-NOT;
- the obtained results indicate the fundamental possibility of creating devices with the possibility of changing their function optically without the need to perform work on dismantling and re-assembling these devices;
- if necessary, the switching process can be controlled by a microcontroller according to a given program, which opens up a number of new opportunities for creating switched electronic devices for various purposes, which, in turn, will allow creating more complex electronic architectures necessary for high-speed computing and advanced telecommunications.

At the same time, as a result of the research, a number of problems were identified that need to be solved for the practical implementation of the above capabilities, which indicates the need for a number of additional studies.

References

1. Joy S. R. A reconfigurable interconnect technology based on spoof plasmon / S. R. Joy, M. F. Bari, M. Z. Baten, L. Feng, and P. Mazumder // 19th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2019, Macao, China).
2. Tatarchuk D. D. Composites based on dielectric materials for microwave engineering / D. D. Tatarchuk, Y. M. Poplavko, V. A. Kazmirenko, O. V. Borisov, Y. V. Didenko // Radioelectronics and Communications Systems. 2016. Vol. 59. P. 74–82.
3. Shmigin D. A. Managed planar microwave filters with movable electrode / D. A. Shmigin // Computer Science and Information Technology: Proc. of Sci. Conf. (June 2012, Lviv, Ukraine). P. 123–127.
4. Wang X.-G. A tunable combline bandpass filter loaded with series resonator / Xu-Guang Wang, Young-Ho Cho, Sang-Won Yun // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2012. Vol. 60, No. 6. P. 1569–1576.
5. Tatarchuk D. D. Semiconductor Microwave Resonant Elements with electronic Control / D. D. Tatarchuk, V. I. Molchanov, Yu. V. Didenko, Ie. I. Kharabet, A. S. Franchuk // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2014): Proc. of 34th Int. Sci. Conf. (April 15-18, 2014, Kyiv, Ukraine). Kyiv, 2014. P. 70–72.
6. Yaghmaee P. Electrically Tuned Microwave Devices Using Liquid Crystal Technology / Pouria Yaghmaee, Onur Hamza Karabey, Bevan Bates, Christophe Fumeaux, and Rolf Jakob // International Journal of Antennas and Propagation. 2013. P. 824214-1–824214-9.
7. Liu L. Tunable all-optical microwave filter with high tuning efficiency / Li Liu, Shasha Liao, Wei Xue, and Jin Yue // Optics Express. 2020. Vol. 28, Is. 5. P. 6918–6928.
8. Liu L. All-optical tunable microwave filter with ultra-high peak rejection and low-power consumption / Li Liu and Xing Liu // Optics Express. 2020. Vol. 28, Is. 9. P. 13455–13465.

9. Boikynia A. O. Investigation of electrical signals transmission through light-induced conductive channels on the surface of CdS single crystal / A. O. Boikynia, N. S. Tkachenko, Yu. V. Didenko, O. O. Oliinyk, D. D. Tatarchuk // *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2024. Vol. 29, №2. P. 304564.1–304564.5.

10. Mazur K.S. Filters based on segments of microstrip lines / K.S. Mazur, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.O. Serheieva // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24–26, 2018, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, 2018. P. 177–180.

Татарчук Д. Д., Діденко Ю. В., Поплавко Ю. М., Бойкиня А. О., Ткаченко Н. С., Олійник О. О.

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

ЛОГІЧНІ СХЕМИ З ОПТИЧНОЮ КОМУТАЦІЄЮ

Розвиток інформаційних технологій на сучасному етапі вимагає розробки нової, більш сучасної та складнішої електронної техніки. Все частіше впроваджуються пристрої з керованими характеристиками. Одним напрямком розвитку таких пристроїв є розробка схем з можливістю перемикавання схеми під час роботи без необхідності її демонтажу та повторного монтажу. Подальший розвиток цього напрямку вимагає принципово нового підходу до створення електронної техніки, а саме розробки нових технологій комутації електронних схем. Одним із можливих шляхів ефективного вирішення цієї проблеми є розробка схем з оптичною комутацією. Оптична комутація забезпечує ряд переваг перед іншими методами комутації, основними з яких є повна відсутність електричного впливу схеми керування на керовану схему, простота процесу швидкого переналаштування схеми, а також стійкість до впливу зовнішніх електричних і магнітних полів. У даній роботі показано принципову можливість створення пристроїв з оптичною комутацією схеми без необхідності виконання операцій демонтажу та повторного монтажу цього пристрою. У статті наведено результати дослідження логічної схеми, зібраної на основі дискретних електронних компонентів, яка може бути комутувана оптичним шляхом як логічний елемент 2І-НІ або як логічний елемент 2АБО-НІ.

Ключові слова: фотопровідність, комутація, напівпровідники, оптичний контроль, логічні схеми.

УДК 616.71

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-03

Гевко О. В., Паляниця Ю. Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

BLUETOOTH НАВУШНИКИ ІЗ МЕДИКО-ДІАГНОСТИЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ

У результаті проведеного дослідження було розроблено інноваційний технологічний продукт – Bluetooth навушники із медико-діагностичними функціями. Така інтеграція дозволяє користувачам отримувати дані про стан свого здоров'я без необхідності використання додаткових спеціалізованих пристроїв, що робить процес медичного контролю більш зручним та доступним. Використовуючи методи морфологічного аналізу було проведено структурно-схемний синтез Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями, що дозволило визначити 20 потенційних варіантів конструкції. З цих варіантів експертним шляхом було обрано чотири найефективніші із медико-діагностичними функціями, які представляють собою інтегративне рішення сучасних викликів у сфері медицини, технологій та соціальної інклюзії. Створені Bluetooth навушники є медико-діагностичними інструментами, які дозволяють здійснювати моніторинг різноманітних фізіологічних параметрів користувачів в режимі реального часу. Зокрема розроблено і описано принципи роботи Bluetooth навушників із функціями слухового апарату, пульсоксиметра, корекції заїкання та отоакустичної емісії. Більш детально в роботі обґрунтовано основні технічні та математичні аспекти функціонування Bluetooth навушника із функцією реєстратора отоакустичної емісії, який дозволяє оцінити функціональний стан структур внутрішнього вуха, зокрема зовнішніх волоскових клітин, які є найбільш чутливими до різноманітних пошкоджуючих факторів. З його допомогою можливе здійснення ранньої діагностики порушень слуху, навіть до появи суб'єктивних симптомів.

Ключові слова: Bluetooth навушник, медико-діагностична функція, моніторинг, синтез.

Постановка проблеми. Сучасний антропоцентричний підхід до створення нових технологій вимагає, щоб інновації були орієнтовані на людину, її потреби та підвищення якості життя. Тому стрімкий розвиток технологій забезпечує трансформацію нашого повсякденне життя, роблячи його комфортнішим та ефективнішим. Однак, паралельно з цим, спостерігається тенденція до збільшення проблем, пов'язаних зі здоров'ям людини, зокрема зі слухом, позаяк значна частина населення страждає від різноманітних порушень слуху, і ця проблема має тенденцію до зростання, особливо серед молоді та людей похилого віку. Це зумовлює необхідність розробки інноваційних технологій, які б дозволяли здійснювати ранню діагностику та профілактику порушень слуху, а також надавати допомогу тим, хто вже стикнувся з цією проблемою. У контексті зазначеного вище існує суттєва необхідність у розробленні інноваційних засобів медико-діагностичної діагностики, які б відповідали вимогам сьогодення і забезпечували процес медичного контролю людини більш зручним та доступним.

Аналіз стану досліджень. Важливим аспектом сучасної медичної інженерії є її орієнтація на вирішення проблем підвищення якості медичної діагностики та інклюзивності. У сучасному суспільстві здоров'я люди виходить на перший план, а люди з особливими потребами часто стикаються з різноманітними бар'єрами, які ускладнюють їх інтеграцію в соціальне життя. Використання медичних пристроїв у публічних місцях може викликати дискомфорт та почуття стигматизації. Тому, сучасний підхід у розробленні медичних засобів полягає у можливості одержання необхідної медико-діагностичної підтримки без привернення зайвої уваги оточуючих, що сприяє зменшенню соціального тиску та покращенню психологічного комфорту користувачів.

На сьогоднішній день новим напрямком у медичній діагностиці для бездротової передачі медичної інформації є використання чипів радіочастотної ідентифікації [1, 2]. Також для медичного діагностування починають бурхливо розвиватись різноманітні системи реєстрації біосигналів [3-5], використання «розумного одягу» [6-9] тощо [10, 11]. Для ідентифікації станів, що може бути відправною точкою для створення інтегрованої безпеково-медичної системи і для оперативного виявлення аномалій, науковці присвячують свої дослідження спектрально-кореляційним теоріям [12], ROC-аналізу [13], використанню штучного інтелекту [14] тощо. Вивчення питання слуху біологічних об'єктів здійснювалось в працях [15, 16], в яких проведено

дослідження слухового скринінгу основі методів педіатричної аудіометрії та реєстрації отоакустичної емісії.

Проте існуючі засоби і дослідження не завжди мають ефективне поєднання зручності у повсякденному використанні і необхідної медико-діагностичної функціональності. Оскільки Bluetooth навушники є звичним атрибутом сучасної людини, поєднання різноманітних функцій у їх конструкціях може мати значний ефект для споживачів. Тому цей напрямок розвитку медичної апаратури потребує подальшого розвитку і дослідження, що принесе значну користь для користувачів.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями, які дозволяють здійснювати моніторинг різноманітних фізіологічних параметрів користувачів в режимі реального часу.

Результати та їх обговорення. На основі проведеного аналізу електроакустичних перетворювачів були виділені окремі медичні функціональні характеристики, які є необхідними чи бажаними для реалізації необхідних медико-діагностичних функцій, зокрема таких, як функція слухового апарату, функція реєстратора отоакустичної емісії, функція пульсоксиметра і функція корекції заїкання. Для забезпечення цих функцій електроакустичними перетворювачами доцільно провести проєктування даних технічних засобів, початковим етапом якого є генерування їх можливих варіантів. Для цього використаємо відомий метод структурно-схемного синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [17], який на початковому етапі передбачає виділення окремих конструктивних ознак та елементів даних технічних засобів, з подальшим їх групуванням у морфологічній таблиці (табл. 1).

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця конструктивних ознак та елементів Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями

1. Специфічні елементи	2. Загальні елементи	Керування процесом	
		3. Спосіб керування	4. Кількість програм керування
1.1. Мікшер 1.2. Модуль цифрової обробки сигналу 1.3. Модуль термометра 1.4. Модуль пульсоксиметра 1.5. Модуль отоакустичної емісії 1.5 DAF-модуль корекції заїкання	2.1. Корпус 2.2. Елемент живлення 2.3. Електронний блок 2.4. Bluetooth-ресивер 2.5. Підсилювач потужності 2.6. Динамік	3.1. Персональний комп'ютер 3.2. Смартфон	4.1. Одна 4.2. Декілька

Модель системи «Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями» представлено на рисунку 1. У ній до підгрупи I першого ієрархічного рівня ми віднесли групу 1 – «Специфічні елементи» (табл. 1); до підгрупи I другого ієрархічного рівня віднесли групу 3 – «Спосіб керування»; до підгрупи II другого ієрархічного рівня віднесли групу 4 – «Кількість програм керування»; до підгрупи I третього ієрархічного рівня віднесли групу 2 – «Загальні елементи», і вони при підрахунку кількості варіантів не враховуватимуться, бо повинні міститися у будь-якій конструкції Bluetooth навушника із медико-діагностичними функціями.

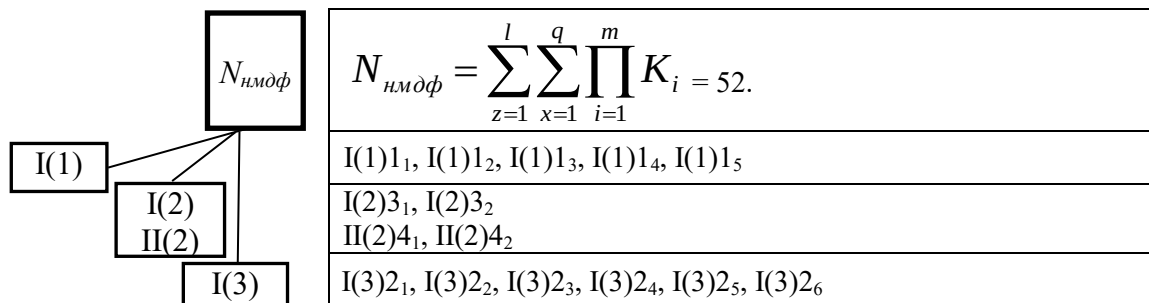


Рисунок 1 – Модель механічної системи «Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями»: (1) - (3) – ієрархічні рівні; I - II – підгрупи ієрархічних рівнів

Загальна кількість варіантів Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями при використанні такого методу синтезу складе:

$$N_{\text{ндфм}} = \begin{vmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 3.1 \\ 4.2 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 4.1 \\ 4.2 \end{vmatrix} = 20.$$

Отже, за результатами проведеного структурно-схемного синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу було отримано їх 20 варіантів. Проте з них експертним методом було виділено чотири найефективніші, які керуватимуться зі смартфона з допомогою однієї програми. Відтак розроблені навушники належать до класу електроакустичних перетворювачів для особистого прослуховування музики або інших звукових сигналів і здатні до прийняття та обробки будь-яких сигналів Bluetooth - з'єднання, а також володіють додатковими функціями. Проаналізуємо їх детальніше.

На рисунку 2 зображено Bluetooth навушник із функцією слухового апарату, який виконаний у вигляді корпусу 1, в якому розміщено елемент живлення 2 та електронний блок 3 з Bluetooth-ресивером 4, мікшером 5, а також підсилювачем потужності 6 динаміка 7. Елемент живлення 2 підключений до електронного блоку 3, в якому вихід Bluetooth-ресивера 4 під'єднаний до входів мікшера 5, а вихід мікшера 5 під'єднаний до входу підсилювача потужності 6, вихід якого під'єднаний до входу динаміка 7.

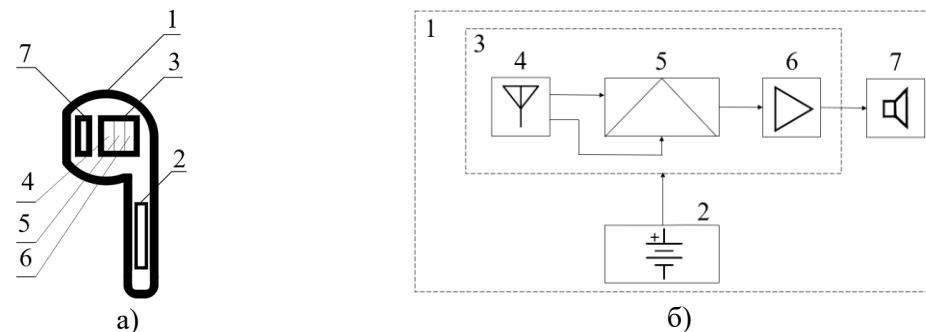


Рисунок 2 – Bluetooth навушник із функцією слухового апарату:
а) загальний вигляд; б) структурно-функціональна схема

Використання Bluetooth навушника із функцією слухового апарату здійснюється наступним чином. Bluetooth навушник із функцією слухового апарату забезпечує прийняття та обробку будь-яких сигналів Bluetooth-з'єднання Bluetooth-ресивером 4, який вмонтовано в електронному блоці 3, і який призначений для прийому сигналів від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано). Далі сигнали (системний і мікрофонний Bluetooth-девайса) змішуються у мікшері 5 і через підсилювач потужності 6 надходять до динаміка 7. Елемент живлення 2, що розташований у корпусі 1, забезпечує живленням електронні компоненти навушника. Змішування сигналів від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано) мікшером 5 здійснюється в адаптивному режимі шляхом безперервного оцінювання рівня звуку від оточення користувача. Причому рівень системного сигналу від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано) є обернено пропорційним до рівня мікрофонного сигналу Bluetooth-девайса (на рисунку не показано), що дає можливість автоматично переводити пристрій у режим навушника в разі відсутності сигналу від оточення, або в режим слухового апарата. Крім того, користувач має можливість керувати та налаштовувати параметри Bluetooth навушника із функцією слухового апарату за допомогою додатку у Bluetooth-девайсі (на рисунку не показано) і визначати пріоритетність використання Bluetooth навушника в режимі навушника або слухового апарата.

Bluetooth навушник із функцією пульсоксиметра, який виконаний у вигляді корпусу 1, в якому розміщено елемент живлення 2, електронний блок 3 з Bluetooth-ресивером 4, модулем цифрової обробки сигналу 5 та підсилювачем потужності 6, зображено на рисунку 3. У верхній частині корпусу 1, поблизу розташування до вушної раковини (на рисунку не показано), розміщено модуль термометра 7, а у нижній частині корпусу 1, поблизу розташування до мочки вуха (на рисунку не показано), розміщено модуль пульсоксиметра 8. Елемент живлення 2 підключений до електронного блоку 3, в якому вихід Bluetooth-ресивера 4 під'єднаний до входу модуля цифрової обробки сигналу 5, вихід якого під'єднаний до входу підсилювача

потужності 6, вихід якого під'єднаний до входу динаміка 9. Елемент живлення 2 також під'єднаний до модуля термометра 7 та модуля пульсоксиметра 8. Виходи модуля термометра 7 та модуля пульсоксиметра 8 під'єднані до входів модуля цифрової обробки сигналу 5.

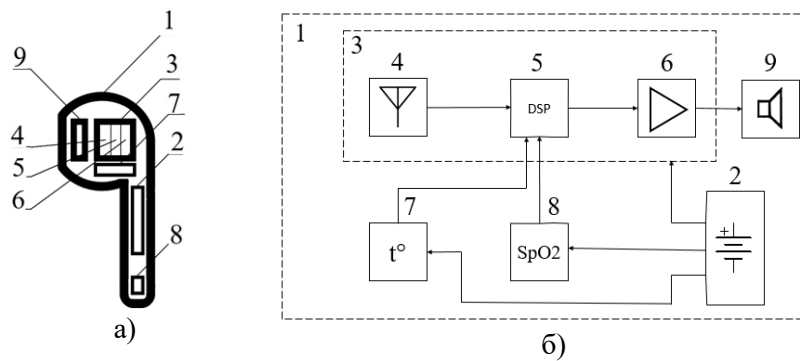


Рисунок 3 – Bluetooth навушник із функцією пульсоксиметра:
а) загальний вигляд; б) структурно-функціональна схема

Bluetooth навушник із функцією пульсоксиметра забезпечує прийняття та обробку будь-яких сигналів Bluetooth-з'єднання Bluetooth-ресивером 4, який міститься в електронному блоці 3, і який призначений для прийому сигналу від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано). Далі сигнал через модуль цифрової обробки сигналу 5, який служить для цифрової обробки сигналу, передається до динаміка 9. Елемент живлення 2, що розташований у корпусі 1, забезпечує живленням електронні компоненти Bluetooth навушника із функцією пульсоксиметра. Модуль термометра 7, який розташований у верхній частині корпусу 1 поблизу до вушної раковини (на рисунку не показано), забезпечує вимірювання температури шляхом її реєстрації з вушної раковини (на рисунку не показано). Модуль пульсоксиметра 8, який розташований у нижній частині корпусу 1 поблизу до мочки вуха (на рисунку не показано), забезпечує вимірювання частоти серцевих скорочень та рівня кисню в крові шляхом реєстрації пульсоксиметричного сигналу з мочки вуха (на рисунку не показано). Отримані дані передаються на Bluetooth-девайс (на рисунку не показано) сигналом Bluetooth-з'єднання з Bluetooth-ресивера 4 для подальшої обробки інформації про величину температури, частоти серцевих скорочень і рівня кисню в крові користувача.

На рисунку 4 зображено Bluetooth навушник із функцією корекції заїкання, який виконаний у вигляді корпусу 1, в якому розміщено елемент живлення 2, електронний блок 3 з Bluetooth-ресивером 4, модулем цифрової обробки сигналу 5 та підсилювачем потужності 6. Також у корпусі 1 розміщено DAF-модуль корекції заїкання 7. Елемент живлення 2 підключений до електронного блоку 3, в якому вихід Bluetooth-ресивера 4 під'єднаний до входу модуля цифрової обробки сигналу 5, вихід якого під'єднаний до входу підсилювача потужності 6, вихід якого під'єднаний до входу динаміка 8, крім того, елемент живлення 2 також під'єднаний до DAF-модуля корекції заїкання 7, крім того, вихід DAF-модуля корекції заїкання 7 під'єднаний до входу модуля цифрової обробки сигналу 5. Bluetooth навушник із функцією корекції заїкання забезпечує прийняття та обробку будь-яких сигналів Bluetooth-з'єднання Bluetooth-ресивером 4, який міститься в електронному блоці 3, і який призначений для прийому сигналу від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано). Далі сигнал через модуль цифрової обробки сигналу 5, який служить для цифрової обробки сигналу, передається до динаміка 8.

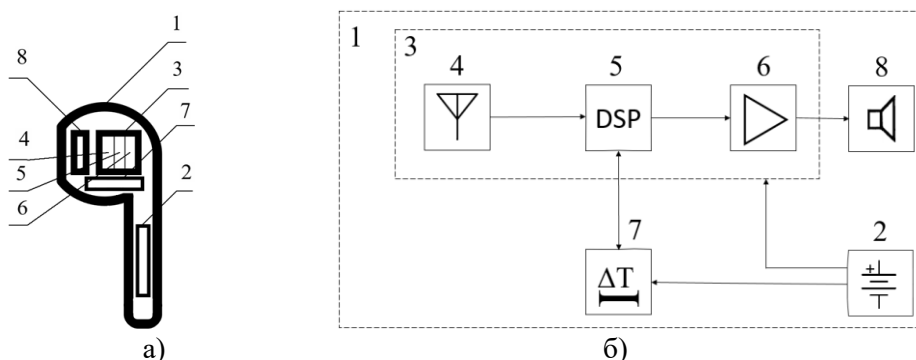


Рисунок 4 – Bluetooth навушник із функцією корекції заїкання:
а) загальний вигляд; б) структурно-функціональна схема

Елемент живлення 2, що розташований у корпусі 1, забезпечує живленням електронні компоненти навушника. DAF-модуль корекції заїкання 7 вносить затримку звукового сигналу для реалізації методу корекції заїкання. Відтак людині, яка заїкається, через Bluetooth навушник із функцією корекції заїкання з Bluetooth-девайса (на рисунку не показано) сигналом Bluetooth-з'єднання з Bluetooth-ресивера 4 повертається її власний голос із певною затримкою, що допомагає їй сповільнити темп мовлення і знизити рівень заїкання.

Bluetooth навушник із функцією реєстратора отоакустичної емісії зображено на рисунку 5. Він виконаний у вигляді корпусу 1, в якому розміщено елемент живлення 2, електронний блок 3 з Bluetooth-ресивером 4, модулем цифрової обробки сигналу 5 та підсилювачем потужності 6. Також у корпусі 1 розміщено модуль отоакустичної емісії 7. Елемент живлення 2 підключений до електронного блоку 3, в якому вихід Bluetooth-ресивера 4 під'єднаний до входу модуля цифрової обробки сигналу 5, вихід якого під'єднаний до входу підсилювача потужності 6, вихід якого під'єднаний до входу динаміка 8. Елемент живлення 2 також під'єднаний до модуля отоакустичної емісії 7. Вихід отоакустичної емісії 7 під'єднаний до входу модуля цифрової обробки сигналу 5.

Використання Bluetooth навушника із функцією реєстратора отоакустичної емісії здійснюється наступним чином. Навушник забезпечує прийняття та обробку будь-яких сигналів Bluetooth-з'єднання Bluetooth-ресивером 4, який міститься в електронному блоці 3, і який призначений для прийому сигналу від Bluetooth-девайса (на рисунку не показано). Далі сигнал через модуль цифрової обробки сигналу 5, який служить для цифрової обробки сигналу, передається до динаміка 8. Елемент живлення 2, що розташований у корпусі 1, забезпечує живленням електронні компоненти навушника. Модуль отоакустичної емісії 7, який розташований у корпусі 1, забезпечує вимірювання отоакустичної емісії шляхом її реєстрації з вушного проходу (на рисунку не показано). Отримані отоакустичні дані проведеної отоакустичної емісії передаються на Bluetooth-девайс (на рисунку не показано) сигналом Bluetooth-з'єднання з Bluetooth-ресивера 4 для подальшої обробки даних про стан слухового апарату користувача.

Стандарт Bluetooth використовує частотну модуляцію з гаусівською фільтрацією (GFSK). Канал Bluetooth працює в діапазоні 2.4 ГГц з використанням технології розширення спектра шляхом перестрибування частоти (FHSS). Підсилювач потужності в навушнику забезпечує достатній рівень звукового тиску для комфортного прослуховування. Акустична система навушника включає динамік та акустичне оформлення. Її математична модель базується на електроакустичних аналогіях. Модуль цифрової обробки сигналу виконує ключову роль у функціонуванні навушника. Для вимірювання отоакустичної емісії (OAE) у навушнику використовується спеціальний акустичний зонд, що включає мікрофон та джерело звуку. Акустичні характеристики навушника визначають якість відтворення звуку. Для їх моделювання використовуються методи акустики та електроакустики. Електроакустичний перетворювач (динамік) можна представити як систему з електричним входом і акустичним виходом. Для аналізу сигналів OAE у частотній області використовуються методи спектрального аналізу. Точність вимірювань OAE є критичним параметром пристрою.

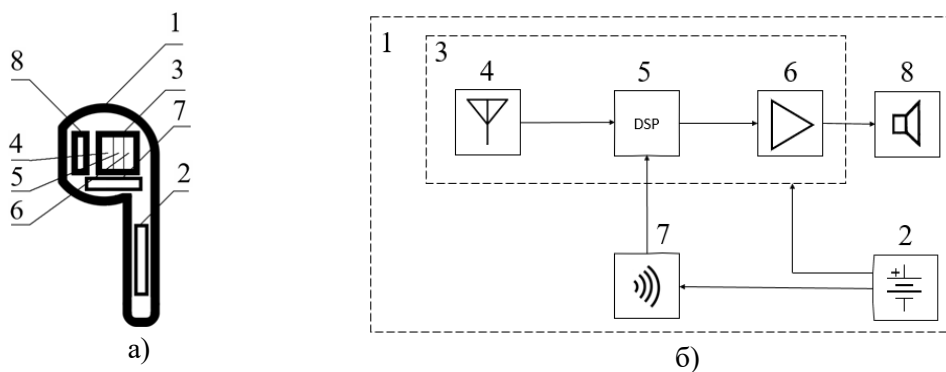


Рисунок 5 – Bluetooth навушник із функцією отоакустичної емісії:
а) загальний вигляд; б) структурно-функціональна схема

Стандарт Bluetooth використовує частотну модуляцію з гаусівською фільтрацією (GFSK). Канал Bluetooth працює в діапазоні 2.4 ГГц з використанням технології розширення спектра шляхом перестрибування частоти (FHSS).

Підсилювач потужності в навушнику забезпечує достатній рівень звукового тиску для комфортного прослуховування. Акустична система навушника включає динамік та акустичне оформлення. Її математична модель базується на електроакустичних аналогіях. Модуль цифрової обробки сигналу виконує ключову роль у функціонуванні навушника. Для вимірювання отоакустичної емісії (ОАЕ) у навушнику використовується спеціальний акустичний зонд, що включає мікрофон та джерело звуку. Акустичні характеристики навушника визначають якість відтворення звуку. Для їх моделювання використовуються методи акустики та електроакустики. Електроакустичний перетворювач (динамік) можна представити як систему з електричним входом і акустичним виходом. Для аналізу сигналів ОАЕ у частотній області використовуються методи спектрального аналізу. Точність вимірювань ОАЕ є критичним параметром пристрою.

Коротко розглянемо аспекти математичного моделювання функціонування Bluetooth-навушника із функцією реєстратора ОАЕ. Розуміння цих процесів вимагає аналізу акустичних сигналів, їх перетворення, передачі та обробки в контексті отоакустичної емісії. ОАЕ є результатом активних процесів у внутрішньому вусі. Її математична модель базується на нелінійній механіці та теорії біфуркацій. Спонтанна отоакустична емісія (SOAE) виникає внаслідок біфуркації Хопфа, коли система стає нестійкою і переходить у режим автоколивань, а викликана отоакустична емісія (EOAE) описується, як відгук нелінійної системи на зовнішній стимул. Біспектральний аналіз дозволяє виявити квадратичні нелінійності в сигналі. Тому ОАЕ, як фізичне явище, може бути описана системою диференціальних рівнянь, що характеризують механічні коливання структур внутрішнього вуха. Bluetooth-комунікація в навушнику з функцією реєстратора ОАЕ базується на математичних алгоритмах модуляції та кодування сигналів. Математична модель такого вимірювання включає калібрування акустичного зонда, корекцію впливу вушного каналу, визначення передавальної функції середнього вуха, оцінку рівня ОАЕ і визначення відношення сигнал/шум для ОАЕ. Розглянемо основні математичні аспекти цього процесу.

Калібрування акустичного зонда [15, 16]:

$$H_{cal}(f) = \frac{p_{mic}(f)}{p_{ref}(f)}, \quad (1)$$

де $p_{mic}(f)$ - тиск, виміряний мікрофоном; $p_{ref}(f)$ - тиск, виміряний еталонним мікрофоном.

Корекція впливу вушного каналу [15, 16]:

$$H_{ec}(f) = \frac{p_{ec}(f)}{p_{in}(f)}, \quad (2)$$

де $p_{ec}(f)$ - тиск у вушному каналі; $p_{in}(f)$ - тиск на вході вушного каналу.

Передавальна функція середнього вуха визначається з залежності [15, 16]:

$$H_{ms}(f) = \frac{F_{oval}(f)}{p_{ec}(f) \cdot A_{tm}}, \quad (3)$$

де $F_{oval}(f)$ - сила, що діє на овальне вікно; A_{tm} - площа барабанної перетинки.

Оцінка рівня ОАЕ визначається по формулі [15, 16]:

$$L_{OAE} = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{OAE,rms}}{p_{ref}} \right), \quad (4)$$

де $p_{OAE,rms}$ - середньоквадратичне значення тиску ОАЕ; $p_{ref} = 20$ мкПа - опорний тиск.

Відношення сигнал/шум для ОАЕ визначається по формулі [15, 16]:

$$SNR_{OAE}(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{OAE}(f)}{p_{noise}(f)} \right), \quad (5)$$

де $P_{OAE}(f)$ - спектральна щільність потужності ОАЕ; $P_{noise}(f)$ - спектральна щільність потужності шуму.

Висновки. Використовуючи методи морфологічного аналізу було проведено структурно-схемний синтез Bluetooth навушників із медико-діагностичними функціями, що дозволило визначити 20 потенційних варіантів конструкції. З цих варіантів експертним шляхом було обрано чотири найефективніші із медико-діагностичними функціями, які представляють собою інтегративне рішення сучасних викликів у сфері медицини, технологій та соціальної інклюзії. Створені Bluetooth навушники є медико-діагностичними інструментами, які дозволяють здійснювати моніторинг різноманітних фізіологічних параметрів користувачів в режимі реального часу. Зокрема розроблено і описано принципи роботи Bluetooth навушників із функціями слухового апарату, пульсоксиметра, корекції заїкання та отоакустичної емісії.

2. Більш детально в роботі обґрунтовано основні технічні та математичні аспекти функціонування Bluetooth навушника із функцією реєстратора отоакустичної емісії, який дозволяє оцінити функціональний стан структур внутрішнього вуха, зокрема зовнішніх волоскових клітин, які є найбільш чутливими до різноманітних пошкоджуючих факторів. З його допомогою можливе здійснення ранньої діагностики порушень слуху, навіть до появи суб'єктивних симптомів.

Інформаційні джерела

1. Smart K. J. Smart textiles: transforming the practice of medicalisation and health care / K. J. Smart // *Sociology of Health & Illness*. 2019. Vol. 41, Iss. 1. P. 147–161.
2. Jegan R. On the development of low power wearable devices for assessment of physiological vital parameters: a systematic review / R. Jegan, W. S. Nimi // *Journal of Public Health*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10389-023-01893-6>.
3. Дозорський В. Г. Система реєстрації біопотенціалів для електроенцефалографічних досліджень / В. Г. Дозорський, О. Ф. Дозорська, О. В. Гевко, Л. Є. Дедів. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2023. Вип. 22. С. 45–54.
4. Абакумов В. Г. Біомедичні сигнали. Генезис, обробка, моніторинг / В. Г. Абакумов, О. І. Рибін, Й. Сватош. Київ: Нора-прінт, 2001. 516 с.
5. Montoya-Martínez J. Effect of number and placement of EEG electrodes on measurement of neural tracking of speech / J. Montoya-Martínez, J. Vanthornhout, A. Bertrand, T. Francart // *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16, Iss. 2. P. e0246769. DOI:10.1101/800979.
6. Паляниця Ю. Б. «Розумний одяг» для віддаленого моніторингу стану серцево-судинної системи. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2023. Вип. 22. С. 114–122.
7. Puranik P. R. Nonwoven Acoustic Textiles – A Review / P. R. Puranik, R. R. Parmar, P. P. Rana // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 5, Iss. 3. P. 81–88.
8. Imbesi S. A User Centered Methodology for the Design of Smart Apparel for Older Users / S. Imbesi, S. Scataglini // *Sensors*. 2021. Vol. 21, Iss. 8. P. 2804.
9. Kan C.-W. Future Trend in Wearable Electronics in the Textile Industry / C.-W. Kan, Y.-L. Lam // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 9. P. 3914.
10. Писаренко Т. Глобальні технологічні тренди у розрізі окремих цілей сталого розвитку: монографія / Т. Писаренко, Т. Кваша, О. Паладченко [та ін.]. Київ: УкрІНТЕІ, 2019. 312 с.
11. Марчук Н. Класифікація носимих електронних пристроїв / Н. Марчук, В. Осієвська, Г. Михайлова // *Товари і ринки*. 2021. № 4. С. 68–78.
12. Lytvynenko I. Methods of processing cyclic signals in automated cardiodiagnostic complexes / I. Lytvynenko, A. Horkunenko, O. Kuchvara, Y. Palaniza // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2516. P. 116–127.
13. Herasymuk M. Application of roc-analysis to assess the quality of predicting the risk of chronic rhinosinusitis recurrence / M. Herasymuk, A. Sverstiuk, Y. Palaniza, I. Malovana // *Wiadomości Lekarskie*. 2024. Vol. 77, Iss. 2. P. 254–261.
14. Velychko D. Artificial Intelligence Based Emergency Identification Computer System / D. Velychko, H. Osukhivska, Y. Palaniza, N. Lutsyk, L. Sobaszek // *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024. Vol. 18, Iss. 2. P. 296–304.
15. Лебедев Д. Ю. Мікрокомп'ютерні засоби слухового скринінгу новонароджених на основі методів педіатричної аудіометрії та реєстрації отоакустичної емісії: дис. канд. техн. наук:

05.11.17 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2011. 226 с.

16. Паренюк Д. В. Дослідження зв'язку викликаного отоакустичної емісії та властивостей слуху, визначених засобами аудіології для дослідження слуху біологічних об'єктів: дис. ... д-ра філософії: 171 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2021.

17. Гевко О. В. Структурний синтез вібромасажної апаратури / О. В. Гевко, В. Г. Дозорський, Л. Є. Дедів [та ін.] // Перспективні технології та прилади: зб. наук. праць. Луцьк, 2022. Вип. 20. С. 23–31.

Hevko O., Palyanytsya Y.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

BLUETOOTH HEADPHONES WITH MEDICAL DIAGNOSTIC FUNCTIONS

As a result of the research, an innovative technological product was developed - Bluetooth headphones with medical diagnostic functions. Such integration allows users to receive data about their health status without the need for additional specialized devices, which makes the process of medical monitoring more convenient and accessible. Using morphological analysis methods, a structural and schematic synthesis of Bluetooth headphones with medical diagnostic functions was carried out, which allowed us to identify 20 potential design options. Of these options, four of the most effective with medical and diagnostic functions were selected by experts, which represent an integrative solution to modern challenges in the field of medicine, technology, and social inclusion. The created Bluetooth headphones are medical diagnostic tools that allow monitoring of various physiological parameters of users in real time. In particular, the principles of operation of Bluetooth headphones with the functions of a hearing aid, pulse oximeter, stuttering correction and otoacoustic emission have been developed and described. In more detail, the paper substantiates the main technical and mathematical aspects of the functioning of a Bluetooth headset with the function of an otoacoustic emission recorder, which allows assessing the functional state of the inner ear structures, in particular the outer hair cells, which are most sensitive to various damaging factors. It can be used to diagnose hearing impairments early, even before subjective symptoms appear.

Key words: *Bluetooth earphone, medical diagnostic function, monitoring, synthesis.*

УДК 621.86

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-04

Гевко Ів. Б., Стібайло О. Ю., Лещук Р. Я., Гупка А. Б., Гурик О. Я.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ШНЕКОВИХ СПІРАЛЕЙ ОСНАЩЕНИХ ЛОПАТЕВИМИ, РІЗАЛЬНИМИ ТА ПОДРІБНЮВАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

У статті представлено і проаналізовано п'ять технологічних способів виготовлення на навивних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів з основними конструктивно-технологічними параметрами. Зокрема три способи з переважанням використання ручної роботи і два механізовані. Встановлено, що перші три способи є високовартісними, низькопродуктивними і трудомісткими, й не забезпечують високої точності виготовлення, проте можуть широко використовуватись в одиничному виробництві. Значно ефективнішим в технічному та економічному плані є четвертий спосіб, проте в процесі його виконання проходить накладання отриманих елементів один на одний, що призводить до поступового зменшення вигнутого профілю на наступних елементах, та втрати їх заданої геометричної форми. Найбільш ефективним є п'ятий спосіб, який усуває основні недоліки попередніх способів, і забезпечує виготовлення таких елементів із значно якіснішими характеристиками. Результати економічного розрахунку виробничої собівартості виготовлення на навивній спіралі довжиною 1 м/п лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів показали, що її величина для першого способу становить 537,46 грн., для другого способу - 505,0 грн., для третього способу - 1127,81 грн., для четвертого способу - 166,83 грн., а для п'ятого способу є найменшою і становить 148,08 грн.

Ключові слова: спіраль, шнек, лопаті, подрібнювачі, гвинтова заготовка, спосіб, операція, обладнання, техніко-економічне обґрунтування.

Постановка проблеми. Існує значна різноманітність спіралей шнеків, відтак, і вагома відмінність у способах їх виготовлення. Конструктивні особливості цих елементів зумовлюють появу нових технологій їх виготовлення [1, 2]. Особливо широка гамма гвинтових елементів використовуються у якості робочих органів сільськогосподарської техніки, де вони використовуються для поперечного і повздовжнього транспортування сільськогосподарської продукції, її зведення і пресування, очищення від вороху, сепарації і калібрування, а також для подрібнення і змішування при виробництві різних компонентів, кормів тощо [1-9]. Зокрема використання спіралей шнеків оснащених лопатевими та подрібнювальними елементами (ножами) забезпечує їх широке застосування при приготуванні кормів з коренеплодами для годівлі свиней, великої рогатої худоби, кролів, птиці тощо [1]. Враховуючи вищесказане, техніко-економічне обґрунтування способів виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатевими та подрібнювальними елементами є актуальним завданням.

Аналіз стану досліджень. Розробленню технологій отримання гвинтових спіралей різноманітної номенклатури і типорозмірів присвячено багато досліджень [2, 10-26]. Основний акцент в них був звернутий на вивчення способів отримання спіралей прокатуванням, штампуванням, і, особливо, навиванням. Також досліджувались інші методи, такі як отримання гвинтових заготовок з плоских заготовок [10, 12, 17, 18], способи отримання гофрованих заготовок, з пружними (еластичними) поверхнями, Г-подібних, П-подібних, У-подібних та інших [11, 13, 15, 16, 19-23]. Останнім часом розроблені і вивчаються технологічні способи отримання лопатевих шнекових спіралей та гвинтових спіралей оснащених ножами-подрібнювачами [23-26], які широко використовуються в багатьох галузях економіки і, в першу чергу, в сільськогосподарському виробництві. Значна увага в проведених дослідженнях зверталась на забезпеченні високої технологічності процесів виготовлення спіралей, специфіці створення ефективного технологічного інструментарію для їх виготовлення, конструктивній і технологічній наслідуваності процесів тощо [2, 14-16, 18-23]. Проте обґрунтування ефективних способів виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатевими та подрібнювальними елементами є недостатньо вивчене і потребує подальшого дослідження.

Мета роботи. Метою роботи є проведення техніко-економічного обґрунтування способів отримання шнекових спіралей оснащених лопатевими, різальними та подрібнювальними елементами.

Виклад основного матеріалу. Виготовлення додаткових елементів на спіралях шнеків (лопатевих, різальних і подрібнювальних) вимагає реалізації цілого ряду операцій. Існують різні технологічні способи отримання цих елементів, які значно відрізняються між собою і залежать від серійності, задіяного інструментарію, обладнання і рівня механізації [23–26].

В роботі [24] опрацьовано послідовність технологічних операцій при виготовленні елементів (лопатевих, різальних і подрібнювальних) на спіралях шнеків двома основними способами, які передбачають значну частку ручної роботи з залученням елементів механізації.

Перший передбачає навивання спіралі незначної висоти з подальшим свердлінням на її торцевій поверхні (спіраль не калібрована і піддається обробці щільний пакет) кріпильних отворів (у разі механічного кріплення елементів), подальше її калібрування на потрібний крок і закріплення на валу. Цей спосіб передбачає індивідуальне отримання необхідних (лопатевих, різальних і подрібнювальних) елементів (як правило, з листового прокату) вирубуванням (вирізанням), з виготовленням на їх торцевій поверхні кріпильних отворів (у разі механічного кріплення елементів). Остання операція – кріплення (лопатевих, різальних і подрібнювальних) елементів на спіралі механічним або зварним з'єднанням. Цей спосіб доцільно використовувати в одиничному чи дрібносерійному виробництві і він є низькопродуктивним.

Другий спосіб передбачає навивання спіралі щільним пакетом з подальшим штампуванням (вирубуванням, вирізанням) вилучень відповідної форми з її поверхні, що дозволяє отримати на поверхні шнека потрібні елементи. Далі виконується операція калібрування спіралі на потрібний крок, її виставлення та закріплення на валу. Після цього, якщо існує потреба у вигинанні елементів на спіралі шнека (лопатевих, різальних і подрібнювальних) для забезпечення їх функціонального призначення, проводиться формування їх необхідного профілю. Наведений спосіб також доцільно використовувати в одиничному чи дрібносерійному виробництві і він є низькопродуктивним і трудомістким.

Також існує спосіб виготовлення елементів (лопатевих, різальних і подрібнювальних) на наперед навитих і відкаліброваних спіралях шнеків, який виконується з використанням ручного інструменту і передбачає вирізання на зовнішній крайці спіралі елементів потрібної форми і наступне їх вигинання у потрібному напрямку. Проте такий спосіб можна застосовувати лише в одиничному виробництві, він є досить трудомістким і не забезпечує високої точності виготовлення.

Конструктивно-технологічні параметри наведених способів [24] виготовлення навивних шнекових спіралей оснащених лопатевими, різальними та подрібнювальними елементами, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення навивних шнекових спіралей оснащених лопатевими, різальними та подрібнювальними елементами

№	Частота обертання, оправки, об/хв.	Повздовжня подача ролика, мм/об.	Діаметр оправки, мм	Висота спіралі, мм	Товщина заготовки, мм	Крок спіралі, мм	Площа елементів до площі спіралі
1	15...30	21...132	20...50	5...30	0,8...1,5	21...132	0,1...0,45
2	10...20	24,5...240	25...100	5...50	0,8...2,0	24,5...240	0,12...0,5
3	7,5...15	28...360	30...150	5...75	0,8...3,0	28...360	0,15...0,55
4	6...15	28...480	30...200	5...100	0,8...3,0	28...480	0,15...0,65
5	5...15	28...600	30...250	5...125	0,8...3,0	28...600	0,15...0,75

В праці [25] розроблено механізовані способи виготовлення ножів-подрібнювачів та лопатевих елементів на спіралях шнеків з використанням оригінального калібрувально-загинального інструменту (формувальних втулок), які можуть виконуватись на токарно-гвинторізних чи інших верстатах.

Перший передбачає виконання наступної серії технологічних операцій. Після навивання шнекової спіралі проводиться розрізання її зовнішньої торцевої поверхні зі встановленим кроком на відповідну глибину. Далі проводиться закріплення і введення у вихідний робочий стан формувальних елементів (оправки і ролика з формувальними втулками зі спеціальними профілями) та спіралі шнека, після чого при наданні обертового руху шпинделю та руху подачі супорту з їх допомогою реалізується процес формоутворення ножів-подрібнювачів на спіралі шнека шляхом їх загинання у відповідні вирізи формувальної втулки оправки виступами формувальної втулки ролика. По завершенню процесу формоутворення ножів-подрібнювачів проводиться калібрування спіралі шнека на потрібний крок відомим способом. Цей спосіб

потребує чіткого співпадання профілю формувальних поверхонь інструментів.

Другий передбачає виготовлення лопатевих спіралей і його здійснення є подібним до попереднього способу, з різницею у профілях торцевих поверхонь формувальних елементів, та конструкцією самого ролика, який забезпечує зворотно-поступальний рух загинального інструменту. Зворотно-поступальний рух загинального інструменту (ролика) дозволяє, на відміну від попереднього способу, проводити технологічний процес загинання елементів (лопатевих, різальних і подрібнювальних) на спіралях шнеків без точного співпадання елементів профілю (заглиблень та виступів) загинальних інструментів. Крім того, конструкція ролика може містити як загинальний пуансон (без кругового обертання), так і формувальну втулку (з круговим обертанням).

Недоліком представлених способів є накладання в процесі виготовлення отриманих елементів (лопатевих, різальних і подрібнювальних) один на одний, що призводить до поступового зменшення вигнутого профілю на наступних елементах, та втрати їх заданої геометричної форми.

В таблиці 2 представлені конструктивно-технологічні параметри способів [25] виготовлення ножів-подрібнювачів та лопатевих елементів на спіралях шнеків з використанням формувальних втулки та оправки (оснащених спеціальними профілями).

Таблиця 2 – Конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення ножів-подрібнювачів та лопатевих елементів на спіралях шнеків

№	Частота обертання, оправки, об/хв.	Повздовжня подача ролика, мм/об.	Діаметр оправки, мм	Висота спіралі, мм	Товщина заготовки, мм	Кут загику ножів-подрібнювачів, град.	Кут загику лопаті, град.
1	10...30	0,8	30...50	30...50	0,8	0...90	1...45
2	7,5...25	1,0	35...75	30...75	1,0	0...90	12...50
3	6...20	1,5	40...100	30...100	1,5	0...90	15...55
4	5...18	2,0	45...150	30...150	2,0	0...90	15...65
5	4...15	3,0	50...250	30...250	3,0	0...90	15...75

Крім того, було розроблено технологічний процес виготовлення ножів-подрібнювачів [26] на спіралях шнеків механізованим способом, який усуває основні недоліки попередніх способів, і забезпечує їх виготовлення із значно якіснішими характеристиками.

Він включає операцію попереднього калібрування спіралі з врахуванням відповідності кроку поздовжній подачі токарного верстату та висоти ножів-подрібнювачів. Далі проводяться операції (можуть проводитись одночасно) проточування та заточування зовнішнього контуру спіралі, яка попередньо закріплена в оригінальній оправці шнекового типу, на токарно-гвинторізному верстаті.

Після виконання даних операцій оправка шнекового типу із закріпленою на ній оброблюваною спіраллю шнека закріплюється в патроні ділильної головки та допоміжному центру горизонтально-фрезерного або круглошліфувального верстата, на якому проводиться розрізання зовнішнього контуру спіралі на встановлену ширину та глибину по усій її довжині з подальшим повторенням процесу (при провертанні патрона ділильної головки на кут, що відповідає кроку розташування виготовлюваних елементів на спіралі), аж до виготовлення усіх заготовок під ножі-подрібнювачі на зовнішній поверхні спіралі.

Наступна операція – загинання заготовок під ножі-подрібнювачі на необхідний кут з допомогою формувального ролика (може проводитись одночасно з попередньою операцією на горизонтально-фрезерному або круглошліфувальному верстаті, або на токарно-гвинторізному верстаті).

Остання операція передбачає калібрування оснащеної ножами-подрібнювачами спіралі на потрібний крок.

В таблиці 3 відображено конструктивно-технологічні параметри операцій проточування та заточування зовнішньої крайки шнекової спіралі, а в таблиці 4 операції розрізання і загинання елементів (ножів-подрібнювачів) на спіралі шнека [26].

Таблиця 3 – Конструктивно-технологічні параметри операцій проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека

№	Частота обертання оправки, об/хв.	Поздовжня подача інструменту, мм/об.	Зовнішній діаметр спіралі, мм	Висота спіралі, мм	Товщина спіралі, мм
1	3...9	7...18	50	10...15	0,8...2,0
2	3...12	7...20	80	10...25	1,0...2,5
3	3...15	7...25	100	10...35	1,0...3
4	3...18	7...30	125	10...45	1,2...3,5
5	3...22	7...35	150	10...55	1,5...3,5
6	3...25	7...45	200	10...75	1,8...4,0
7	3...30	7...50	250	10...90	2,0...4,0

Таблиця 4 – Конструктивно-технологічні параметри операції розрізання і загинання елементів (ножів-подрібнювачів) на спіралі шнека

№	Частота обертання фрези, об/хв.	Поздовжня подача фрези, мм/зуб	Поздовжня подача ролика, мм/хв.	Зовнішній діаметр шнека, мм	Кут нахилу елементів, град.	Товщина спіралі, мм	Висота елементів, мм
1	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	50	1...90	0,8...2,0	5...10
2	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	80	1...90	1,0...2,5	5...12
3	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	100	1...90	1,0...3	5...15
4	2800...11000	0,02...0,03	400...900	125	1...90	1,2...3,5	5...20
5	2800...11000	0,02...0,03	400...900	150	1...90	1,5...3,5	5...25
6	2800...11000	0,02...0,035	300...800	200	1...90	1,8...4,0	5...35
7	2800...11000	0,025...0,035	300...800	250	1...90	2,0...4,0	5...40

Аналізуючи проведені дослідження [24] можна зробити припущення, що наведені способи виготовлення додаткових елементів (лопатевих, різальних і подрібнювальних) на спіралях шнеків, що виготовлені навиванням, є значно дешевшими (приблизно в 4...6 разів) у порівнянні із способами, які використовують операції штампування кілець з додатковими елементами з їх подальшим розгинанням та зварюванням чи прокатування з подальшим кріпленням цих елементів. Тож зосередимось на проведенні техніко-економічного обґрунтування способів виготовлення шнекових спіралей отриманих навиванням і оснащених лопатевидами, різальними та подрібнювальними елементами. Для цього розглянемо наступні способи виготовлення на навивних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів, які представлено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Технологічні способи виготовлення на навивних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів

№ п/п	Спосіб виготовлення	Перелік операцій виготовлення на навивних спіралях елементів	Використання матеріалу, %
1	2	3	4
1.	Калібрування спіралі (незначної висоти) і закріплення на ній елементів	1. Свердління кріпильних отворів на торцевій поверхні щільно навитої спіралі. 2. Калібрування спіралі. 3. Роздільна операція (вирубування, вирізання) елементів. 4. Свердління кріпильних отворів на торцевій поверхні елементів. 5. Кріплення елементів на спіралі.	30 – 90
2.	Виконання розділювальної операції на щільно навитій спіралі та її калібрування	1. Розділювальна операція (вирубування, вирізання) виготовлення елементів на щільно навитій спіралі. 2. Калібрування спіралі. 3. Формозмінна операція вигинання елементів на спіралі (виконується при потребі).	30 - 90

Продовження таблиці 5

1	2	3	4
3.	Формування необхідного профілю елементів на відкаліброваній спіралі вирізанням і вигинанням	1. Калібрування спіралі. 2. Розділювальна операція вирізання елементів; 3. Формозмінна операція вигинання елементів на спіралі (виконується при потребі).	30 - 90
4.	Часткове розрізання зовнішньої торцевої поверхні щільно навитої спіралі, загинання елементів з використанням формувальних втулки та оправки, з подальшим калібруванням	1. Розділювальна операція часткового розрізання зовнішньої торцевої поверхні щільно навитої спіралі. 2. Загинання елементів з використанням формувальних втулки та оправки (оснащені спеціальними профілями). 3. Калібрування спіралі.	97 - 99
5.	Проточування та заточування зовнішнього контуру попередньо відкаліброваної спіралі, часткове розрізання її зовнішньої торцевої поверхні і загинання на ній елементів, з подальшим калібруванням на потрібний крок	1. Попереднє калібрування спіралі (з врахуванням відповідності кроку поздовжній подачі токарного верстату та висоті ножів-подрібнювачів). 2. Проточування і заточування зовнішнього контуру спіралі. 3. Розділювальна операція часткового розрізання зовнішньої торцевої поверхні спіралі (виготовлення заготовок під елементи) одночасно з формозмінною операцією загинання елементів. 4. Калібрування спіралі.	97 - 99

Вихідні дані, для проведення техніко-економічного обґрунтування розроблених способів виготовлення на наливних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів, наведено в таблиці 6.

З використанням даних наведених у таблицях 5 і 6 виконано економічний розрахунок наведених технологічних способів виготовлення на наливній спіралі довжиною 1 м/п (матеріал - сталь 08кп) лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів, при її товщині - 3 мм, висоті - витка - 30 мм (для способу №1 з табл. 5 – 16 мм, з подальшим нарощуванням за рахунок 6 елементів на одному витку до 30 мм), зовнішньому діаметрі - 100 мм, кроку - 90 мм, з процентом використання матеріалу (для способів №1 – №3 наведених в табл. 5) - 70% (прийнято вартість відходів у розмірі 5% від вартості матеріалів).

При виконанні розрахунків загальнопромислові витрати прийнято у розмірі 160% від з/п виробничих робітників, а вартість смуги із прайс-листа ПМП «Рост» від 10.03.2025 р. Для способу №1 використовується смуга висотою 16 мм (2 м/п вартістю 15,48 грн. за м/п) і для проведення роздільної операції по виготовленню лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів смуга висотою 30 мм (2 м/п вартістю 28,25 грн. за м/п), а також кріпильні елементи (67 шт. вартістю 0,6 грн./шт.). Для способів №2 – №5 використовується смуга висотою 30 мм (3,25 м/п вартістю 28,25 грн. за м/п).

Також прийнято годинну тарифна ставка у розмірі 48 грн. (для робітника 1-го розряду) згідно нормативних актів на 01.01.2025 р. Прийнято наступні тарифні коефіцієнти: II розряду - 1,09, III розряду - 1,24, IV розряду - 1,35, V розряду - 1,54.

Вартість електроенергії і тариф на розподіл електроенергії, що встановлені для побутових споживачів в Тернопільській обл. «Укренерго» від 01.01.2025 р., прийнято 2256,66 грн. за 1 МВт-год. без ПДВ та 686,23 грн. за 1 МВт-год. без ПДВ.

Таблиця 6 – Вихідні дані для проведення техніко-економічного обґрунтування способів виготовлення на навивних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів

Номер способу з табл. 5	Спосіб №1 з табл. 5	Спосіб №2 з табл. 5	Спосіб №3 з табл. 5	Спосіб №4 з табл. 5	Спосіб №5 з табл. 5
Вихідні дані					
Відходи матеріалів, %	-	30	30	-	-
Обладнання та інструментарій:					
- 1 операція:	Верстат OPTIdrill RB 6T 3009161	Прес КД 2128 і спеціальний штамп	Верстат 16K20 і спеціальне оснащення	Шліф-машина кутова Dnipro-M GL-125S	Верстат 16K20 і спеціальне оснащення
- 2 операція:	Верстат 16K20 і спеціальне оснащення	Верстат 16K20 і спеціальне оснащення	Шліф-машина кутова Dnipro-M GL-125S	Верстат 16K20 і формувальний інструмент	Верстат 16K20 і ріжучий інструмент
- 3 операція:	Прес КД 2128 і спеціальний штамп	Універсальний ручний інструмент	Універсальний ручний інструмент	Верстат 16K20 і спеціальне оснащення	Верстат 6P82 і спеціальний інструмент
- 4 операція:	Верстат OPTIdrill RB 6T 3009161				Верстат 16K20 і спеціальне оснащення
- 5 операція:	Універсальний ручний інструмент				
Розряд робітника:					
- 1 операція:	2	3	4	3	4
- 2 операція:	4	4	2 і 3	5	5
- 3 операція:	3	2 і 3	2 і 3	4	5
- 4 операція:	2				4
- 5 операція:	2 і 3				
Тривалість операції, хв.:					
- 1 операція:	3,0	3,0	4,0	6,0	4,0
- 2 операція:	4,0	4,0	120,0	12,0	5,0
- 3 операція:	5,0	90,0	90,0	4,0	3,0
- 4 операція:	22,2				4,0
- 5 операція:	66,7				
Енерг. потужність обладнання, кВт/год.:					
- 1 операція:	0,75	9,0	11,0	1,05	11,0
- 2 операція:	11,0	11,0	1,05	11,0	11,0
- 3 операція:	9,0	-	-	11,0	7,5
- 4 операція:	0,75				11,0
- 5 операція:	-				
Вартість обладнання, тис. грн.:					
- 1 операція:	20,3	193,0	245,0	1,44	245,0
- 2 операція:	245,0	245,0	1,44	245,0	245,0
- 3 операція:	193,0	-	-	245,0	241,6
- 4 операція:	20,3				245,0
- 5 операція:	-				

Результати проведеного економічного розрахунку виробничої собівартості виготовлення на навивній спіралі довжиною 1 м/п лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів різними способами, при використанні відомої методики [23], відображено в таблиці 7.

Таблиця 7 – Результати економічного розрахунку виробничої собівартості виготовлення на навивній спіралі довжиною 1 м/п лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів

Елементи витрат, грн.	Спосіб №1 з табл. 2	Спосіб №2 з табл. 2	Спосіб №3 з табл. 2	Спосіб №4 з табл. 2	Спосіб №5 з табл. 2
Сировина і основні матеріали з врахуванням відходів	127,66	90,5	90,5	91,88	91,88
Зарплата виробничих робітників	155,58	175,06	395,76	25,06	18,5
Енергія на технологічні цілі	5,29	3,48	8,33	8,93	8,11
Загальновиробничі витрати	248,93	280,96	633,22	40,96	29,59
Разом виробнича собівартість	537,46	505,0	1127,81	166,83	148,08

Аналізуючи отримані результати викладені в таблиці 7 робимо висновок, що спосіб №5, який передбачає проточування та заточування зовнішнього контуру попередньо відкаліброваної спіралі, з подальшим частковим розрізанням її зовнішньої торцевої поверхні і загинанням на ній елементів та калібруванням на потрібний крок, є найефективнішим з технічного та економічного напрямку. Він забезпечує найвищу точність отримання елементів на спіралях і є найдешевшим. Найбільш наближеним по ефективності до нього є спосіб №4, який передбачає часткове розрізання зовнішньої торцевої поверхні щільно навитої спіралі, загинання елементів з використанням формувальних втулки та оправки, і її калібрування. Ці обидва способи використовують мінімальну кількість ручної роботи, проте їх використання не є ефективним в одиничному виробництві і доцільне починаючи з дрібносерійного виробництва, позаяк вони потребують створення спеціального оснащення і формувального інструменту. Перші три способи є високовартісними, низькопродуктивним і трудомісткими, й не забезпечують високої точності виготовлення, проте можуть широко використовуватись в одиничному виробництві.

Висновки. Представлено і проаналізовано п'ять технологічних способів виготовлення на навивних спіралях лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів з їхніми основними конструктивно-технологічними параметрами. Зокрема три способи з переважанням використанням ручної роботи: №1 - калібрування спіралі (незначної висоти) і закріплення на ній елементів; №2 - виконання розділювальної операції на щільно навитій спіралі та її калібрування; №3 - формування необхідного профілю елементів на відкаліброваній спіралі вирізанням і вигинанням; і два механізовані способи: №4 - проточування та заточування зовнішнього контуру попередньо відкаліброваної спіралі, з подальшим частковим розрізанням її зовнішньої торцевої поверхні і загинанням на ній елементів та калібруванням на потрібний крок; №5 - часткове розрізання зовнішньої торцевої поверхні щільно навитої спіралі, загинання елементів з використанням формувальних втулки та оправки, і її калібрування. Встановлено, що перші три способи є високовартісними, низькопродуктивним і трудомісткими, й не забезпечують високої точності виготовлення, проте можуть широко використовуватись в одиничному виробництві. Значно ефективнішим в технічному та економічному плані є спосіб №4, проте в процесі його виконання проходить поступове накладання виготовлюваних елементів один на одний, що призводить до поступового зменшення вигнутого профілю на наступних елементах та втрати їх заданої геометричної форми. Найбільш ефективним є спосіб №5, який усуває основні недоліки попередніх способів, і забезпечує їх виготовлення із значно якіснішими характеристиками. Результати економічного розрахунку виробничої собівартості виготовлення на навивній спіралі довжиною 1 м/п лопатевих, різальних чи подрібнювальних елементів показали, що її величина для способу №1 становить 537,46 грн., для способу №2 становить 505,0 грн., для способу №3 становить 1127,81 грн., для способу №4 становить 166,83 грн., а для способу №5 є найменшою і становить 148,08 грн.

Інформаційні джерела

1. Грицай Ю. В. Обґрунтування параметрів комбінованого шнекового транспортера-подрібнювача коренеплодів: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.11. Тернопіль, 2020. 137 с.
2. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
3. Rogatinskiy R., Hevko I., Dyachun A., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. Acta Technologica Agriculturae. 2019. No. 4. P. 140-145.

4. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей. 2000. Вип. 6. С. 129-135.
5. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей. 2020. Вип. 45. С. 84-93.
6. Гевко І. Б., Вітровий А. О., Гурик О. Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей. 2001. Вип. 8. С. 72-82.
7. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. Вісник ТНТУ. 2011. Т. 16. № 1. С. 69-77.
8. Лещук Р., Гевко І., Комар Р. Результати експериментальних досліджень гвинтових переважувальних механізмів. Вісник ТДТУ. 2003. Т. 8. № 4. С. 56-61.
9. Hevko I. B., Dyachun A. Ye., Hud V. Z., Rohatynska L. R., Klendiy V. M. Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. INMATEH - Agricultural Engineering. 2015. Vol. 45. No. 1. P. 77-86.
10. Feng G.-I., Bai Y.-s. Some moulding ways of spiral vane. Coal Mine Machinery. 2006. Vol. 27. No. 9. P. 835-849.
11. Hevko I. B., Dyachun A. Ye., Lyashuk O. L., Martsenko S. V., Gypka A. B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. INMATEH - Agricultural Engineering. 2016. Vol. 49. No. 2. P. 77-82.
12. Li Z. F., Li Q. J. Design of combined helical blade manufacturing device. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 753-755. P. 1386-1390. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr753-755.1386.
13. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies / Hevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval S. Scientific Journal of TNTU. 2024. Vol. 113. No. 1. P. 5-15.
14. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. Acta Technologica Agriculturae. 2017. No. 2. P. 36-41. DOI: 10.1515/ata-2017-0007.
15. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning / Hevko I., Diachun A., Lyashuk O., Vovk Y., Hupka A. Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of DSMIE-2021, June 8-11, 2021, Lviv, Ukraine. Vol. 1. P. 385-394.
16. Study of power parameters of the screw spirals forming / Lyashuk O., Rogatynskyy R., Hevko I., Navrotska T., Diachun A. Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of DSMIE-2024, June 4-7, 2024, Pilsen, Czech Republic. Vol. 1. P. 287-298.
17. Васильків В. В., Радик Л. Д., Гевко І. Б. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. Наукові нотатки ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 12-18.
18. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формотворення різнопрофільних гвинтових заготовок. Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с. ISBN 966-305-014-4.
19. Гевко Р. Б., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Залуцький С. З., Станько А. І., Довбуш Т. А. Гвинтові конвеєри з еластичними поверхнями. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. 239 с.
20. Гевко І. Б., Клендій В. Технологічність конструкцій гвинтових секційних робочих органів. Вісник ТНТУ. 2015. Т. 79, № 3. С. 148-155.
21. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 2019. 207 с.
22. Гевко Б. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Драган А. П., Новосад І. Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя. 2008. 367 с.
23. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третьяков О. Л. Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 2025. 457 с.
24. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Брикса А. О., Стібайло О. Ю., Коваль С. О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів.

Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39). Ч. 2. С. 24-34.

25. Стібайло О. Ю. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41). Ч. 2. С. 55-64.

26. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Гупка А. Б. Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 11(42). Ч. 1. С. 31-41.

Ivan Hevko, Oleg Stibailo, Roman Leshchuk, Andrii Gupka, Oleg Hurik
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTITUTION OF METHODS FOR MANUFACTURING SCREW ROLLERS EQUIPPED WITH BLADES, CUTTING AND CRUSHING ELEMENTS

The article presents and analyzes five technological methods for manufacturing blade, cutting, or grinding elements on winding spirals with their main design and technological parameters. In particular, three methods with the predominant use of manual labor and two mechanized ones. It has been established that the first three methods are high-cost, low-productivity, and labor-intensive, and do not provide high manufacturing accuracy, but can be widely used in single-unit production. The fourth method is much more effective in technical and economic terms, however, in the process of its implementation, the manufactured elements are gradually superimposed on each other, which leads to a gradual reduction in the curved profile on subsequent elements and the loss of their given geometric shape. The most effective is the fifth method, which eliminates the main disadvantages of the previous methods and ensures their production with significantly higher quality characteristics.

The results of the economic calculation of the production cost of manufacturing blade, cutting or grinding elements on a winding spiral with a length of 1 m/s showed that its value for the first method is 537.46 UAH, for the second method - 505.0 UAH, for the third method - 1127.81 UAH, for the fourth method - 166.83 UAH, and for the fifth method it is the smallest and is 148.08 UAH.

Keywords: spiral, auger, blades, shredders, screw blank, method, operation, equipment, feasibility study.

УДК 621.382

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-05

Гребьонкін Є. О., Заворотний В. Ф.

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

МУЛЬТИСЕНСОРНІ ПЛАТФОРМИ НА ОСНОВІ МЕМС ДЛЯ АНАЛІЗУ ГАЗІВ

У роботі здійснено порівняльний аналіз різних мультисенсорних МЕМС платформ для аналізу газів. Для ефективного детектування газових сумішей та індивідуальних газів виявлено, що результати вимірювань, такі як чутливість, швидкість відповіді та селективність сенсорів, підтверджуються теоретичними та експериментальними дослідженнями. Одержані дані дозволяють зробити висновок, що використання мультисенсорних МЕМС платформ є перспективним для точного та швидкого аналізу газів, оскільки вони поєднують високу чутливість та можливість одночасного моніторингу кількох параметрів. У результаті аналізу виявлено, що для певних типів газів доцільно використовувати платформу з інтегрованими сенсорами для виявлення кількох параметрів газових сумішей, що забезпечує більш точні результати в порівнянні з використанням окремих сенсорів.

Ключові слова: МЕМС, мультисенсорні платформи, газові сенсори, теплові сенсори, фотоакустичні сенсори, електрохімічні сенсори, сепараційні колонки, прекоцентрації, автономні сенсори.

Постановка проблеми. Зростання потреб у моніторингу якості повітря, контролі промислових процесів, виявленні небезпечних газів та інших застосувань обумовлює стрімкий розвиток технологій газового аналізу. Газові сенсори є ключовим інструментом у цих сферах завдяки їх компактності, швидкій реакції та здатності до інтеграції в сучасні пристрої. Проте кожна з існуючих технологій газових сенсорів має свої вади, які обмежують їх ефективність і застосування в реальних умовах.

Однією з основних проблем є недостатня селективність сенсорів. Наприклад, електрохімічні сенсори демонструють високу чутливість до певних газів, але їхні характеристики часто змінюються під впливом вологості, температури чи інших домішок у газовій суміші [1, с. 317]. Акустичні сенсори, такі як кварцові мікроваги (QCM), є дуже чутливими до змін маси, але їх точність залежить від умов навколишнього середовища. Оптичні сенсори мають високу точність і селективність, але зазвичай потребують складних оптичних систем, що обмежує їх використання у компактних і недорогих пристроях [2, с. 61]. У той же час, теплові сенсори ефективно визначають термофізичні параметри газів, але вони можуть демонструвати меншу чутливість до низьких концентрацій певних газів [3, с. 28].

Ще однією значущою проблемою є стабільність роботи сенсорів при довготривалому використанні. Наприклад, хеморезистивні матеріали з часом деградують, що впливає на їх відтворюваність і точність. Інші сенсори можуть бути чутливими до фізичних пошкоджень або впливу агресивних середовищ.

Існує декілька способів подолання цих викликів. Один із них – конструктивне вдосконалення сенсорів, зокрема шляхом використання наноматеріалів [2, с. 63]. Інший підхід передбачає покращення обробки корисних сигналів, наприклад, із застосуванням технологій штучного інтелекту. Також, доволі перспективним напрямом є створення мультисенсорних платформ, які поєднують різні типи сенсорів на одній МЕМС-основі, що відкриває нові можливості для підвищення точності та універсальності вимірювань. Такий підхід дозволяє:

- Підвищити селективність шляхом об'єднання даних з різних типів сенсорів, що реагують на різні фізико-хімічні властивості газів. Наприклад, поєднання електрохімічних і теплових сенсорів дозволяє враховувати вплив температури і вологості на чутливість.

- Покращити точність і чутливість, оскільки дані з різних сенсорів можуть доповнювати один одного. Наприклад, акустичні сенсори можуть забезпечити високу чутливість до маси, а оптичні — високу селективність до конкретних газів.

- Підвищити надійність і стабільність завдяки використанню резервування даних. У разі деградації одного типу сенсора його функцію можуть частково компенсувати інші.

- Оптимізувати енергоспоживання і зменшити розмір системи завдяки інтеграції всіх елементів на одній платформі, що особливо важливо для портативних і автономних пристроїв.

Таким чином, мультисенсорні платформи на основі MEMC технологій є ефективним рішенням для нівелювання недоліків окремих типів сенсорів, що робить їх перспективними для широкого спектра застосувань у газовому аналізі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі мультисенсорних MEMC платформ для аналізу газів демонструють суттєвий прогрес у підвищенні чутливості, селективності та стабільності роботи газових сенсорів. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що дуже перспективним підходом є поєднання різних типів сенсорів на єдиній платформі для покращення якості вимірювань.

Дослідження, присвячені мультисенсорним платформам, можна поділити на три основні групи. Перша група включає платформи, що поєднують різні типи газових сенсорів, наприклад теплопровідні, оптичні та електрохімічні [4, с. 1159; 6, с. 432]. Такі системи забезпечують розширений функціонал та покращену селективність завдяки комбінованому аналізу сигналів з різних джерел. Друга група досліджень фокусується на платформах із однотипними сенсорами, але з використанням різних матеріалів або вимірювальних режимів, що дозволяє досягти високої точності аналізу певних газів [8, с. 1; 9, с. 187; 10, с. 1203; 11, с. 4р]. Третя група охоплює мультисенсорні платформи, що інтегрують газові сенсори з іншими приладами, такими як датчики температури, вологості або потоку газу, або преконцентратори та сепараційні колонки, що значно розширює можливості системи [12, с. 410; 14, с. 145].

Значна увага приділяється також методам обробки сигналів, зокрема застосуванню алгоритмів машинного навчання для підвищення точності ідентифікації газів та компенсації перехресної чутливості. Крім того, сучасні дослідження активно зосереджені на мініатюризації сенсорних елементів і зниженні енергоспоживання, що відкриває перспективи для впровадження автономних газоаналізаторів у портативних та бездротових системах моніторингу.

Мета роботи. Метою статті є проведення аналізу сучасних досліджень і оцінка перспектив використання мультисенсорних платформ на основі MEMC для газового аналізу, а також виявлення ключових напрямів для подальшого вдосконалення таких систем шляхом комбінування сенсорів різних типів.

Викладення основного матеріалу. Класифікація мультисенсорних MEMC платформ.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій показав, що мультисенсорні MEMC платформи для аналізу газів можна умовно поділити на три групи залежно від їх конфігурації: платформи з газовими сенсорами різних типів, платформи з однотипними газовими сенсорами та платформи, де газові сенсори поєднуються із приладами іншого призначення.

Платформи з газовими сенсорами різних типів. Варіант конструкції платформи даного типу, де різні сенсори працюють на основі фізичної взаємодії з газом і виготовлені за технологією поверхневої мікрообробки на спільному кремнієвому кристалі представлено у [4, с. 1159]. В такому сенсорі, визначення вуглекислого газу (CO_2) та водню (H_2) здійснюється тепловим сенсором за принципом вимірювання теплопровідності, та зручно реалізується з використанням MEMC технологій [5, с. 233]. Інфрачервоні спектри поглинання CH_4 , CO , CO_2 та C_2H_6 , зображені на рисунку 1, добре розділені й можуть бути ідентифіковані за допомогою інфрачервоної спектроскопії у діапазоні довжин хвиль від 3.4 до 4.3 мкм. Для підвищення спектральної роздільної здатності як основний метод оптичного детектування у розглянутій платформі обрано масив недисперсійних інфрачервоних аналізаторів (NDIR), а також розглянуто можливість додаткового розміщення фотоакустичного сенсору для підвищення селективності. Основними викликами у розробці є сумісність технології виготовлення з інтегральними схемами та коротка оптична траса в мікросистемі [4, с. 1158].

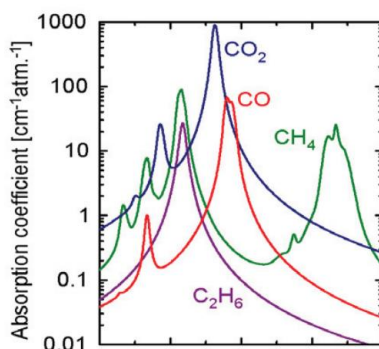


Рисунок 1 – Інфрачервоні спектри поглинання CH_4 , CO , CO_2 та C_2H_6 [4, с. 1159]

Підсумовуючи, в розглянутому варіанті конструкції використовуються три окремі типи газових сенсорів: Тепловий сенсор (базується на визначенні теплопровідності газу), недисперсійний інфрачервоний аналізатор (NDIR) та фотоакустичний сенсор

Запропонована мультисенсорна MEMS платформа зображена на рисунку 2. На схемі представлено двочипове рішення, що складається з основного сенсорного чипа (знизу) та оптичного фільтра (зверху).

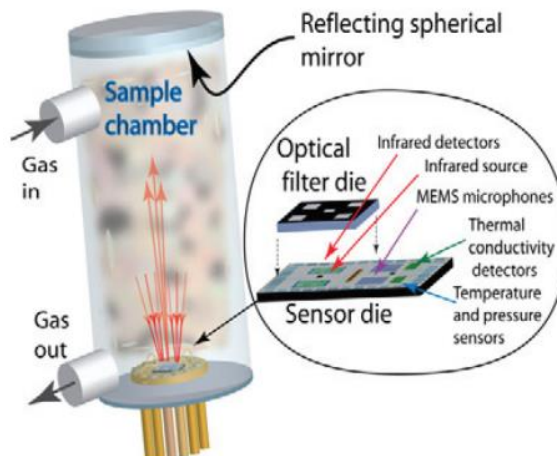


Рисунок 2 – Запропонована мультисенсорна платформа [4, с. 1159]

Конструктивно, розглянута платформа складається з таких компонентів:

- Детектор теплопровідності газу
- Теплові інфрачервоні джерела для NDIR та фотоакустичного методу
- Теплові інфрачервоні детектори для NDIR
- MEMC-мікрофони для фотоакустичної сенсорики
- Датчики температури (термопари) та тиску для компенсації впливу зовнішніх факторів

Запропонована комбінація сенсорів значно покращує селективність аналізу газових сумішей завдяки використанню кількох фізичних принципів одночасно. Поєднання методу вимірювання теплопровідності для визначення H_2 і CO_2 , інфрачервоного поглинання для CH_4 , CO і CO_2 , а також фотоакустичного аналізу дозволяє компенсувати недоліки кожного окремого підходу. Використання масиву термопар у недисперсійних інфрачервоних аналізаторах підвищує спектральну роздільну здатність, а додавання фотоакустичного сенсора допомагає покращити чутливість системи.

Така комбінація методів виявилася ефективною для багатокомпонентного аналізу газів, оскільки забезпечує високу вибірковість і знижує ризик перехресної чутливості. Однак реалізація цієї інтегрованої системи вимагає технологічно складного виробництва та оптимізації оптичного шляху в мікросистемах. Перші прототипи показали перспективність такого підходу, але подальші дослідження необхідні для покращення стабільності та точності вимірювань.

Інший відомий варіант конструкції платформи з газовими сенсорами різних типів представлено у [6, с. 432]. Він являє собою монолітно інтегровану мікросистему для виявлення органічних та неорганічних газів, яка поєднує три основні типи сенсорів: резонансні кантилевери, ємнісні сенсори та електрохімічні сенсор у вигляді пластин-мікронагрівачів. Резонансні кантилевери та ємнісні сенсори здебільшого чутливі до летких органічних сполук, коли як електрохімічні сенсори переважно використовуються для детектування неорганічних газів [6, с. 437]. Система виготовлена за допомогою 0.8- μm КМОН технології, що дозволяє інтегрувати сенсорні елементи разом із електронікою обробки сигналів та цифровим комунікаційним інтерфейсом (рис. 3).

Основу масочутливих вимірювань у цій мікросистемі складають кремнієві кантилевери, вкриті полімерними шарами. Поглинання газів змінює масу полімерного шару, що, своєю чергою, спричиняє зсув резонансної частоти кантилевера [7, с. 3084]. Вимірювання частоти здійснюється п'єзорезистивним датчиком, інтегрованим у структуру кантилевера.

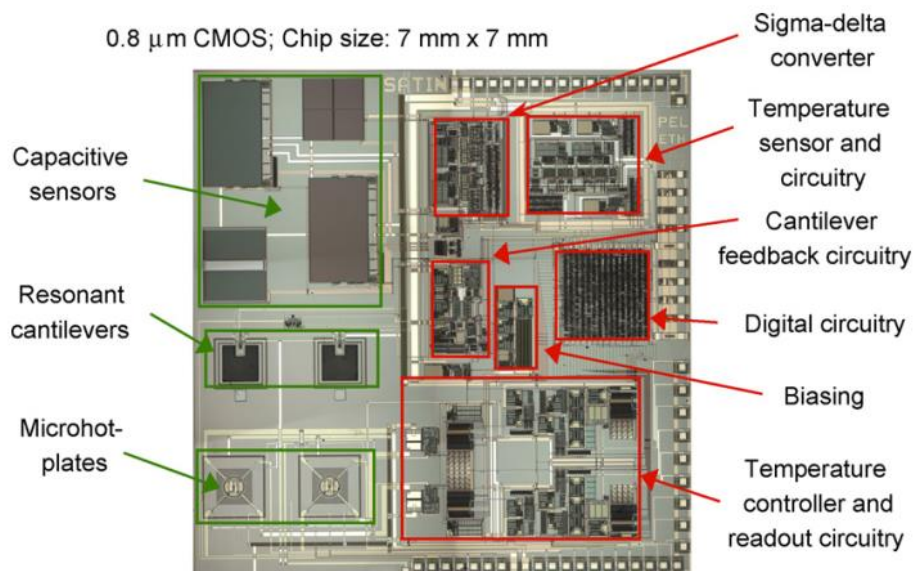


Рисунок 3 – Мікрофотографія запропонованої платформи [6, с. 432]

Альтернативно, ємнісні сенсори, що базуються на інтердигітальних електродах, використовуються для аналізу змін діелектричних властивостей полімерного шару при поглинанні аналіту. Даний підхід дозволяє отримати додаткову інформацію про склад газової суміші, оскільки різні леткі органічні сполуки демонструють характерні зміни ємності залежно від їхньої полярності та хімічної природи.

Для детектування неорганічних газів, зокрема оксиду вуглецю, використовується металооксидна чутлива плівка, нанесена на пластину-мікронагрівач. Чутливий шар складається з нанокристалічного SnO_2 , легованого 0.2% Pd, що підвищує його чутливість до CO. Температурний контроль здійснюється за допомогою терморезистора, виготовленого з полікристалічного кремнію та інтегрованого у нагрівальний елемент, що дозволяє підтримувати стабільну робочу температуру у межах 200–350°C [6, с. 434]. Опір металооксидного шару змінюється внаслідок окисно-відновних реакцій, що відбуваються на його поверхні при взаємодії з цільовими газами.

Покращена селективність сенсора досягається завдяки комбінації різних типів сенсорів та алгоритмів обробки даних. Використання ємнісних сенсорів, які є чутливими до змін вологості, дозволяє компенсувати перехресну чутливість електрохімічного сенсора до водяної пари. Окрім того, завдяки застосуванню полімерних покриттів різної товщини можна досягти додаткової селективності до летких органічних сполук, оскільки їхня дифузія у полімер залежить від молекулярної маси та коефіцієнта розподілу. Таким чином, розглянута мікросистема забезпечує точне визначення як органічних, так і неорганічних газів навіть у складних газових середовищах.

Платформи з однотипними газовими сенсорами. Варіант конструкції платформи, в якому мікросистема являє собою двофункціональний сенсор для вимірювання теплопровідності та інфрачервоного (ІЧ) поглинання газів, виготовлений за технологією КНІ КМОН МЕМС, представлено у [8, с. 1]. Основна концепція пристрою базується на використанні одного резистивного мікронагрівача як для теплового сенсорного елемента, так і для джерела інфрачервоного випромінювання. Сенсор виготовлено на комерційній фабриці за 1- μm технологічним процесом, а його розміри не перевищують 1×1 мм², що робить його перспективним для застосування у портативних пристроях. Конструкцію сенсора зображено на рисунку 4.

Конструктивно сенсор базується на пластині КНІ з вольфрамовим мікронагрівачем. Вольфрамовий елемент інтегрований у металізаційний шар КМОН, що забезпечує повторюваність процесу та високу стабільність характеристик. Нагрівач розташований між шарами діоксиду кремнію та покритий верхнім пасиваційним шаром. Тонка мембрана товщиною 5 мкм формується за допомогою глибокого реактивного іонного травлення на зворотній стороні пластини, що забезпечує високу термічну ізоляцію нагрівального елемента [8, с. 1, 2]. Базовий принцип роботи сенсора ґрунтується на вимірюванні зміни електричного опору мікронагрівача, що залежить від теплопровідності навколишнього газового середовища, та розглянуто у [2, с. 62]. Водночас, у випадку аналізу парникових газів, зокрема CO_2 , відбувається

додаткове поглинання інфрачервоного випромінювання, що вносить ще одну змінну до загального температурного балансу.

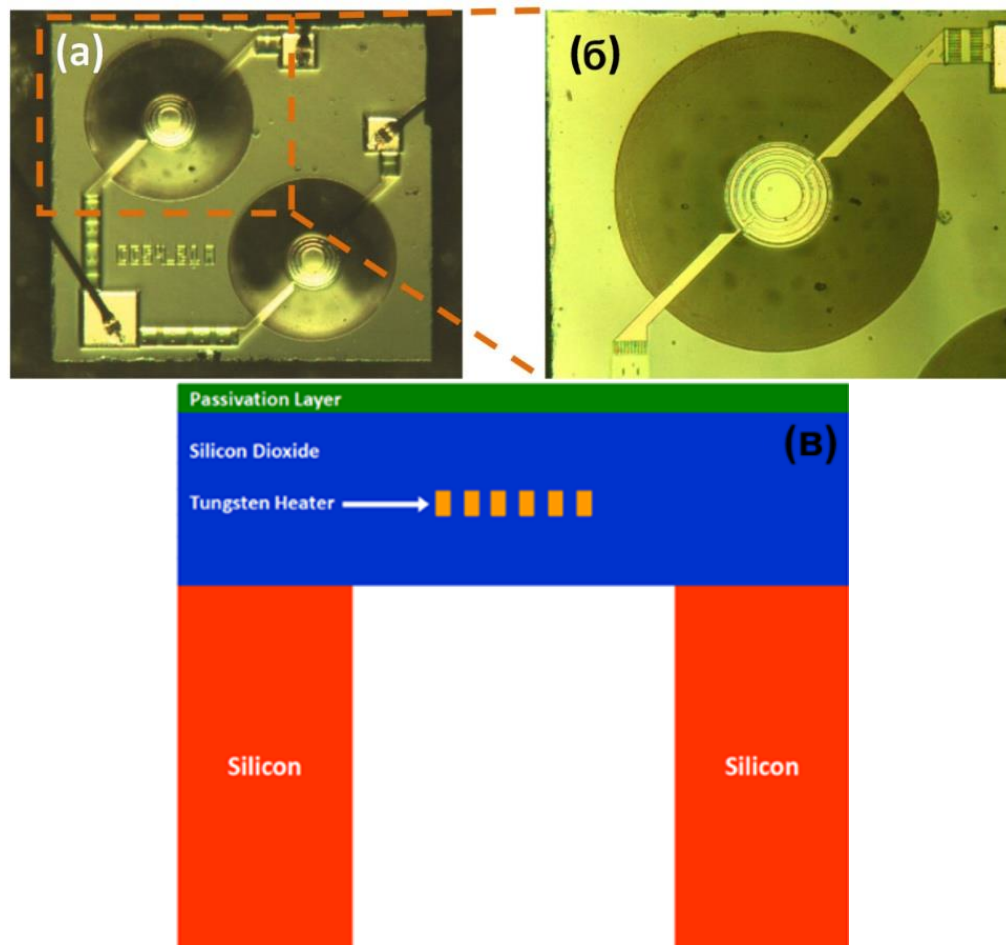


Рисунок 4 – Конструкція розглянутого сенсора:

(а) - оптична мікрофотографія повного чипа із двома сенсорами, (б) - збільшена фотографія одного сенсора з нагрівальним елементом на мембрані, (в) - схематичне зображення поперечного перерізу сенсора (не в масштабі) [8, с. 1, 3]

Однією з ключових особливостей сенсора є його здатність виконувати як вимірювання теплопровідності, так і детектування газів на основі ІЧ-поглинання за допомогою єдиного елемента. Це дозволяє розрізняти гази, які мають схожу теплопровідність, але відрізняються інфрачервоними характеристиками. Для повітря та аргону вольфрамовий нагрівач показує лінійну зміну опору відповідно до теплопровідності. Водночас, для CO_2 спостерігається перетин кривих потужності на рівні 10 мВт, що свідчить про домінування механізму ІЧ-поглинання, як зображено на рисунку 5.

Розглянутий підхід забезпечує підвищену селективність сенсора, оскільки поєднання двох методів дозволяє покращити диференціацію газів. Використання мікронагрівача як джерела ІЧ-випромінювання та сенсора одночасно значно знижує енергоспоживання пристрою, яке не перевищує 45 мВт при 700°C . Висока термічна ізоляція мембрани також забезпечує можливість інтеграції електроніки керування та обробки сигналів на тому ж чипі, що робить цей сенсор перспективним рішенням для портативних газоаналізаторів.

Інший варіант конструкції платформи з однотипними сенсорами, запропонований у [9, с. 187; 10, с. 1203], є детектором теплопровідності з компенсацією впливу потоку газу, який реалізований на основі подвійної MEMS-структури. Основною особливістю пристрою є використання двох тонкоплівкових сенсорів, розташованих на мембранах в одному чипі, що працюють диференційно. Завдяки різній глибині вимірювальних камер обидва сенсори демонструють різну реакцію на зміну теплопровідності газів, що дозволяє ефективно компенсувати вплив потоку та підвищити точність вимірювання.

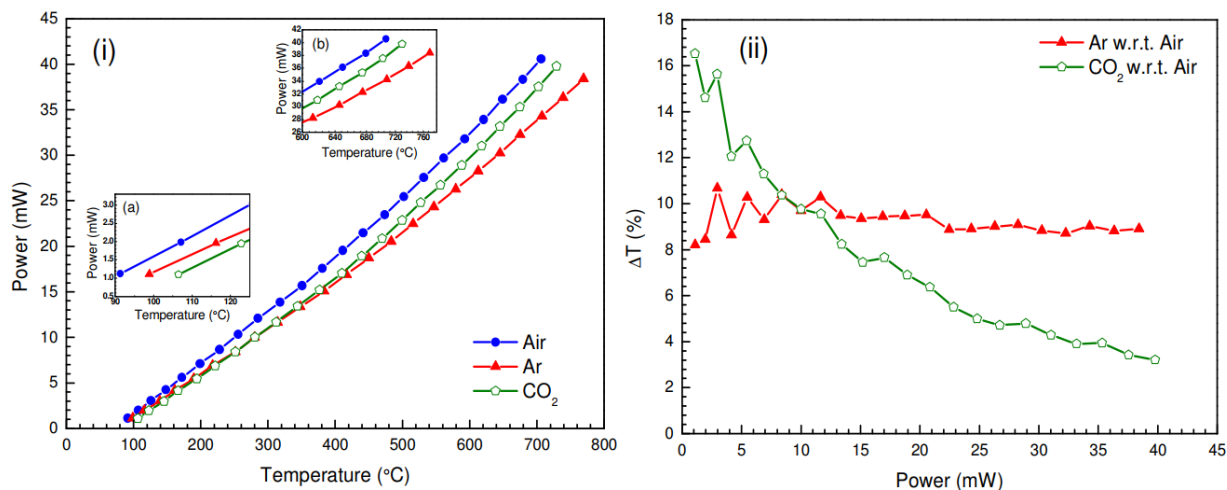


Рисунок 5 – Експериментальні результати вимірювань у повітрі, аргону та вуглекислому газі. (i) Крива залежності потужності від температури, де вставка (a) показує збільшену область нижчих температур, що відповідає чистому ефекту теплопровідності для всіх газів, а вставка (b) демонструє підсилений ефект тепловідведення на вищих температурах через додаткове поглинання в ІЧ-спектрі CO₂. (ii) Крива відсоткової зміни температури відносно повітря, що показує точку перетину для CO₂ [8, с. 3]

Сенсори виготовлені із застосуванням технологій поверхневого та об'ємного мікрOMEХАнічного оброблення. Основним матеріалом для нагрівального елемента є полікристалічний кремній, а самі сенсори інтегровані на тонких Si₃N₄ мембранах товщиною 0.6 мкм. Для мінімізації теплових втрат використані напівпровідникові термопари, що розташовані у визначених точках мембрани та вимірюють температурний градієнт між нагрівальним елементом і підкладкою [9, с. 187].

Запропонована платформа складається з двох однакових сенсорних елементів, виготовлених на одній підкладці (рис. 6). Кожен із них містить резистивний нагрівальний елемент і термопари, які вимірюють різницю температур між мембраною та підкладкою з обох боків нагрівача. Нагрівальний елемент і сенсор температури інтегровані в тонку мембрану, що формує герметичну газонаповнену камеру. Обмін газу між цією камерою та простором під мембраною можливий через мікроотвори або прорізи в мембрані (рис. 6).

Одна з камер є відносно неглибокою (2 мм), тоді як друга значно глибша — на всю товщину пластини (525 мкм) (рис. 6,б). Типові розміри сенсорної мембрани становлять 250 × 330 мкм² [10, с. 1203].

Принцип роботи сенсора ґрунтується на зміні ефективної теплопровідності між мембраною (чутливою зоною) та підкладкою. У сенсорі з неглибокою камерою основний внесок у теплопровідність дає тонкий шар газу під мембраною, що забезпечує високу чутливість сенсора до зміни теплопровідності газу, тоді як інший сенсор виконує функцію компенсуючого пристрою [9, с. 187].

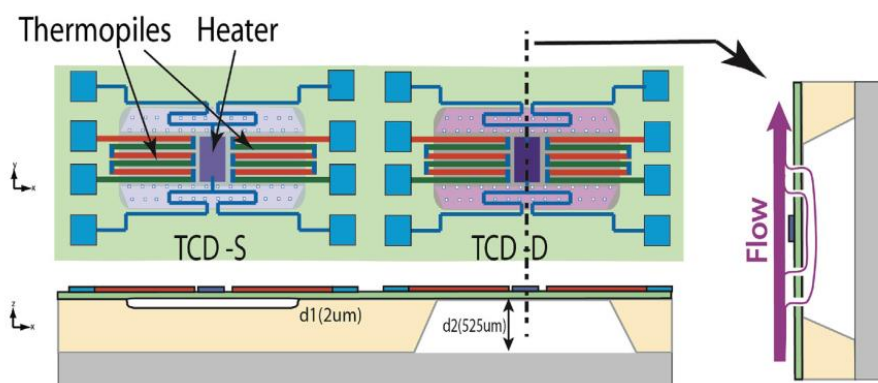


Рисунок 6 – Будова платформи з двома сенсорами теплопровідності. (a) Вид зверху на платформу. (б) Поперечний переріз пристрою [9, с. 188]

Сенсори здатні детектувати широкий спектр газів, включаючи водень, гелій та вуглекислий газ. Для досягнення високої селективності застосовується метод компенсації потоку шляхом диференційного вимірювання, що значно знижує похибку, пов'язану з варіаціями швидкості газового потоку. Випробування показали, що використання розглянутої MEMS-конфігурації дозволяє зменшити вплив потоку на результати вимірювань у 4-20 разів залежно від типу газу та умов експлуатації [9, с. 197]. Таким чином, розглянута платформа є перспективним рішенням для застосувань у газовому аналізі, де важливі як точність, так і швидкість вимірювань, а також визначення величини потоку газу, що протікає через середовище сенсора.

Інший варіант компонування декількох однотипних газових сенсорів з можливістю розміщення на одній платформі, представлено у [11, с. 4р], де розглянуто технологічні вдосконалення мультисенсорного пристрою на основі електрохімічних металооксидних сенсорів, що працюють із мікронагрівачем у вигляді пластини та використовується метод струменевого друку для нанесення хімічно-чутливих матеріалів.

Конструкція кожного сенсора базується на кремнієвій підкладці з термоізоляційною мембраною $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$, на яку нанесені платинові електроди: один виконує функцію нагрівача, інший використовується як сенсорний елемент. Для формування чутливого шару було застосовано метод струменевого друку, що дозволило рівномірно осадити наночастинки CuO , ZnO та SnO_2 відповідно на кожен окремий сенсор, які демонструють різну реакцію на гази [11, с. 4р]. Будову окремого сенсора зображено на рисунку 7.

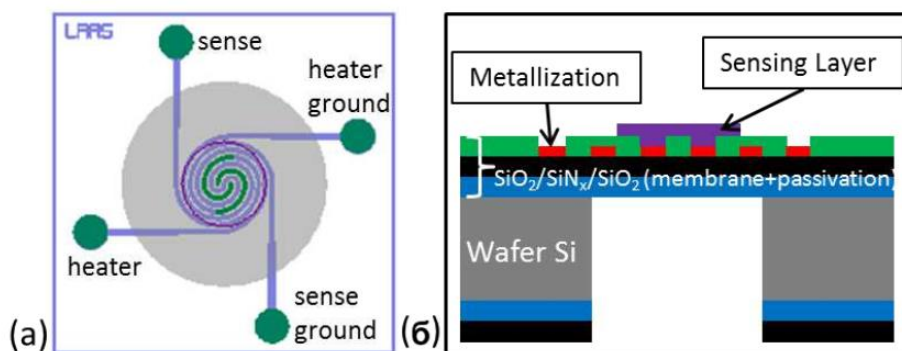


Рисунок 7 – Будова газового сенсора з мікронагрівачем у вигляді пластини: (а) вигляд чипа зверху, (б) поперечний переріз [11, с. 4р]

Сенсор здатен визначати чотири типи газів (CO , NO_2 , NH_3 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) у низьких концентраціях (100 ppm, 0.2 ppm, 5 ppm і 2 ppm відповідно). Для підвищення селективності використано температурну модуляцію: робоча температура змінюється від 200°C до 500°C з відповідними змінами електричного струму через чутливий шар [11, с. 4р]. Це дозволяє отримати динамічні відгуки сенсорів, що аналізуються методом головних компонент (РСА), що суттєво покращує розрізнявальну здатність сенсора. При одночасному використанні трьох сенсорів з різними представленими хімічно-чутливими матеріалами, селективність платформи покращується. Результати аналізу головних компонент із перехресним порівнянням з трьох сенсорів зображено на рисунку 8.

Аналіз поведінки кожного з трьох сенсорів у присутності газів показав їхню значно різну залежність від температури та напруги. Хоча отримані результати дозволили класифікувати всі протестовані середовища за допомогою методу головних компонент, для подальшого вдосконалення системи розпізнавання доцільно розглянути використання керованих методів прийняття рішень, таких як дерево рішень або дискримінантний аналіз.

Платформи, де газові сенсори поєднуються із приладами іншого призначення. В дану категорію включені платформи, що поєднують газові сенсори з іншими типами приладів, такими як датчики температури та вологості або преконцентратори чи сепараційні колонки для підвищення точності та розширення функціональності аналізу газових сумішей. Така інтеграція дозволяє отримувати багатовимірні дані, покращуючи селективність та чутливість сенсорних систем. Варіант такої платформи розглянуто у [12, с. 410].

У статті представлено розробку мультисенсорної MEMS платформи для екологічного моніторингу, виготовленої за технологією CMOS-сумісного мікромеханічного оброблення. Основна мета дослідження – інтеграція декількох сенсорів на одному кремнієвому чипі з

можливістю бездротової передачі даних, що забезпечує високу чутливість, надійність і низьке енергоспоживання.

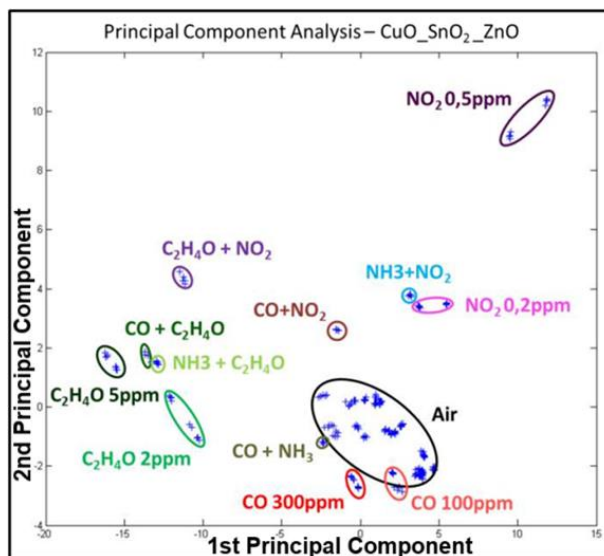


Рисунок 8 – Результати аналізу головних компонент із перехресним порівнянням даних із сенсорів з різним хімічно-чутливим матеріалом [11, с. 4р]

Конструкція мультисенсорного пристрою включає сенсори температури, відносної вологості, корозії, теплопровідності газу та швидкості потоку газу, розміщені на єдиній підкладці. Для виготовлення чипа застосовано методи поверхневого та об'ємного мікромеханічного оброблення, що дозволило інтегрувати всі сенсори в компактній формі. Основою структури є шар нітриду кремнію (600 нм), на якому сформовано нагрівальні резистори та чутливі елементи. Термопари з полікристалічного кремнію використовуються для вимірювання температури, а ємнісні сенсори визначають рівень вологості. Чутливий шар полііміду нанесено методом спін-коутінгу, що забезпечує стабільну роботу сенсорів вологості [12, с. 413].

Методики виготовлення передбачають багат шарове травлення для формування підвищених структур, зокрема теплового сенсора, який працює на основі підвищених алюмінієвих балок. Експериментально підтверджено, що сенсор здатен виявляти зміну теплопровідності газів, зокрема аргону, гелію та повітря, що робить його перспективним для аналізу газових сумішей.

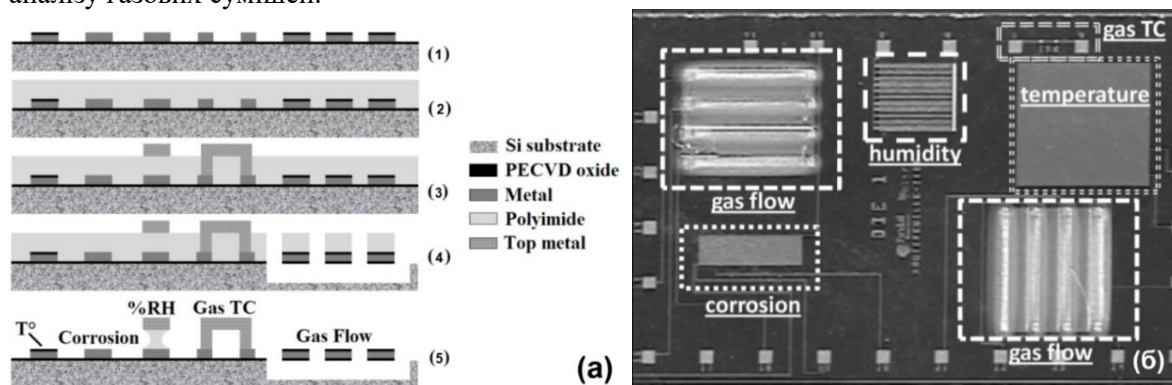


Рисунок 9 – Схема процесу виготовлення (а) та мікрофотографія мультисенсорної платформи (б) [12, с. 414]

Для компенсації перехресних впливів та покращення точності вимірювань застосовано алгоритми корекції перехресної чутливості, яка може спотворювати результати вимірювань. У дослідженні [13, с. 622] запропоновано методи компенсації небажаних впливів температури, вологості, тиску та газового потоку, що покращують точність сенсорних вимірювань, у [12, с. 414] ці алгоритми було покращено.

Температурна корекція. Через температурну залежність електричного опору всі резистивні сенсори піддаються впливу змін температури. Це компенсується використанням

температурного сенсора як еталону, що дозволяє коригувати температурні флуктуації в реальному часі або під час аналізу даних.

Вплив вологості. Було зафіксовано зміну опору навіть у пасивованих металевих треках через адсорбцію води. Встановлено, що ефект залежить від товщини оксиду SiO_2 під металом: тонкіші шари спричиняють більші зміни опору. Оптимізація товщини оксидного шару дозволила зменшити вплив води до менш ніж 2%.

Вплив тиску. Згідно з результатами дослідження [12, с. 425], тиск до 1 бар не має суттєвого впливу на роботу більшості сенсорів, за винятком теплового. Незначна зміна ємності сенсора вологості ($\approx 3.4\%$) пояснюється виведенням насиченого вологою повітря і є оборотною, тому впливом тиску можна знехтувати.

Вплив газового потоку. Було досліджено ефект повітряного потоку на сенсори в контрольованих умовах. Для більшості сенсорів його вплив виявився незначним, проте теплопровідний сенсор показав зниження опору через втрати тепла конвекцією. Це підтвердило необхідність корекції в реальних умовах експлуатації.

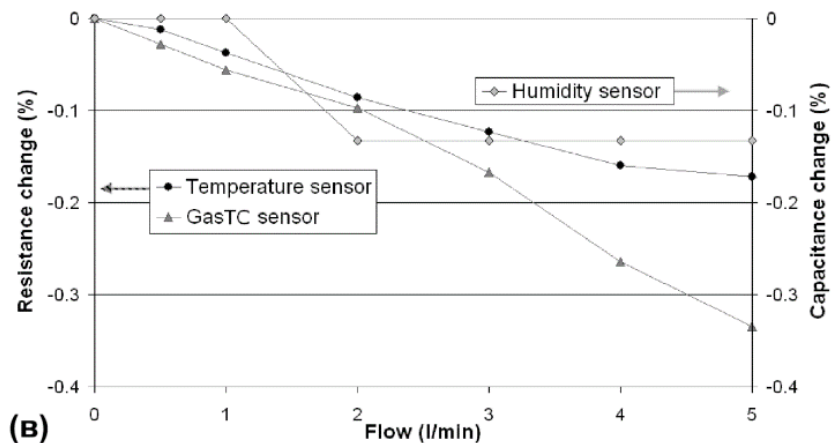
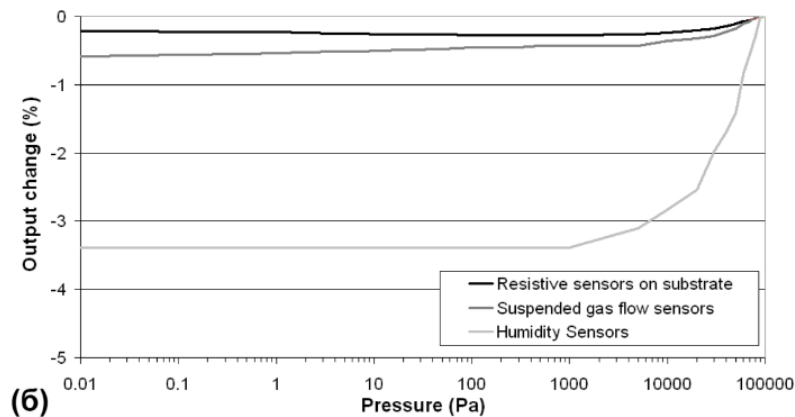
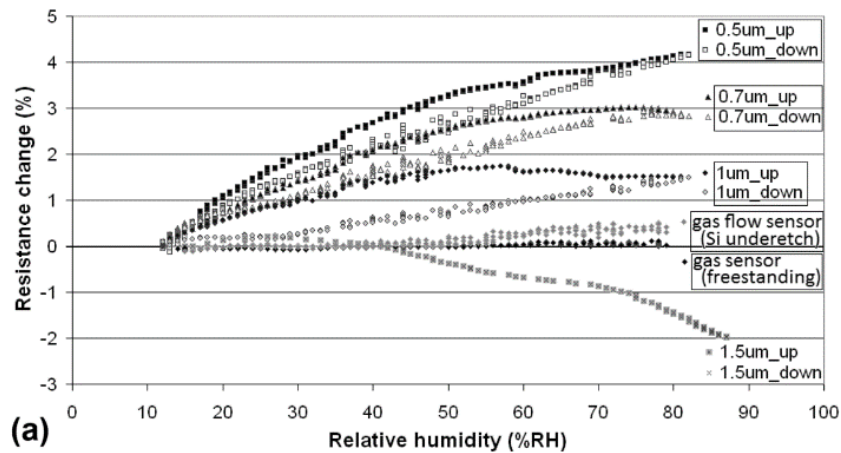


Рисунок 10 – Вплив вологості (а), тиску (б) та потоку газу (в) на характеристики сенсорів [12, с. 424]

Розглянута система інтегрована на бездротову модульну платформу Tyndall25, що дозволяє зчитувати дані в реальному часі та забезпечує запис результатів у внутрішню пам'ять. Вона підтримує протоколи передачі даних через ZigBee та Bluetooth, що дає змогу створювати масштабовані мережі для моніторингу навколишнього середовища [12, с. 426].

Оцінка енергоспоживання показала, що пристрій споживає 49 мВт при одночасній роботі всіх сенсорів, що робить його придатним для автономних екологічних моніторингових систем. Випробування продемонстрували стабільність роботи сенсорів при температурах від -20°C до 85°C , що підтверджує можливість їх застосування у різних кліматичних умовах.

Інший варіант платформи, що поєднують газові сенсори з іншими типами приладів, представлено у [14, с. 145], де розглянуто систему Zebra GC, що базується на інтеграції мікрофабрикованих компонентів, зокрема преконцентратора (μPC) [15, с. 131], мікросепараційної колонки (μSC) [16, с. 309] та вбудованого детектора теплопровідності (μTCD). Запропонований підхід забезпечує підвищену чутливість, зменшене енергоспоживання та високу портативність у порівнянні з традиційними методами газової хроматографії.

Конструкція сенсора передбачає поєднання преконцентратора, що акумулює аналіти шляхом адсорбції на матеріалі Tenax TA, із мікросепараційною колонкою, покритою полідиметилсилоксаном (PDMS), який слугує стаціонарною фазою для ефективного розділення компонентів. Нагрівання преконцентратора до 200°C забезпечує швидке десорбування та утворення вузького імпульсу введення, що покращує селективність аналізу [14, с. 147]. Оптимізована конструкція дозволяє здійснювати детектування на основі змін теплопровідності газу, які фіксуються інтегрованим тепловим сенсором, зображена на Рисунку 11.

Прекоцентратор - це кремнієво-скляний чип розміром $13\text{ мм} \times 13\text{ мм}$, який містить масив мікростовпчиків з великим співвідношенням сторін усередині квадратної порожнини розміром 1 см . Мікростовпчики формуються методом об'ємної мікрообробки 4-дюймової кремнієвої пластини з використанням глибокого реактивного іонного травлення для досягнення глибини 240 мкм . На задню сторону пластини наноситься 1-мкм шар оксиду, осадженого методом плазмохімічного осадження з парової фази (PECVD), який виконує роль ізолятора. Потім пластина розрізається на окремі чипи. Мікростовпчики покриваються тонким ($\sim 200\text{ нм}$) шаром адсорбенту Tenax TA, після чого вони закриваються боросилікатною скляною пластиною шляхом анодного з'єднання. На задній стороні чипа осаджується $40\text{ нм}/230\text{ нм}$ шар Cr/Ni , який слугує нагрівачем і датчиком температури, використовуючи електронно-променевий випарник. Номінальний опір нагрівача і датчика температури становить приблизно $15\ \Omega$ і $250\ \Omega$ відповідно. Нарешті, до впускного та випускного отворів приклеюються зрощені капілярні трубки. Для виготовлення теплового сенсора виконується двоетапне анізотропне травлення кремнію. Спочатку формується неглибока порожнина $2\text{--}3\text{ мкм}$, що запобігає контакту металевих з'єднань на боросилікатному склі зі стінками сепараційної колонки в кремнії після з'єднання. Далі у кремнієвій пластині формується довгий канал шириною 70 мкм і глибиною 240 мкм . Резистори виготовляються на скляній підкладці методом відриву з осадженого $40\text{ нм}/100\text{ нм}/25\text{ нм}$ шару $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Au}$ за допомогою електронно-променевого випарника. Скляна і кремнієва підкладки вирівнюються і з'єднуються разом. Нагрівачі та датчики температури виготовляються на задній стороні чипа за допомогою нержавіючої сталеві трафаретної маски. Після цього капілярні трубки приклеюються до впускних/випускних отворів. Нарешті, стінки колонкового каналу покриваються тонким ($\sim 250\text{ нм}$) шаром OV-1 [14, с. 147]. Також, важливим конструктивним рішенням стало використання інноваційної системи керування потоком, що мінімізує перешкоди від впорскування газу та забезпечує стабільний потік носія під час аналізу.

Після проведення тестування окремих чіпів, прекоцентратор було підключено до сепараційної колонки та теплового сенсору для перевірки гібридної інтеграції. Компактний дизайн дозволив зменшити довжину ліній передачі, що призвело до зниження утворення холодних зон, які можуть знижувати ефективність. З іншого боку, оптимальні витрати для прекоцентратора та сепараційної колонки виявилися різними, тому було необхідно знайти компроміс у виборі витратного потоку для інтегрованої системи. Для тестування, в середовище сенсора завантажили суміш із шести сполук. Як показано на рисунку 12, всі шість сполук були розділені та ідентифіковані менш ніж за 2 хвилини [14, с. 151].

Розглянута система характеризується низьким енергоспоживанням ($\sim 2,75\text{ Вт}$), що робить її придатною для польових досліджень. Використання прекоцентратора та мікросепараційної колонки для теплового сенсора має ряд переваг та недоліків. Серед основних переваг можна

виокремити збільшення чутливості, оскільки преконцентратор дозволяє зібрати більше молекул газу перед їх подачею в сенсор, що підвищує чутливість навіть до низьких концентрацій газів.

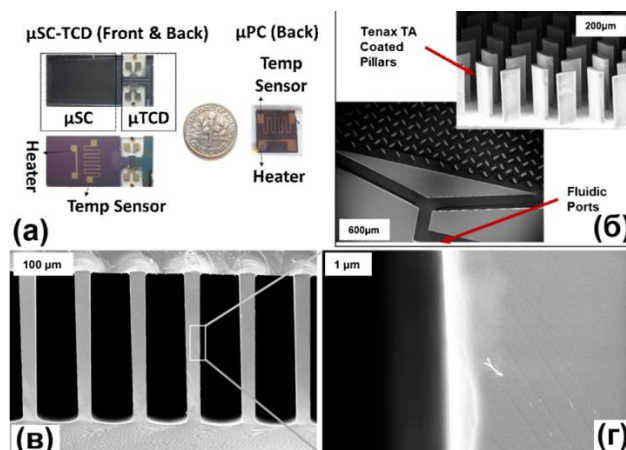


Рисунок 11 – Мікропристрої (а), зображення мікростійок в преконцентраторі зроблене скануючим електронним мікроскопом (б), покриття з полідиметилсилоксану на внутрішній стінці каналу колонки (в, г) [14, с. 147]

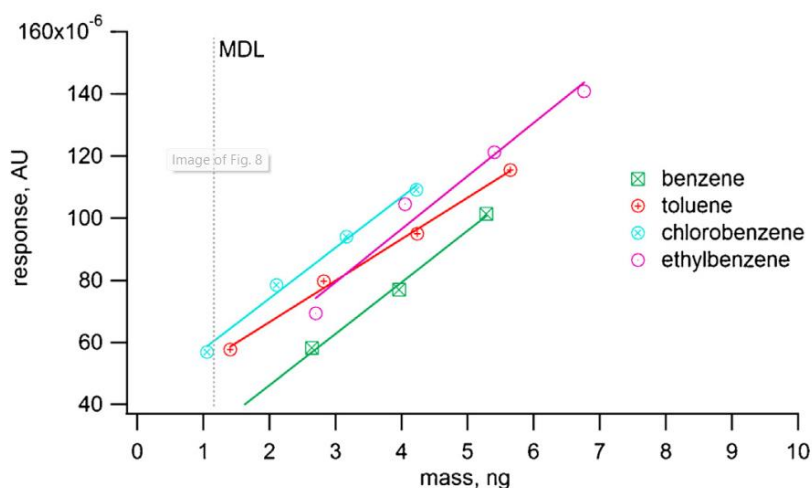


Рисунок 12 – Мінімальна межа виявлення для тестових сполук за допомогою теплового сенсора [14, с. 151]

Мікросепараційна колонка дозволяє розділяти компоненти газової суміші, що покращує селективність сенсора і дозволяє точніше визначати склад суміші. Крім того, використання преконцентратора дозволяє зменшити вплив фонових газів на результати вимірювань, що робить аналіз більш точним. Така інтеграція також може скоротити час аналізу, оскільки колонка готує гази до подачі в сенсор, що зменшує час, необхідний для досягнення точних результатів.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що використання мультисенсорних платформ на основі МЕМС є перспективним напрямом у газовому аналізі, який дозволяє покращити селективність, чутливість та стабільність вимірювань. У результаті аналізу різних конфігурацій мультисенсорних систем було визначено, що ефективність таких платформ значною мірою залежить від їхньої конструкції, типів інтегрованих сенсорів та методів обробки отриманих сигналів.

Розгляд платформ із сенсорами різних типів показав, що їхнє комбінування дає можливість отримувати більш точну інформацію про склад газової суміші. Наприклад, поєднання теплопровідних сенсорів із оптичними дозволяє зменшити вплив змін вологості та температури на результати вимірювань [4, с. 1160]. Використання однотипних сенсорів, зокрема електрохімічних, але з різними активними матеріалами або температурними режимами, дозволяє покращити селективність до певних газів [11, с. 4p].

Інтеграція додаткових сенсорів, таких як температурні, вологості або потоку газу, значно підвищує точність отриманих даних та забезпечує можливість корекції впливу зовнішніх

факторів [12, с. 423]. Такий підхід робить мультисенсорні платформи більш універсальними та придатними для застосування у різних сферах, включаючи екологічний моніторинг, промислову безпеку та контроль якості повітря.

Крім того, дослідження підтвердили важливість алгоритмів обробки даних у мультисенсорних системах. Використання методів машинного навчання дозволяє компенсувати перехресну чутливість та автоматично розпізнавати газові суміші з високою точністю. Це відкриває можливості для створення інтелектуальних систем газового аналізу, здатних адаптуватися до змін у навколишньому середовищі.

Значна увага приділяється також мініатюризації мультисенсорних платформ та зниженню їхнього енергоспоживання. Завдяки прогресу в МЕМС-технологіях стало можливим створення компактних і малопотужних сенсорних чипів, які можуть бути інтегровані у портативні пристрої або бездротові мережі моніторингу. Це особливо важливо для автономних екологічних систем та мобільних пристроїв контролю газового середовища.

Отже, мультисенсорні платформи на основі МЕМС є ефективним рішенням для газового аналізу, що поєднує високу точність, швидкість відповіді та широкий спектр можливостей для ідентифікації різних газів та їхніх сумішей. Подальший розвиток цієї технології має включати вдосконалення матеріалів чутливих елементів, оптимізацію алгоритмів обробки сигналів та розробку енергоефективних інтегрованих сенсорних рішень для широкого спектра застосувань.

Інформаційні джерела

1. Wang C., et al. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*. 2010. P. 2088-2106.
2. Гребьонкін Є., Заворотний В. Використання наноматеріалів в газових мемс сенсорах. Вчені записки таврійського національного університету імені в.і. вернадського Серія: Технічні науки. 2024. Том 34 (74). № 6. Частина 1. P. 59-68.
3. Gardner E. L., Gardner J. W., Udreă F. Micromachined thermal gas sensors—A review. *Sensors*. 2023. 681p.
4. De Graaf G., et al. Sensor platform for gas composition measurement. *Procedia Engineering*. 25. 2011. P. 1157-1160.
5. Kommandur S., et al. A microbridge heater for low power gas sensing based on the 3-Omega technique. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. P. 231-238.
6. Li Y., et al. Monolithic CMOS multi-transducer gas sensor microsystem for organic and inorganic analytes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. P. 431-440.
7. Lange D., et al. Complementary metal oxide semiconductor cantilever arrays on a single chip: mass-sensitive detection of volatile organic compounds. *Analytical Chemistry*. 2002. P. 3084-3095.
8. Sarfraz S., et al. A dual mode SOI CMOS MEMS based thermal conductivity and IR absorption gas sensor. *SENSORS, 2013 IEEE*. 2013. P. 1-4.
9. De Graaf G., et al. Micro thermal conductivity detector with flow compensation using a dual MEMS device. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. P. 186-198.
10. De Graaf G., et al. Flow compensation in a MEMS dual-thermal conductivity detector for hydrogen sensing in natural gas. 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2015. P. 1203-1206.
11. Dufour N., et al. Technological improvements of a metal oxide gas multi-sensor based on a micro-hotplate structure and inkjet deposition for an automotive air quality sensor application. 25th Micromechanics and Microsystems Europe workshop (MME 2014). 2014. P. 4.
12. Hautefeuille M., et al. Development of a microelectromechanical system (MEMS)-based multisensor platform for environmental monitoring. *Micromachines*. 2011. P. 410-430.
13. Hautefeuille M., et al. Miniaturised multi-MEMS sensor development. *Microelectronics Reliability*. 2009. P. 621-626.
14. Garg A., et al. A mini gas chromatography system for trace-level determination of hazardous air pollutants. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. P. 145-154.
15. Tian W., et al. High sensitivity three-stage microfabricated preconcentrator-focuser for micro gas chromatography. *TRANSDUCERS'03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers (Cat. No. 03TH8664)*. 2003. P. 131-134.
16. Ali S., et al. MEMS-based semi-packed gas chromatography columns. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009. P. 309-315.

Hrebonkin Ye., Zavorotnyi V.

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

MULTISENSOR MEMS-BASED PLATFORMS FOR GAS ANALYSIS

The paper presents a comparative analysis of various multisensor MEMS-based platforms for gas analysis. For effective detection of gas mixtures and individual gases, it has been found that measurement results such as sensor sensitivity, response time, and selectivity are confirmed by theoretical and experimental studies. The obtained data suggest that the use of multisensor MEMS-based platforms is promising for accurate and rapid gas analysis, as they combine high sensitivity with the capability of simultaneous monitoring of multiple parameters. The analysis results indicate that for certain types of gases, it is advisable to use a platform with integrated sensors capable of detecting multiple parameters of gas mixtures, providing more accurate results compared to the use of individual sensors.

Keywords: MEMS, multisensor platforms, gas sensors, thermal sensors, photoacoustic sensors, electrochemical sensors, separation columns, preconcentrators, autonomous sensors.

УДК 621.833

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-06

¹Громнюк С. І., ²Вергун В. А.¹ТЗОВ СПР Енерго, Львів, Україна²Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ СПОСОБОМ, ЯКИЙ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ З РІЗНИМИ НАПРЯМКАМИ ПОДАЧІ

Наведено результати дослідження процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим методом, що виконується за двома схемами – з осьовою та радіальною подачею. Дослідження, виконані на основі аналізу параметрів зрізів, осадження стружки, сил різання і основного часу операції показало, що вони значно відрізняються за всіма аналізованими параметрами. У випадку різання з радіальною подачею інтенсивність процесу істотно вища, а основний час на операцію зменшується. Разом з тим, збільшення сили різання загрожує підвищенням пружним деформаціям тонкої дискової фрези як різального інструменту, який у цьому методі здійснює рух різання та формоутворення зубчастих профілів в умовах непевного обкочування, як це є при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою. Це може призвести до зниження точності оброблення і зумовити більш інтенсивне зношування інструменту. Крім того, різання з радіальним врізанням обмежується колесами невеликої ширини, але при цьому відсутній додатковий шлях врізання і перебігу. Оптимальною схемою зубонарізання є поєднання двох способів – початок різання з радіальною подачею для усунення шляху врізання з наступним переходом до різання з осьовою подачею на повну ширину вінця колеса.

Ключові слова: зубофрезерування, радіально-коловий метод, радіальна подача, осьова подача, параметри процесу, ефективність

Постановка проблеми. Зубчасті колеса є складовими більшості машин та механізмів, які виготовляють в різних галузях машинобудування. Широке розповсюдження цих деталей та значні обсяги їх промислового виготовлення зумовлюють інтенсивні пошуки ресурсів покращення їх експлуатаційних параметрів і характеристик, а також удосконалення технологій та методів зубооброблення. Дослідження за першим напрямком ведуться шляхом удосконалення існуючих і створення нових видів і систем зубчастих зачеплень. Для підвищення ефективності виробництва зубчастих коліс створюють нові методи і технології їх виготовлення, викінчувального оброблення та зміцнення робочих поверхонь. Серед нових та удосконалених традиційних технологій можна відмітити процес зуботочіння, що відомий в наш час як «Power skiving»; процеси високошвидкісного нарізання гартованих зубчастих коліс лезовим інструментом, оснащеним надтвердими різальними матеріалами, які об'єднані спільною назвою «Hard skidding»; процес InvoMilling, який поєднує індивідуальний поділ з неперервним генеруванням при обробці одної впадини, а також радіально-коловий метод зубонарізання, який розроблений у Львівській політехніці та розвивається, починаючи з 2003 року.

Аналіз останніх досліджень. Кожен з відомих методів має власні особливості та переважні області використання. На сьогодні найбільш прогресивним методом є зуботочіння. Створений початково для виготовлення планетарних коліс внутрішнього зачеплення, він набув широкого розповсюдження і використовується для виготовлення зовнішніх та внутрішніх коліс широкого діапазону модулів і розмірів. Основна перевага цього методу - висока продуктивність завдяки значній швидкості різання - стала можливою завдяки створенню високошвидкісних потужних приводів, верстатів підвищеної жорсткості та вібростійкості з високим рівнем синхронізації робочих рухів, керованих системою ЧПК. Разом з тим, ця технологія базується на спеціальному дороговартісному обладнанні та інструменті і є ефективною лише у великосерійному виробництві [1-4].

Цього недоліку не має радіально-коловий метод (РКМ), який здійснюється тонкою дисковою фрезою при неперервному обкочуванні, так, як це є при зубонарізанні черв'ячною фрезою та скайвінг-інструментом. Однією з істотних переваг РКМ є простота кінематики та можливість його використання на найпростішому за обладнанні, наприклад, на серійному зубофрезерному верстаті, а також на токарно-гвинторізному, або на токарно-затилувальному верстаті, дооснащеними засобами роботроніки, зокрема, серводвигунами для приводу усіх робочих рухів, керованими системою ЧПК, або комп'ютером. Це дає змогу значно покращити

ефективність зубооброблення за рахунок повної автоматизації циклу, підвищити продуктивність зубофрезерування і використовувати його в усіх типах виробництва – від одиничного до масового. Крім того, для коліс усіх видів і типів, які можна виготовити цим методом, потрібна тільки одна дискова фреза, що на порядки зменшує витрати на різальний інструмент [5].

Протягом тривалого часу виконано значний обсяг дослідницьких робіт цього методу, створено спеціалізоване обладнання та оснащення для його впровадження і практичного застосування. Зокрема, у роботі [6] наведено результати порівняння процесів нарізання зубчастих коліс традиційним методом черв'ячного зубофрезерування і радіально-коловим методом. Дослідження показали, що внаслідок особливостей процесу РКМ, його кінематики і простоти інструменту – тонкої дискової фрези цей метод переважає зубофрезерування черв'ячною фрезою за всіма параметрами: об'ємною продуктивністю, силами різання і споживаною енергією, досягнутою шорсткістю зубців, машинним часом та витратами. Попри те, що РКМ поступається зуботочінню за продуктивністю, проте він має значно вищу ефективність за універсальністю, простотою обладнання і оснащення та за собівартістю виготовлення зубчастих коліс.

У всіх порівнюваних методах використовувалися традиційні способи нарізання коліс з осьовою подачею інструменту. Проте, ці процеси, зокрема, РКМ можна здійснювати і з радіальною подачею, а також з комбінуванням подач. Цю різновидність процесу на сьогодні ще не вивчено, тому в даній роботі ставиться задача дослідити особливості зубонарізання радіально-коловим методом з радіальним врізанням з метою отримання висновків про можливість його практичного застосування та підвищення ефективності.

Викладення основного матеріалу. Відмінності двох способів різання зубчастого колеса з різним напрямком подачі представлені на рисунку 1. В обох випадках присутні такі рухи: головний рух різання – обертання дискової фрези навколо кінематичної осі, що збігається з віссю інструментального шпинделя з частотою $n_{фр}$ та відповідною швидкістю різання V ; рух кругової подачі з частотою n_k – обертання заготовки зі столом верстата; конструктивний рух різання і формоутворення – обертання геометричної осі фрези навколо кінематичної осі, зміщених одна відносно іншої на величину ексцентриситету e , а також допоміжний рух різання – подача: осьова, s_o - паралельно осі колеса, або радіальна, s_r – перпендикулярно до осі колеса, з неперервним врізанням, в мм/об.

Для фрезерування зубчастого колеса з радіальною подачею необхідна дискова фреза збільшеного діаметра при обмеженій ширині колеса. На рисунку 1, б показано інструмент – фрезу з ексцентричною оправкою, а на рисунку 1, в – процес нарізання зубчастого колеса. Оброблення ведеться за певної кількості обертів заготовки для прорізання зубця на повну висоту профілю. Якщо ширина колеса більша від допустимої, то на верхньому і нижньому торцях профіль зубців буде недоформований, тому у цьому випадку необхідний додатковий прохід з осьовою подачею від верхнього до нижнього торця колеса.

Нарізання колеса з осьовою подачею переважно здійснюється за кілька проходів із поступовим збільшенням глибини різання до виходу фрези на повну глибину профілю. В таких умовах для вибору раціонального способу зубонарізання необхідно порівняти витрати часу в обох способах.

Параметри зрізів. Найповнішу інформацію про процес нарізання зубчастих коліс містять параметри зрізів інструменту, які дають уявлення про навантаження зубців і лез і використовуються для розрахунку сил різання, пружних деформацій, витрат енергії, точності оброблення, температури різання, стійкості різального інструменту тощо. Моделювання трьохмірної недеформованої стружки та її параметрів проведено на основі методу, описаному в роботі [7]. Його суть полягає в тому, що неперервний процес різання представлено в дискретних послідовних положеннях різального клину інструменту і його передньої поверхні відносно поверхні, яка підлягає обробці.

В кожному положенні розраховують або визначають графічно положення контуру зубця, який виконує даний різ, та положення цього зубця в попередніх його положеннях по подачі і зміні інструменту по ексцентриситету, при цьому лінійна і кутова зміна цих положень відповідає кінематиці відповідного методу зубообробки. Накладання цих слідів дає миттєвий переріз зрізуваного шару в даному відносному положенні інструменту і зубчастої поверхні та визначає кількісні параметри поперечного перерізу зрізу: площу, товщину і ширину, а також довжину контакту зубця з заготовкою.

Результати побудови миттєвих перерізів зрізів на основі такого підходу в РКМ з радіальною подачею наведені на рисунку 2.

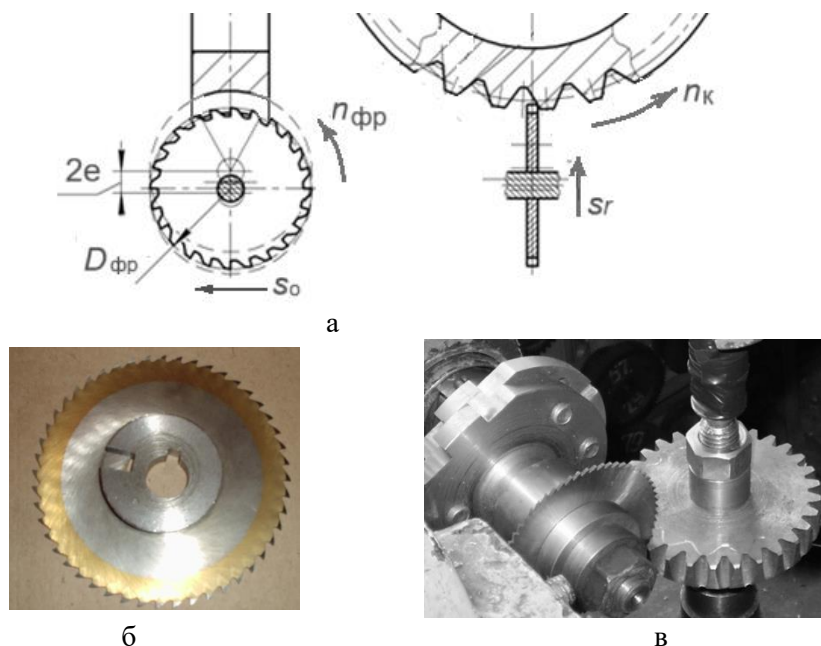


Рисунок 1 – Кінематична схема нарізання зубчастого колеса з різним напрямком подачі (а); дискова фреза з ексцентричною втулкою (б) та процес нарізання зубчастого колеса (в)

На рисунку 2, а показано типовий переріз зрізу в певному довільному взаємному положенні інструменту і заготовки у середині входної частини дискової фрези де ексцентриситет збільшується, а на рисунку 2, б – в середній частині вихідної ділянки фрези, де ексцентриситет зменшується.

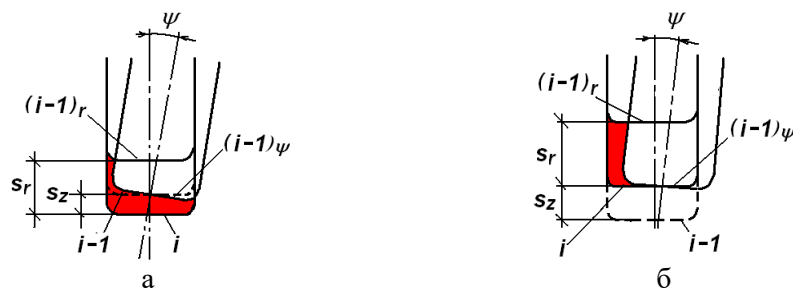


Рисунок 2 – Графічне пояснення алгоритму побудови миттєвих перерізів зрізів

Відмінності двох способів можна простежити, порівнюючи параметри зрізів, які утворюються при різних подачах. Початкові дані, для яких велися дослідження: ексцентриситет синусоїдального колеса 3,46 мм, що відповідає модулю 5 мм; осьова подача 0,75 мм/оберт заготовки; різання на повну висоту профілю колеса; кількість зубців: зубчасте колесо $Z_k = 30$, фреза $Z_{фр} = 45$; зовнішній діаметр фрези 185 мм, матеріал швидкорізальна сталь Р6М5; ширина колеса 16 мм, матеріал - сталь 40Х, межа міцності $\sigma_b = 660$ МПа, межа міцності на зсув (за третьою теорією міцності) $[\tau] = 330$ МПа; швидкість різання 32 м/хв.

На графіках, наведених на рисунку 3 показана середня товщина зрізів і сумарна на лезах дискової фрези площа поперечного перерізу зрізів (S , мм²), тобто перерізів недеформованої стружки, у функції від кута повороту фрези в межах одного повного оберту. З отриманих результатів випливає, що товщина стружки при різанні з врізанням значно менша, ніж при осьовій подачі, проте площа поперечного перерізу зрізів у три рази більша. В обох випадках основна робота різання виконується частиною фрези, яка працює на ділянці збільшенні ексцентриситету, тобто в ділянці дільного діаметру колеса.

Сила різання. Щоб визначити, як впливають параметри зрізів на силу різання, треба встановити коефіцієнт осадження стружки ξ в залежності від товщини зрізу. Використовуючи систему Деформ 2D на рисунку 4, а показана ця залежність для різання за обох напрямків подачі, а на рис.4, б представлені графіки сили різання. Величина сили різання визначена за залежністю $P = S \cdot [\tau] \cdot \xi$.

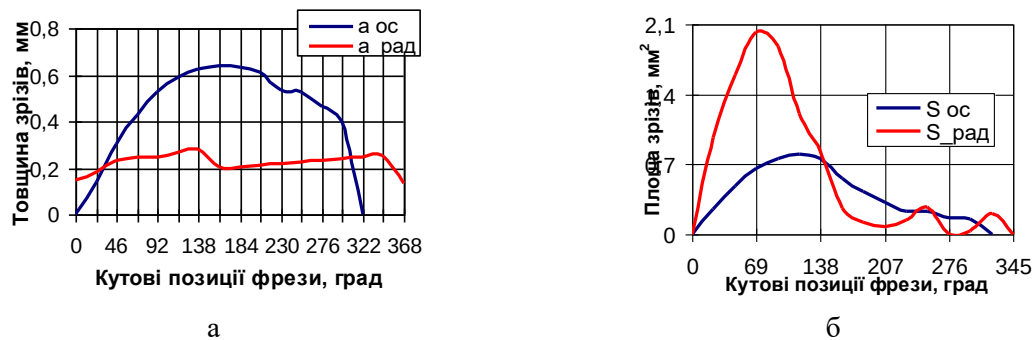


Рисунок 3 – Товщина (а) і площа поперечного перерізу зрізів (б) при осьовій і радіальній подачах

Мала товщина зрізів при різанні з радіальною подачею є причиною значно більшого коефіцієнта осадження стружки, що впливає на величину сили різання. Внаслідок сукупної дії обох параметрів зрізів - інтенсивності зсуву і більшої площі перерізу стружки в операції з радіальною подачею сила різання буде у три рази більша.

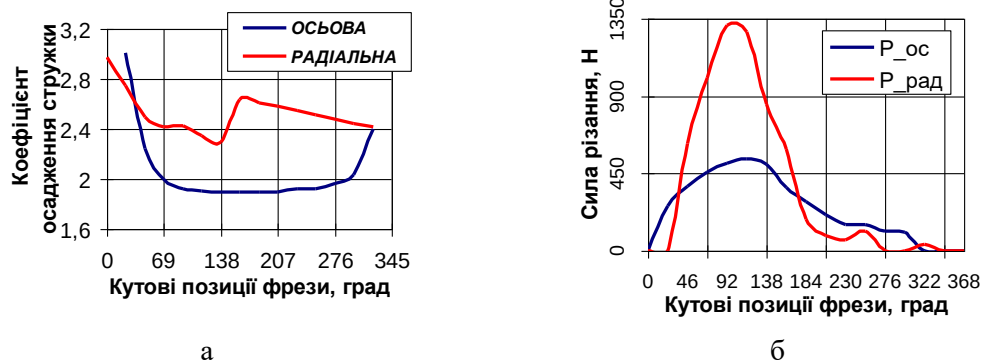


Рисунок 4 – Коефіцієнт осадження стружки (а) і сила різання (б) у двох способах зубофрезерування

Продуктивність оброблення. Відмінності значень параметрів зрізів викликають питання щодо продуктивності порівнюваних способів зубонарізання, яку можна оцінити як об'єм припуску, що усувається фрезою із впадин між зубцями колеса, який припадає на один зубець фрези. Цю величину можна розрахувати як добуток площі поперечного перерізу зрізів на довжину шляху різання кожного зубця по куту повороту фрези, тобто на довжину дуги контакту відповідного зубця з заготовкою. При кутовому кроці фрези 8° на ширині колеса 16 мм в зачепленні одночасно перебуває два зубці при радіальній подачі та чотири зубці при осьовій подачі. Враховую це, для наведених вище початкових даних та результатів моделювання отримуємо залежності для об'ємної продуктивності обох способів оброблення, що показані на рис.5.

Розрахунки та графіки вказують, що середні значення припуску в обох способах приблизно рівні, але вони відрізняються розподіленням навантаження - у випадку радіальної подачі основний припуск усувається в ділянці заходу фрези, де ексцентриситет зростає, а при обробці з осьовою подачею - на вихідній частині фрези.

Основний час оброблення. Для вибору того чи іншого способу нарізання зубчастого колеса необхідно розрахувати витрати часу. Головною складовою штучного часу на операцію, який є кількісною мірою праці, є основний час оброблення. Для вказаних вище початкових даних, зокрема, швидкості різання (32 м/хв.) і діаметра фрези (185 мм) частота обертання фрези рівна 55 хв.^{-1} , осьова подача 0,75 мм/об. час обробки однієї впадини можна визначити з формули:

$$t_o = \frac{L_{pi3}}{S \cdot n_{фр}}, \text{ хв.},$$

де $L_{\text{різ}}$ – довжина шляху різання s – величина подачі, 0,75 мм/об. В різанні з радіальною подачею ця довжина відповідає висоті зубця, тобто подвійному ексцентриситету – 6,86 мм, а при різанні з осьовою подачею – довжині колеса з врахуванням врізання і перебігу, тобто, 20 мм. Отже, час оброблення одної впадини дорівнює 0,174 хв. для врізання і 0,254 хв. – для руху з осьовою подачею. Для нарізання усього колеса необхідно витратити 5,75 хв. та 11,7 хв. відповідно, для різання з радіальною та осьовою подачею.

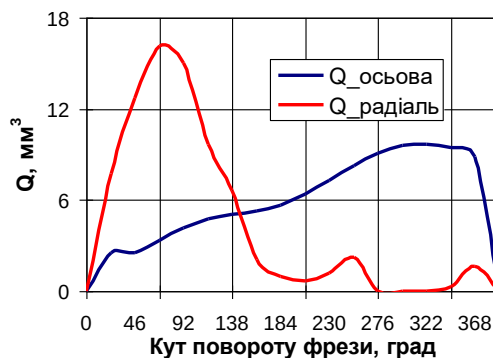


Рисунок 5 – Об'єм припуску, який усувається одним зубцем фрези під час різання з осьовою і радіальною подачею

Необхідно відмітити, що в цій роботі розглядається найпростіший варіант радіально-колового способу, коли дискова фреза встановлюється з ексцентриситетом і зберігається кінематика черв'ячного зубофрезерування, коли одному оберту фрези відповідає поворот колеса на один кутовий крок. Разом з тим, при використанні мультиплікатора на осі фрези цей кінематичний зв'язок розривається, відпадає необхідність дотримуватися вказаної закономірності, а швидкість різання можна збільшити в декілька разів. Одночасно за рахунок збільшення кількості зубців фрези можна збільшити подачу на зуб s_z та збільшити осьову подачу, яка рівна добутку s_z на кількість зубців фрези, що дає змогу багатократно зменшити витрати основного і штучного часу на операцію.

Висновки. Порівняння двох варіантів нарізання зубастих коліс радіально-коловим методом, які відрізняються напрямком подачі показало, що при радіальній подачі істотно менша товщина зрізів, в результаті чого вища інтенсивність осадження стружки. Одночасно при цій подачі збільшується площа поперечного перерізу зрізів, що призводить до інтенсивного зростання сили різання. З іншого боку у варіанті з врізанням будуть менші витрати основного часу на обробку порівняно з різанням з осьовою подачею. Побічним ефектом зростання сили різання є вищий рівень пружних деформацій тонкої дискової фрези, а також підвищення інтенсивності її зношування.

Ще одною особливістю зубонарізання з радіальною подачею є те, що цей спосіб придатний лише для коліс з обмеженої шириною вінця, а якщо ця умова не витримується, то необхідний додатковий прохід з осьовою подачею фрези для усунення похибок профілю, як виникають при цьому, а час обробки в обох випадках вирівнюється. Для подолання недоліку роботи з осьовою подачею, що полягає в необхідності витримувати шлях врізання і перебігу рекомендуємо поєднувати обидва способи – починати процес з радіального врізання і продовжувати різати з осьовою подачею, що дасть змогу скоротити витрати часу на операцію.

Інформаційні джерела

1. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. "Technological and Simulative Analysis of Power Skiving." Procedia CIRP. 2016. Volume 50. P. 773–778.
2. Tapoglou N. "Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 100 (5-8), pp. 1779–1785. 2019.
3. Guo, E., Hong, R., Huang, X., Fang, C. "A novel power skiving method using the common shaper cutter", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 83, P. 157–165, 2016.
4. Peng Wang, Jingcai Li, Lin Han. "Research on the Cutting Principle and Tool Design of Gear Skiving Based on the Theory of Conjugate Surface", Mathematical Problems in Engineering. 2021, P. 1–13.

5. I Hrytsay I., Herus D. Study of the gear cutting process by the radial-circular method. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 9, № 4. P. 20–27.
6. Hrytsay I., Herus D., Hromniuk S. Comparative analysis of methods for cutting spur gears based on technical and economic parameters // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 10, № 2. P. 15–24.
7. E. Hrytsay, “Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation” in Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, S. P. Radzevich, M. Storchak, Eds. Cham, Switzerland: Springer Publ., 2022. P. 233-254.

Hromniuk S.¹, Verhun V.²

¹SPREnergo, Lviv, Ukraine

²¹National University «Lviv Polytechnic», Lviv, Ukraine

STUDY OF THE RADIAL-CIRCULAR GEAR CUTTING PROCESS, WHICH IS PERFORMED WITH DIFFERENT FEED DIRECTION

The results of the study of the process of gear cutting by the radial-circular method, carried out according to two schemes - with axial and radial feed. The studies, based on the analysis of the parameters of the cuts, chip deposition, cutting forces and the cutting time of the operation, showed that they differ significantly in all the analysed parameters. In the case of cutting with radial feed, the intensity of the process is significantly higher and the main machining time is reduced. At the same time, an increase in the cutting force threatens to increase the elastic deformation of the thin disc cutter as a cutting tool, which in this method performs the cutting movement and gear profile formation under conditions of continuous tooth generation, as is the case in hobbing and pover skving. This can lead to a reduction in machining accuracy and increased tool wear. In addition, radial cutting is limited to gears of small width, but there is no additional cutting path and runout, and the machining time is reduced. The optimum gear cutting scheme is a combination of two methods - starting cutting with radial feed to eliminate the cutting path, followed by a transition to cutting with axial feed over the full width of the gear.

Keywords: *gear cutting, radial-circular method, radial feed, axial feed, process parameters, efficiency*

УДК 621.7.01

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-07

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Використання нових технологій виробництва дозволяє підвищити якість продукції, однак, збільшення темпів виробництва вимагає більшої швидкості роботи існуючих технологій контролю виробів чи застосування нових ефективних підходів. В статті описано сучасні технології контролю якості виробів для забезпечення конкурентоспроможності продукції та її затребуваності на ринку з урахуванням специфіки формування виробів. Найбільш перспективними методами сучасних технологій контролю виробів є комп'ютерна томографія, що використовується для детального контролю та аналізу різних виробів і об'єктів; використання оптичних сенсорів для двовимірного аналізу виробів; використання оптоволоконних інструментів у координатно-вимірювальних машинах.

Ключові слова: *контроль, комп'ютерна томографія, модель, деталь, об'єкт, вимірювання, виріб, аналіз, сенсор, точність, дефект, якість.*

Постановка проблеми. Основною галуззю промисловості, що забезпечує науково-технічний прогрес суспільства, є приладобудування, якому властиві єдині вектори розвитку, що приводять виробництво до нового типу. Головні тенденції цих змін пов'язані з поняттям Індустрія 4.0, яка визначає новий вид промисловості з характерними особливостями представлення всіх процесів та зв'язків. Ключовими поняттями нового виду промисловості є зниження об'єктів виробництва, персоналізація виробів та постійна мережева взаємодія всіх учасників процесу. Таким чином, технології швидкого виробництва починають відігравати все більш важливу роль у створенні нових виробів [1].

Сучасні прилади включають в себе крім механічної складової, також і мікроелектронні компоненти, підвищення темпів виробництва яких суттєво впливає на розвиток промисловості. При цьому, в умовах швидкого виробництва ключову роль починає відігравати можливість створення таких компонентів у найкоротші терміни. Розвиток відкритої електроніки дозволяє забезпечити такі темпи, тому освоєння нових підходів до швидкого контролю виробів у цій сфері дуже важливе для приладобудування [2, 3].

Проблема дослідження. Використання нових технологій виробництва дозволяє підвищити якість продукції, що випускається, однак, збільшення темпів виробництва вимагає більшої швидкості роботи існуючих технологій контролю виробу або застосування нових ефективних підходів.

Процес формування тривимірних моделей майбутніх виробів, що є центральними елементами сучасного виробництва, також повинен прискорюватися під час переходу до нових етапів розвитку виробництва. Тому, важливо освоювати сучасні технології швидкого моделювання, включаючи ключову технологію для вирішення цього завдання – тривимірне сканування. Вивчення та використання технології тривимірного сканування має велике значення для побудови нових видів виробництва.

В результаті ключовим напрямком розвитку сучасних підприємств є впровадження технологій швидкого моделювання, контролю та виробництва приладів на основі використання передових технологій та реалізації підходів Індустрія 4.0 [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якби зміни не відбувалися у виробництві, контроль виробів залишається ключовим поняттям, що забезпечує випуск якісних виробів. В умовах швидкого виробництва потреба у ефективному контролі не тільки знижується, а й стає більш затребуваною, що пов'язано з особливостями такого виробництва. Сам принцип швидкого виробництва визначає скорочення термінів на розробку та випуск продукції, тому до засобів контролю пред'являються ще більш жорсткі вимоги щодо продуктивності та якості контролю, що призводить до необхідності використовувати передові технології та підходи [5].

Точність геометричних параметрів виробів адитивного виробництва є комплексним поняттям, що включає точність розмірів елементів виробів, їх геометричних форм і взаємного розташування елементів. Існує досить великий діапазон точності виробів, отримуваних різними технологіями адитивного вирощування. Допуски можуть змінюватися від мікрметрів (і навіть часток мікрметра) до декількох часток міліметра [6].

Мета роботи полягає у проведенні аналізу сучасних технологій контролю виробів адитивного виробництва для забезпечення якості виробів та визначення конкурентоспроможності продукції за її затребуваністю на ринку.

Викладення основного матеріалу. Для вирішення завдань контролю параметрів геометричної точності виробів адитивного виробництва використовують цілий ряд засобів вимірювання, що випускаються серійно. Застосування контактних засобів вимірювання контролю макро- і мікрогеометричних показників точності виготовлення поверхонь виробів часто є неможливим. Це зумовлено складністю форми більшості виробів, характером та величиною нерівностей на поверхнях об'єктів. Розміри вимірювальних наконечників, що застосовуються в контактних інформаційно-вимірювальних системах, як правило, співставні з характерними параметрами мікрорельєфу, що вносить додаткову похибку до результатів координатних вимірювань.

Тому для вирішення поставленої задачі застосовують фотограметричні інформаційно-вимірювальні системи, лазерні триангуляційні сканери або модифікації зазначених приладів, основними перевагами яких є висока точність, висока швидкість сканування та значний обсяг вимірювальної інформації. Одним із провідних розробників та постачальників вимірювального обладнання є компанія Werth. Серед нових типів обладнання цієї компанії виділяється серія Tomoscore (рис. 1, а), що реалізує принцип комп'ютерної томографії для детального контролю різних об'єктів (рис. 1, б, в).

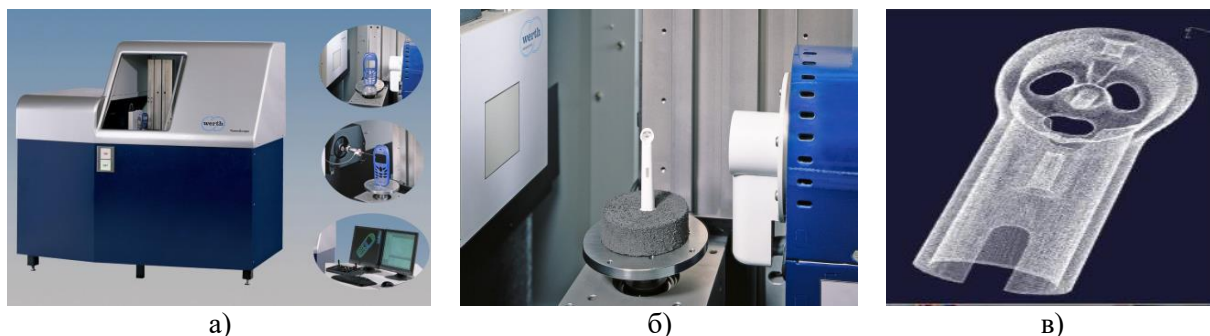


Рисунок 1 – Комп'ютерна томографія серії Tomoscore (а), процес зйомки головки зубної щітки (б) та модель, що отримана в результаті (в)

У процесі роботи рентген-випромінювання, що проектується на об'єкт, фіксується на спеціалізованому детекторі, тим самим створюючи знімок перерізу моделі (рис. 2, а). При цьому деталь поетапно повертається, що дозволяє отримати повну картину об'єкта як тривимірної моделі. Особливості процесу отримання знімків дозволяють вільно переміщати об'єкт між детектором та джерелом випромінювання. При цьому змінюється область, що захоплюється випромінюванням, і фіксується повний об'єкт або його частина. В результаті будь-яка область об'єкта може бути вивчена більш детально без втрати загальної роздільної здатності знімка (рис. 2, б).

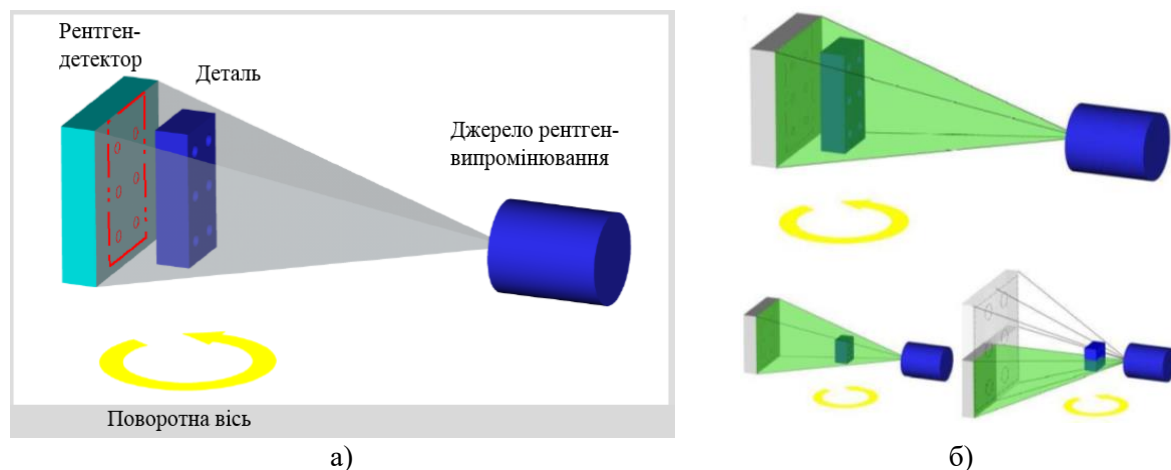


Рисунок 2 – Загальний принцип роботи томографа серії Tomoscore (а) та схематичне зображення особливостей масштабування областей (б)

Ключові переваги такого способу аналізу об'єкта впливають із його унікальності:

- повне 3D-вимірювання;
- повне, не деструктивне розпізнавання внутрішніх та зовнішніх форм за короткий період часу та з точністю контрольно-виміральної машини;
- точне вимірювання функціональних розмірів з обробкою зображення, лазером та щупом;
- результати відстежуються через калібрування безпосередньо на об'єкті, що вимірюється (штучна корекція);
- значне скорочення часу під час першої перевірки.

Відомо, що різні матеріали мають свої особливості поглинання рентген-випромінювання. На цій особливості базується спеціалізована функція аналізу об'єктів у системах Tomoscore – автоматичний поділ мультиматеріальних збірних виробів. Суть методу представлена на рисунку 3, на якому видно, що частина об'єкта не поглинає рентген-випромінювання. У цих областях знаходиться повітря. Інші області мають різний ступінь поглинання. Ті, що поглинають повністю, будуть мати білий колір і відмінно можуть бути розрізнені з сірими та чорними ділянками.

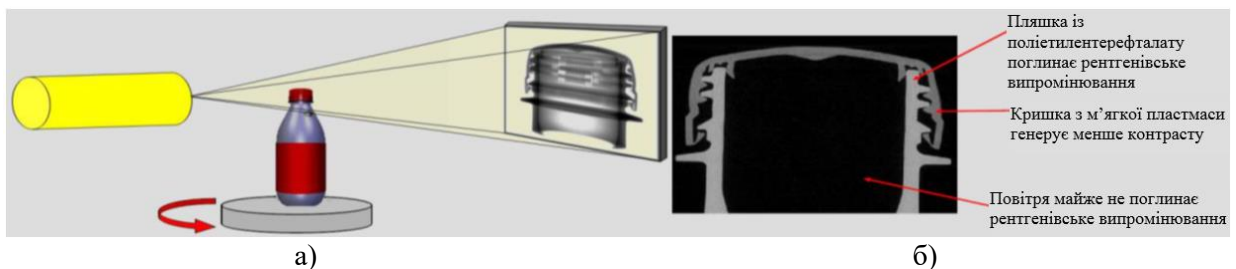


Рисунок 3 – Схема сканування збірних виробів (а) та подальшого розпізнавання компонентів (б)

В результаті ми не тільки отримуємо тривимірне складання (рис. 4, а, б), а й докладну гістограму матеріалів (рис. 4, в), що дозволяє проводити більш детальний аналіз і, у деяких випадках, точно визначати склад матеріалів виробу.



Рисунок 4 – Результат сканування складання (а) з наступним поділом на компоненти (б) та аналізом особливостей їх матеріалу (в)

Наступний рівень аналізу, унікальний для даного типу пристроїв, це внутрішній аналіз. Пошарове вивчення виробу дозволяє проаналізувати внутрішню структуру та визначити ті особливості, які недоступні іншим технологіям. Наприклад, при литті пластикових виробів усередину може потрапити повітря (рис. 5), що в майбутньому може порушити його працездатність або призвести до повного руйнування.

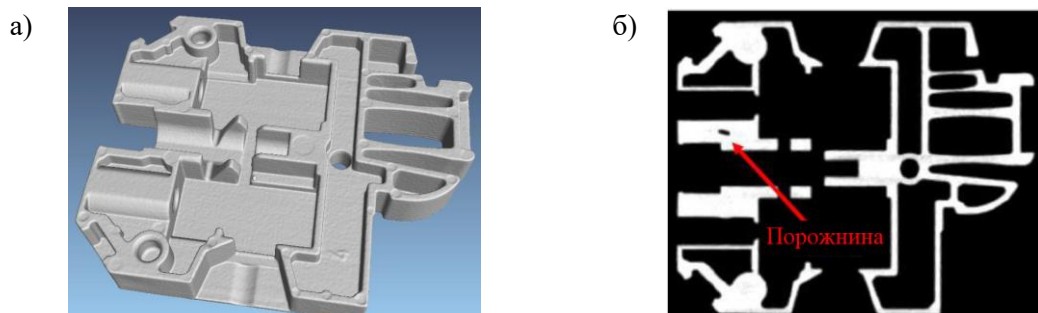


Рисунок 5 – Множина точок виробу (а) та 2D-переріз з візуалізацією внутрішніх порожнин, викликаних захопленням повітря (б)

Автоматичний аналіз порожнини за набором перерізів дозволяє створити карту розташування та розмірів порожнин (рис. 6, а). Аналіз властивостей таких порожнин дозволяє легко визначити пористість виробу (рис. 6, б).

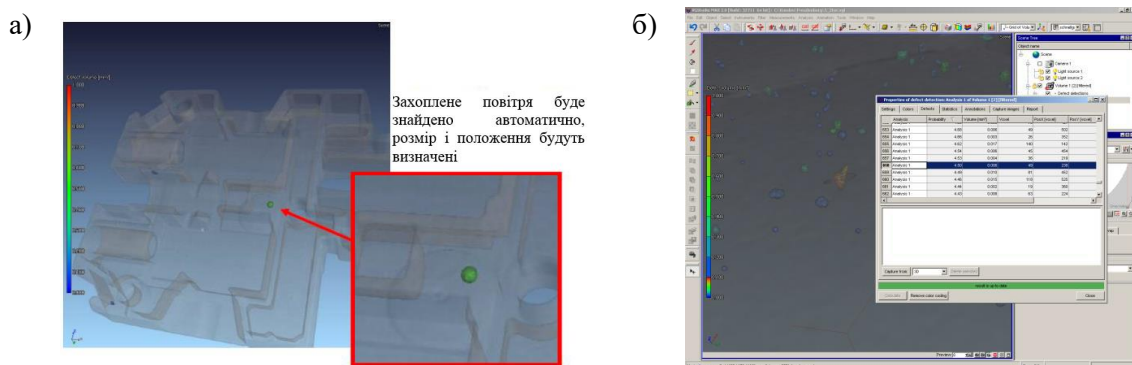


Рисунок 6 – Карта порожнин (а), виявлених у тривимірній моделі об'єкта, та результати її аналізу (б)

Аналогічно можуть бути проаналізовані тріщини (рис. 7), які або повністю розташовуються всередині моделі, або просто не можуть бути докладно вивчені за їх зовнішнім проявом.

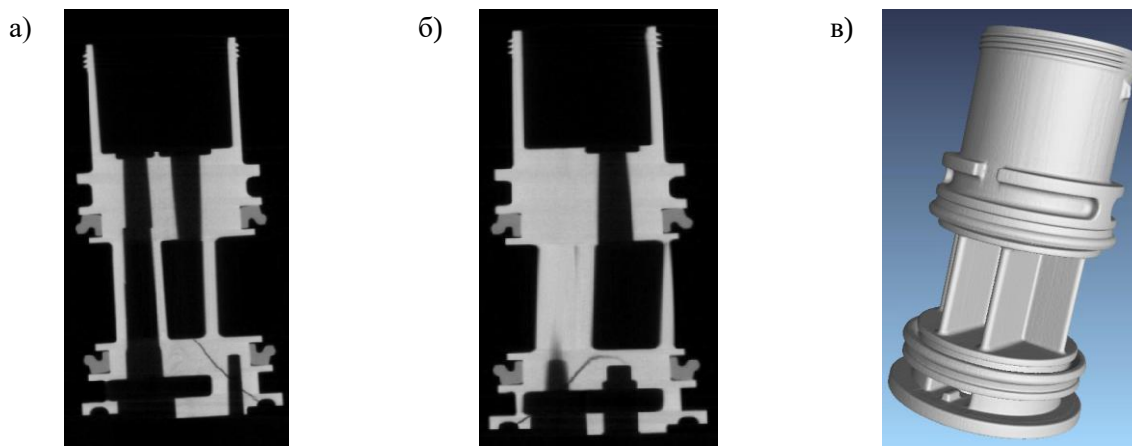


Рисунок 7 – Тріщини, які не видно зовні, але ясно помітні у поперечному перерізі

Якщо аналіз пористості або внутрішніх тріщин ще можливий при деструктивному аналізі, то функціональний аналіз складених виробів може бути зроблений лише з використанням представленої технології. Наприклад, процес деформації компонентів механічної ручки, залежно від її стану, аналізується тільки на основі рентген-перерізів. Так, викривлення пружини всередині ручки (рис. 8) може характеризувати рівномірність розподілу навантажень, що визначає довговічність виробу і вказує на потенційні проблеми при виробництві або складанні компонентів. Для виготовлення функціональних виробів підвищеної надійності такий аналіз має велике значення.

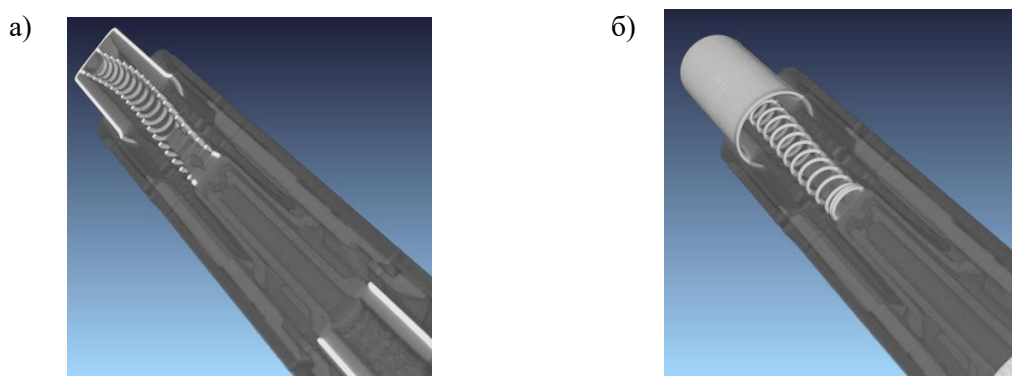


Рисунок 8 – Аналіз деформацій компонентів виробу на різних етапах функціонування

Не всі об'єкти вимагають об'ємного контролю. Частина об'єктів достатньо проаналізувати у двовимірному вигляді (рис. 9, а), щоб отримати більшу частину необхідних розмірів. Для вирішення таких завдань використовують спеціалізовані оптичні сенсори (рис. 9, б).

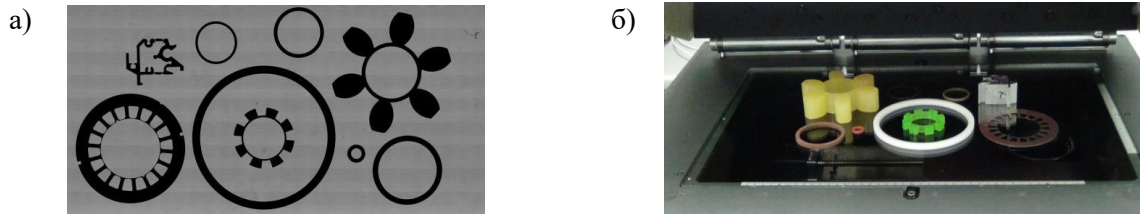


Рисунок 9 – Аналіз деталей простої геометрії (а) з використанням оптичних сенсорів (б)

Система автоматично фокусує сенсор перед об'єктом і здійснює його освітлення оптимальним способом для отримання чітких граней та якісного вимірювання (рис. 10, а). Отриманий знімок об'єкта аналізується та оперативно розбивається системою на примітиви (рис. 10, б), які вимірюються та автоматично контролюються при наявності еталонної моделі.

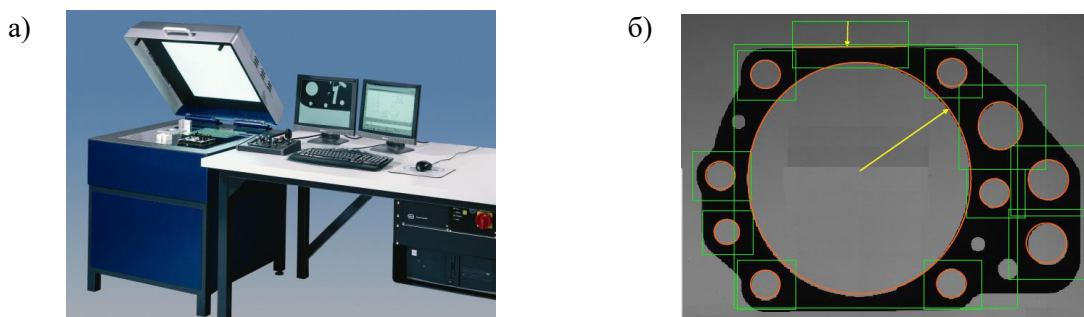


Рисунок 10 – Оптичний сенсор Score Check (а) та результати розпізнавання елементів на об'єкті (б)

Точність вимірювання такого пристрою становить $(2,5+L/120)$ мкм, при цьому роздільна здатність зображення може досягати 0,1 мкм. При контролі пошкоджених або засмічених виробів (рис. 11, а) технологія фільтрації дозволяє точно визначити контур та коректно проаналізувати виріб (рис. 11, б).

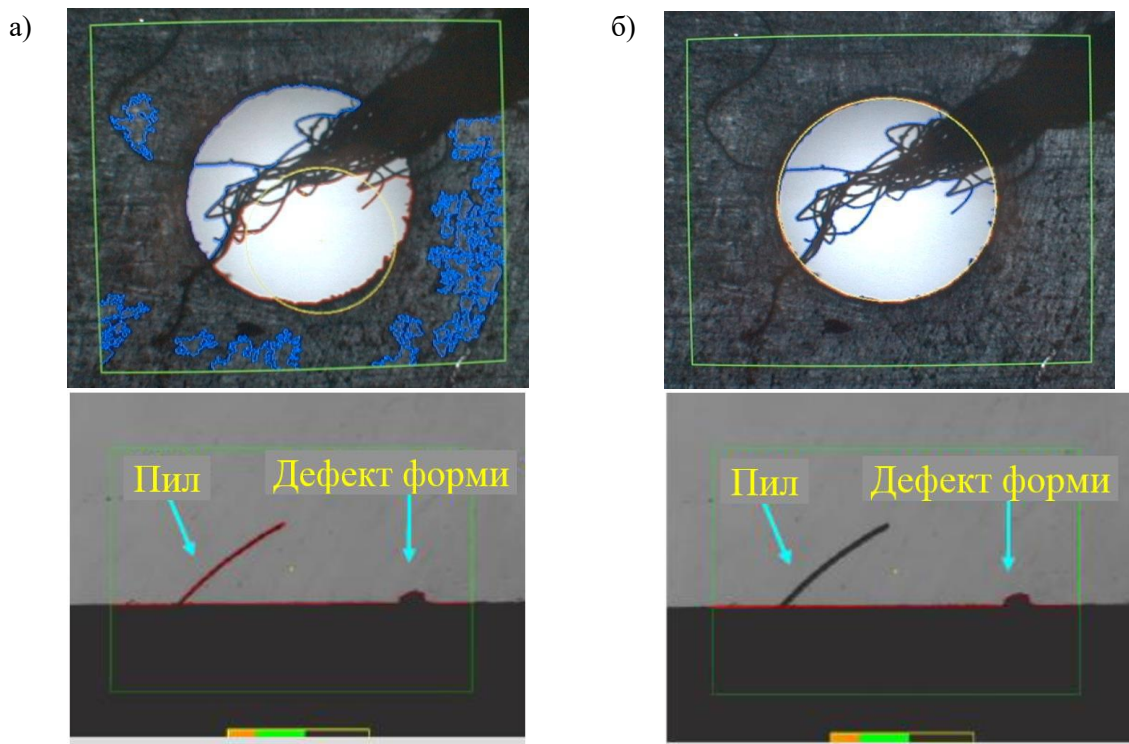


Рисунок 11 – Контроль розмірів без фільтрів (а) та з їх використанням (б)

Процес контролю може проводитися як у прохідному (рис. 12, а), так і у відбитому світлі (рис. 12, б), що дозволяє аналізувати об'єкт з двох сторін, істотно прискорити контроль і зробити його повністю автоматизованим.

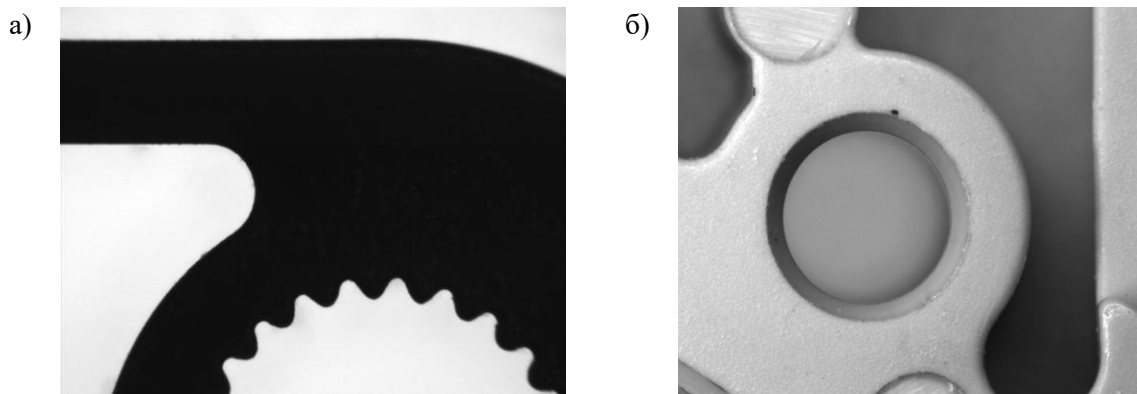


Рисунок 12 – Контроль розмірів у прохідному (а) і у відбитому (б) світлі

Рівень автоматизації також підвищується за рахунок використання системи автоматичного поєднання еталонної моделі із знімком виробу. При цьому об'єкт може автоматично повертатися або відображатися відносно осі симетрії (рис. 13).

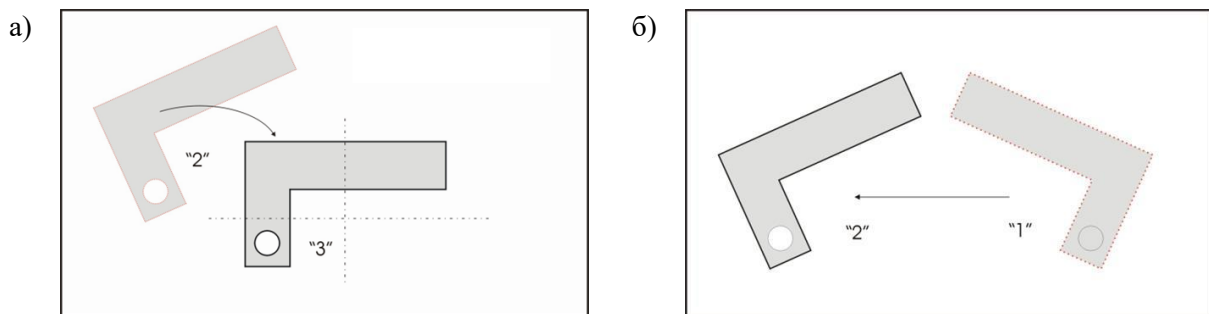


Рисунок 13 – Поворот еталонного об'єкта (а) або формування його дзеркального відображення (б)

За рахунок такої автоматизації суттєво спрощується робота оператора, що дозволяє працювати на обладнанні навіть із низькою кваліфікацією. Також забезпечується багатопозиційний контроль партії виробів невеликого розміру (рис. 14).

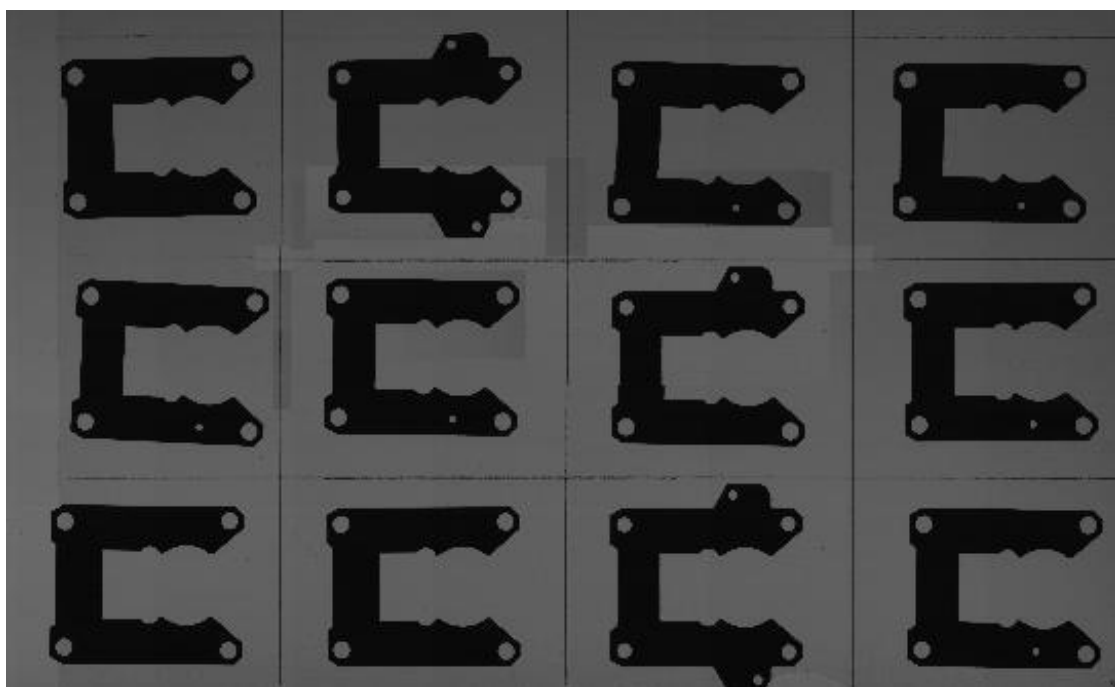


Рисунок 14 – Вимірювання набору однотипних виробів на палетах оптичного сенсора

При використанні додаткового пристрою у вигляді поворотної осі (рис. 15, а) на пристрої стає можливим проводити контроль осесиметричних виробів (рис. 15, б).

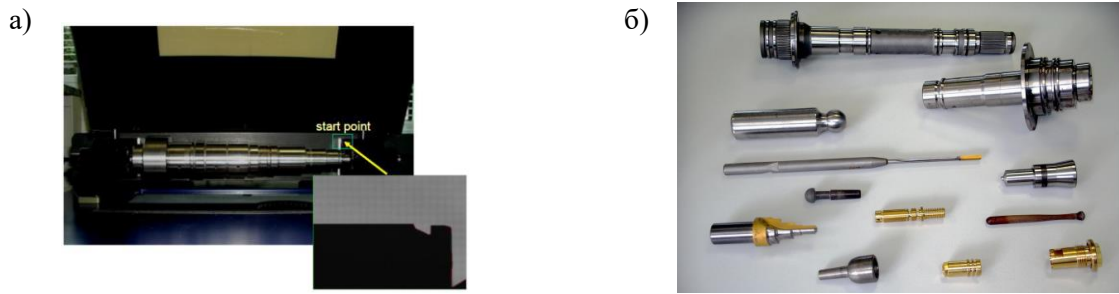


Рисунок 15 – Контроль осесиметричних виробів з використанням поворотної осі (а) та приклади таких виробів (б)

При цьому система автоматично визначає основні параметри таких виробів (рис. 16, а, б) та формує ескіз виробу (рис. 16, в).

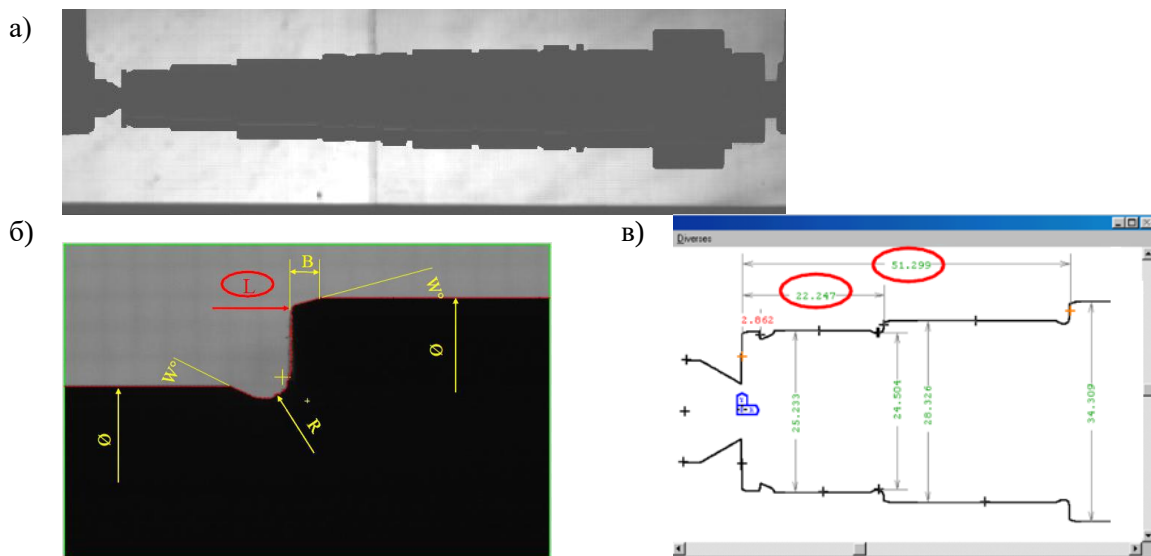


Рисунок 16 – Зображення осесиметричної деталі, отримане сенсором (а), результати його вимірювання (б) та контролю (в)

Серед обладнання, що застосовується для контролю виробів, продовжують домінувати координатно-вимірювальні пристрої, що забезпечують високий рівень автоматизації та точності вимірювання. Однак особливості застосовуваного інструменту часто обмежують і точність вимірювання та потенціальні можливості контролю складної геометрії.

Одним із способів підвищення якості контролю є застосування нових видів інструментів, що підвищують роздільну здатність при вимірюванні. Такому підходу відповідає оптоволоконний датчик Werth WFP. Розміри цього датчика настільки малі, що він без проблем може контролювати об'єкти дуже малого розміру (рис. 17, а). На рисунку 17 (б) представлено порівняння розміру звичайного щупа (праворуч вгорі) з розміром людського волосся (по центру) та розміром оптоволоконного щупа (зліва внизу).

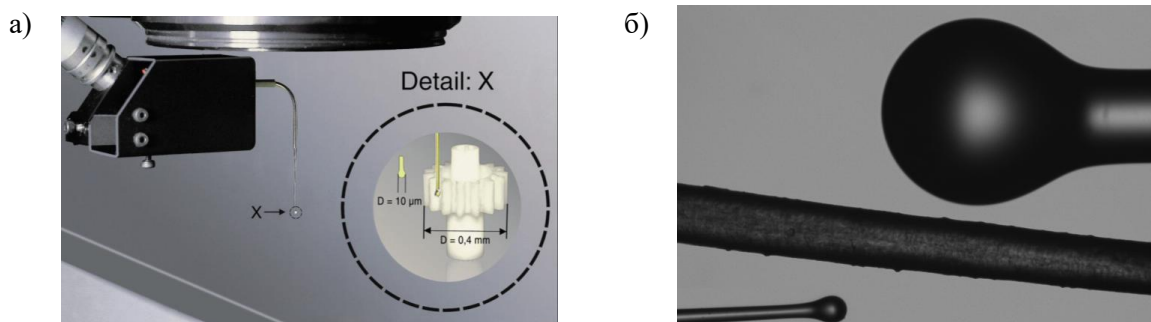


Рисунок 17 – Контроль мікрометрових розмірів (а) з використанням щупа малого діаметра (б)

Через малі розміри датчика його неможливо візуально розрізнити, тим самим не зафіксувати момент і положення його торкання поверхні об'єкта. В результаті необхідно використовувати спеціальний підхід до контролю, представлений на схемі (рис. 18).

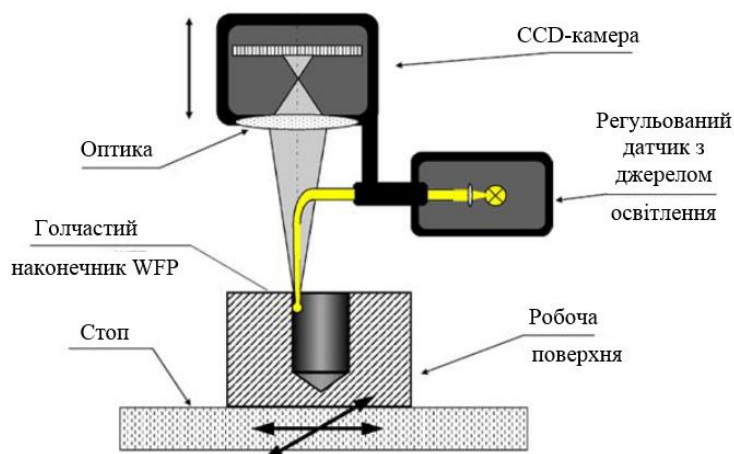


Рисунок 18 – Схема контролю виробів із використанням оптоволоконного щупа

Як видно із зображення, традиційна схема доповнюється джерелом освітлення та камерою для відстеження процесу. Особливість датчика дозволяє проводити через нього світло та формувати самоосвітлення на поверхні наконечника. У процесі контролю це самоосвітлення фіксується камерою зі збільшувальною оптикою, що дозволяє відстежувати як його переміщення поруч із деталлю (рис. 19, а), і момент торкання (рис. 19, б, в).

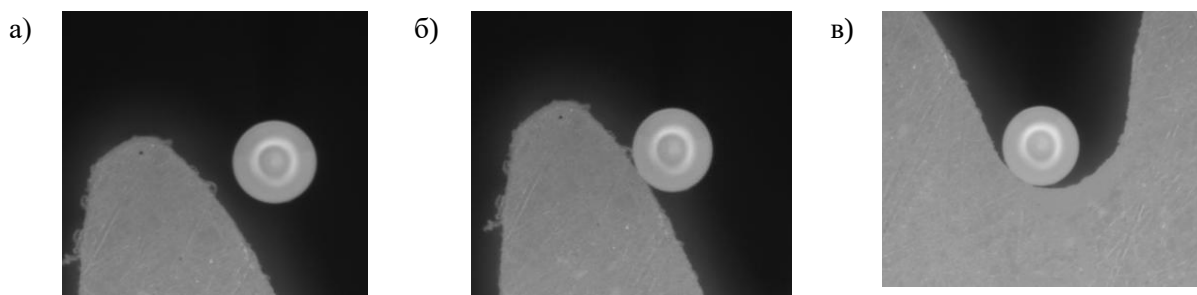


Рисунок 19 – Вимірювання профілю шестерні з використанням Werth Fiber Probe WFP у режимі самоосвітлення

Різні модифікації конструкції вимірювальної системи (рис. 20) дозволяють застосовувати такий засіб контролю для широкої номенклатури виробів. Особливості такої конструкції забезпечують низку переваг:

- можна виміряти найменші 3D-параметри (сфери від 20 мкм до 500 мкм);
- незначне вимірювальне зусилля («майже безконтактне»);
- найточніше вимірювання серед усіх існуючих щупів;
- відсутній вплив довжини щупа на результати контролю;
- можливий контроль шорсткості поверхні.

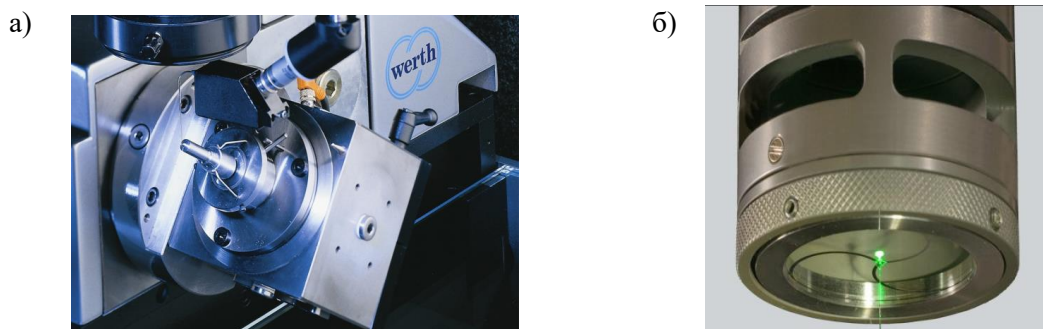


Рисунок 20 – Використання датчика у конструкції з поворотним столом (а) та у вигляді 3D мікро щупа (б)

Висновки. При побудові системи контролю якості в адитивному виробництві необхідно застосування методів контролю якості використовуваних матеріалів, поопераційних методів технологічного контролю, що забезпечують якість та повторюваність технологічних етапів процесу, методів вихідного контролю виробів. Комплексний контроль якості та його детальне документування особливо актуальні у зв'язку із серійним (дрібносерійним) виробництвом виробів пошарового вирощування, безпека експлуатації яких дуже важлива в автомобільній, авіаційній промисловості, медицині та інших сферах. Підвищення точності в адитивному виробництві пов'язане з використанням автоматичних стратегій управління параметрами процесу в реальному часі. Ефективним методом підвищення точності процесів адитивного виробництва та отримуваних виробів є інтеграція адитивної та традиційної обробки отримуваних виробів.

Інформаційні джерела

1. Білоусов Є. М., Борисов І. В. Концепція «Індустрія 4.0»: проблеми впровадження і окремі правові аспекти її реалізації в Україні: монографія. Харків: НДІ прав. забезп. інновац. розвитку НАПрН України, 2021. 200 с.
2. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 16. С. 38-47.
3. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 17. С. 33-41.
4. Пальчевський Б. О., Валецький, Б. П., Вараніцький Т. Л. Системи 3D моделювання: навч. посіб. Луцьк: ЛНТУ, 2016. 176 с.
5. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 91 с.
6. Ступницький В. В. Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу: дис ... докт. техн. наук : 05.02.08. Львів, 2015. 423 с.

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR CONTROL OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

The use of new production technologies allows to improve the quality of products, however, increasing the production rate requires a higher speed of operation of existing product control technologies or the use of new effective approaches. The article describes modern technologies for product quality control to ensure the competitiveness of products and their demand in the market, taking into account the specifics of product formation. The most promising methods of modern product control technologies are computed tomography, which is used for detailed control and analysis of various products and objects; the use of optical sensors for two-dimensional analysis of products; the use of fiber-optic instruments in coordinate measuring machines.

Keywords: control, computed tomography, model, part, object, measurement, product, analysis, sensor, accuracy, defect, quality.

УДК 62-229.324

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-8

Дячун А. Є., Федоревич В. М., Грасовник В. Ю., Гинда Т. Ю., Дериш О. Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВКИ З НАВИВНИМИ СТРІЧКОВИМИ ПРУЖНИМИ ГВИНТОВИМИ ЗАТИСКНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

У статті представлено конструкцію і трьохмірну модель оправки з навивними стрічковими пружними гвинтовими затискними елементами. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Представлено параметричні рівняння поверхні гвинтового затискного елемента з конічними частинами. Розроблено розрахункову схему геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами. Виведено рівняння для визначення осьової сили, що необхідно прикладати на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при його деформуванні.

Побудовано графіки залежності осьової сили, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента. Проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним гвинтовим затискним елементом та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів.

Ключові слова: оправка, навивний затискний елемент, стрічковий гвинтовий затискний елемент, деформація, осьова сила, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Для затиску та базування під час оброблення циліндричних заготовок, особливо тонкостінних, широко використовуються оправки та патрони з пружними затискними елементами, серед яких можна виділити цангові оправки, з гофрованими елементами, оболонковими елементами, гідропластові, гідромеханічні, з тарілчастими пружинами та інші. Серед вказаних конструкцій особливу увагу приділено оправкам з гвинтовими затискними елементами, основний принцип роботи яких полягає у зміні розмірів гвинтових затискних елементів під час прикладання на торцях осьового навантаження або крутного моменту. Зміна розміру у радіальному напрямку дорівнює зазору між заготовкою та гвинтовим затискним елементом. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Для збільшення сили затиску заготовок у таких оправках використовують додаткові елементи, що ускладнює їх конструкцію. Для збереження простоти конструкції оправки та підвищення сил затиску заготовки запропоновано використовувати конічні гвинтові затискні елементи. Розроблення та дослідження роботи гвинтових затискних елементів у патронах, оправках, захоплювачах робіт виконували такі науковці: Гевко Б. М. [1-3], Васильків В. В. [4, 5], Ляшук О. Л. [2, 3], Скиба О. П. [5-7], Генік І. С. [8], Гагалюк А. В. [9], Луців І. В. [12, 13] та інші.

У роботах [4, 5] розроблено багатоваріантну структуру конструктивних та функціональних особливостей реалізації процесів затиску заготовок, а також синтез у вигляді системи ієрархічних трьох рівнів затискних пристроїв, в основі яких використовуються пружні затискні елементи, що дало можливість генерування множини можливих альтернатив для кожного рівня. Спроектовано і реалізовано у виробництві різноманітні патрони та оправки [7-9, 12-16]. Розроблено математичні моделі для розрахунку сили затиску заготовки для забезпечення її механічної обробки [2, 5, 7, 14, 16]. Розглянуто циліндричні, конічні, гофровані гвинтові затискні елементи [1, 7-9]. Також визначено похибки базування та закріплення заготовок гвинтовими затискними елементами [7, 8]. Визначено загальну умову фрикційної взаємодії гвинтового елемента затиску з опорними елементами затискного пристрою по всій довжині гвинтового затискного елемента [7, 8]. Проведено ряд експериментальних досліджень для визначення силових параметрів процесу затиску заготовок гвинтовими затискними елементами, жорсткості затискних пристроїв а також проведено механічне оброблення закріплених деталей [7-9]. У розглянутих роботах не враховано можливість використання конічних гвинтових затискних елементів для підвищення сил затиску заготовки.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є розроблення

конструкції оправки з навивними стрічковими пружними конічними гвинтовими затискними елементами та встановлення взаємозв'язку її конструктивних та силових параметрів в процесі затиску заготовки.

Для досягнення мети роботи розроблено оправку з пружними конічними гвинтовими затискними елементами, що представлено на рис. 1.

Оправка з навивними стрічковими пружними конічними гвинтовими затискними елементами (рис. 1) складається із корпусу 1 з конічним хвостовиком, за допомогою якого оправка встановлюється у конічному отворі шпинделя токарного або круглошліфувального верстата. На корпусі 1 встановлено упорне кільце 2, що застосовується як елемент базування циліндричної заготовки 3. Затиск і базування заготовки по внутрішній циліндричній поверхні здійснюється тарілчастим гвинтовим затискним елементом 4, що вільно встановлений на циліндричній частині корпусу 1. В отворі корпусу 1 встановлено затискну втулку 5 з можливістю осевого переміщення за рахунок обертання гвинта 6.

Робота оправки з пружними гвинтовими затискними елементами виконується таким чином. Заготовку 3 базують по зовнішній циліндричній поверхні тарілчастого гвинтового затискного елемента 4 з у пором в кільце 2. Після цього повертають гвинт 6, який переміщує затискну втулку 5 вліво.

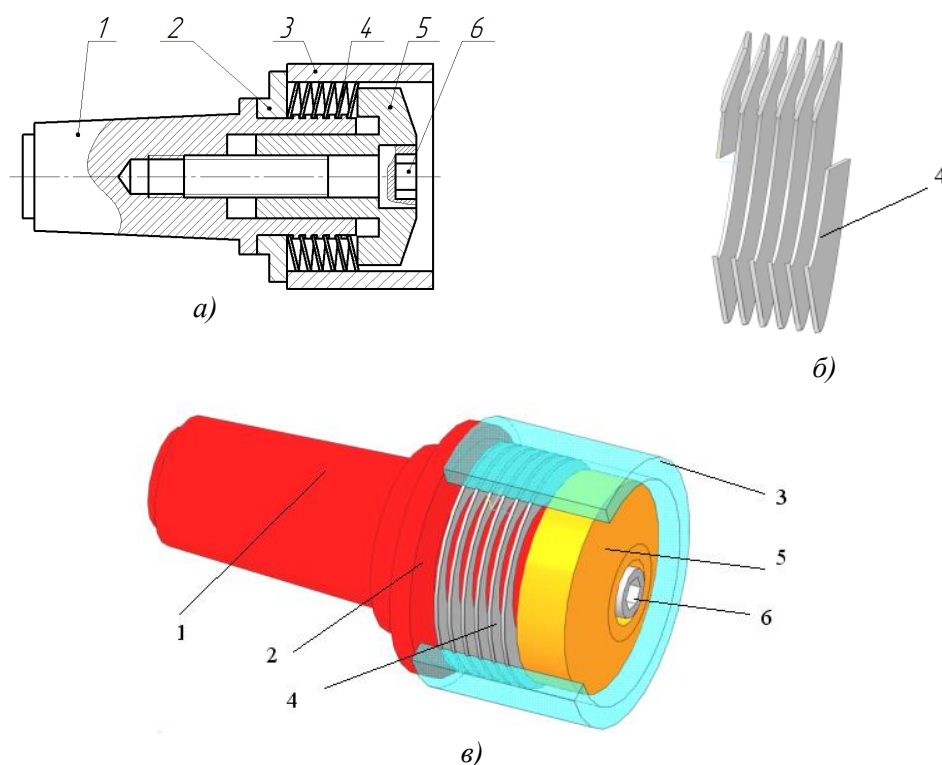


Рисунок 1 – Конструкція оправки з пружними гвинтовими затискними елементами
а) поперечний переріз; б) переріз тарілчастого гвинтового затискного елемента; в) трьохмірне зображення

Остання стискає тарілчастий гвинтовий затискний елемент 4, внаслідок чого спочатку зменшується його крок витків і зростає зовнішній діаметр до контакту із заготовкою 3, а потім за рахунок деформації конічної форми гвинтового затискного елемента, зменшується його внутрішній діаметр до контакту із циліндричною частиною корпусу 1. Внаслідок цього відбувається одночасне базування та затиск заготовки 3 по центральному отвору.

Після механічного оброблення заготовки викручують гвинт 6, тарілчастий гвинтовий затискний елемент 4 розтягується до вихідної форми, при цьому зменшується його внутрішній діаметр, виходячи із контакту із заготовкою 3. Знімають заготовку. Оброблення наступної заготовки здійснюється аналогічно.

У роботі тарілчастого гвинтового затискного елемента можна виділити два основних етапи:

1. Деформація в осьовому та радіальному напрямку за рахунок прикладання осевого навантаження і зменшення кроку витків.

2. Деформація в осьовому напрямку та радіальному напрямку за рахунок прикладання осьового навантаження і зміни кута нахилу конічної частини гвинтового елемента.

Поверхню гвинтового затискного елемента (ГЗЕ) з конічними частинами можна описати параметричними рівняннями:

$$x = R \cos \theta; \quad y = R \sin \theta; \quad z = \frac{T}{2\pi} \theta + R \sin \alpha, \quad (1)$$

де R – зовнішній радіус ГЗЕ; T – крок витків ГЗЕ на середній лінії; θ – кутовий параметр; α – кут нахилу конічної частини гвинтового затискного елемента.

На основі рівняння (1) побудовано поверхню гвинтового затискного елемента з конічними частинами, що зображена на рисунку 2.

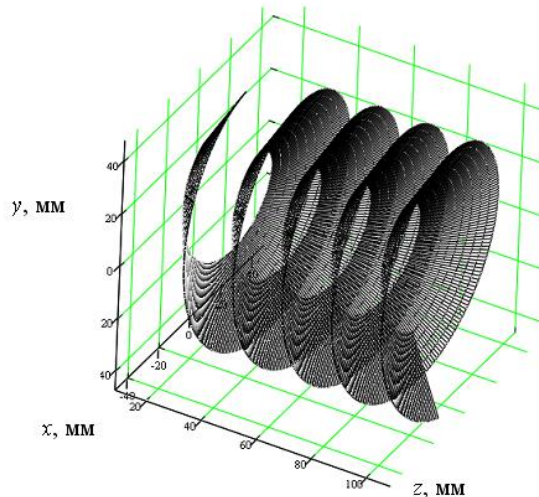


Рисунок 2 – Поверхня гвинтового затискного елемента з конічними частинами

Під час затиску заготовки на першому етапі розміри радіуса R ГЗЕ зростають, при цьому крок T витків зменшується:

$$R = R_0 + \Delta R; \quad (2)$$

$$T = T_0 - \Delta T, \quad (3)$$

де ΔR – величина приросту радіуса ГЗЕ під час затиску заготовки;

ΔT – величина зменшення кроку T витків при осьовому навантаженні;

R_0 – початковий радіус витків, T_0 – початковий крок витків.

Геометричні параметри затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами показано на розрахунковій схемі (рис. 3).

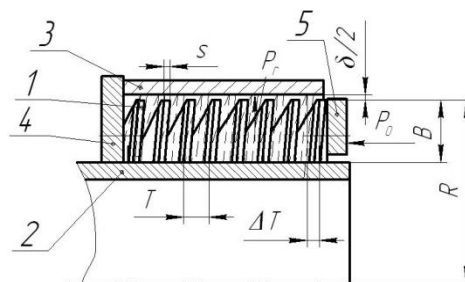


Рисунок 3 – Розрахункова схема геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами: 1 – гвинтовий затискний елемент, 2 – корпус оправки, 3 – заготовка, 4 – упорне кільце, 5 – затискна втулка

Величина приросту радіуса ГЗЕ під час затиску заготовки [10]:

$$\Delta R = \frac{\Delta K \left(R^2 + \frac{T_0^2}{4\pi^2} \right)^2 + R \Delta T \frac{T_0}{2\pi^2}}{-R^2 + \frac{T_0^2}{4\pi^2}}; \quad (4)$$

$$\Delta R = \frac{\delta}{2}, \quad (5)$$

де δ – початковий зазор між заготовкою та гвинтовим затискним елементом з конічними частинами;

ΔK – зміна кривизни дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами.

Зміну кривизни дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами визначаємо за формулою [10]:

$$\Delta K = \frac{M_3}{EJ_x}, \quad (6)$$

де M_3 – момент згину витка ГЗЕ;

E – модуль Юнга матеріалу ГЗЕ;

J_x – осьовий момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ.

Осьовий момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ [11]:

$$J_x = \frac{sB}{12} (B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha), \quad (7)$$

де s – товщина матеріалу витка ГЗЕ; B – ширина витка ГЗЕ; α – кут нахилу конічної частини гвинтового елемента.

Момент згину витка гвинтового затискного елемента з конічними частинами:

$$M_3 = P_0 R \sin \beta; \quad (8)$$

$$\sin \beta = \frac{T_0}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}; \quad (9)$$

$$M_3 = \frac{P_0 R T_0}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}, \quad (10)$$

де P_0 – осьова сила, прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами за рахунок переміщення втулки 5 і обертання гвинта 6;

β – кут підйому гвинтової лінії затискного елемента.

Момент кручення витка гвинтового затискного елемента з конічними частинами:

$$M_k = P_0 R \cos \beta; \quad (11)$$

$$\cos \beta = \frac{2\pi R}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}; \quad (12)$$

$$M_k = \frac{2\pi P_0 R^2}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}. \quad (13)$$

Величину зменшення кроку T витків при осьовому навантаженні виводимо на основі досліджень [10]:

$$\Delta T = \frac{\Delta \Omega \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}{4\pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)} \dots$$

$$\dots \frac{+ \Delta K \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right)}{\dots}.$$
(14)

Зміну кручення дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами визначаємо за формулою [10]:

$$\Delta \Omega = \frac{M_k}{GJ_p},$$
(15)

де G – модуль пружності другого роду матеріалу ГЗЕ;

J_p – полярний момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ.

Полярний момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ [11]:

$$J_p = sB^3 \xi.$$
(16)

Підставляючи формули (7), (10) у формулу (6), одержуємо:

$$\Delta K = \frac{12P_0 R T_0}{sBE \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}.$$
(17)

Підставляючи формули (13), (16) у формулу (15), одержуємо:

$$\Delta \Omega = \frac{2\pi P_0 R^2}{GsB\xi \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}.$$
(18)

Підставляємо дані у рівняння (14)

$$\Delta T = \frac{\frac{2\pi P_0 R^2}{GsB^3 \xi \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}} \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}{4\pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)} \dots$$

$$+ \frac{12P_0 R T_0}{sBE \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}} \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right) \dots$$
(19)

Із рівняння (19) знаходимо осьову силу, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами

$$P_0 = \frac{4\pi^2 \Delta T s B \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2} \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)}{2\pi R^2 \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}$$

$$\dots \frac{+ \frac{12RT_0}{E} \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right)}{\dots}.$$
(20)

Використовуючи рівняння (20), побудовано графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску

заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента (рисунки 4, 5).

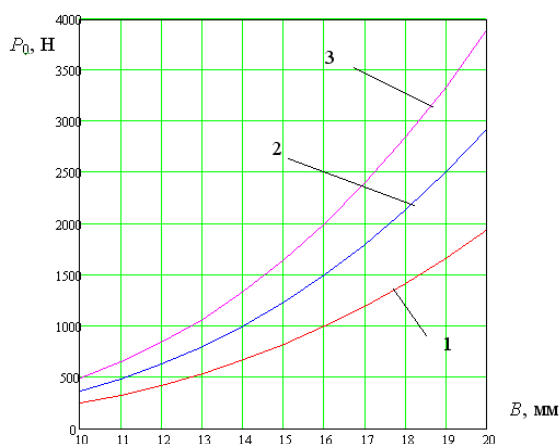


Рисунок 4 – Графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки від ширини витка ГЗЕ $R=50$ мм, $s=2$ мм: 1) $\Delta T=4$ мм; 2) $\Delta T=6$ мм; 3) $\Delta T=8$ мм

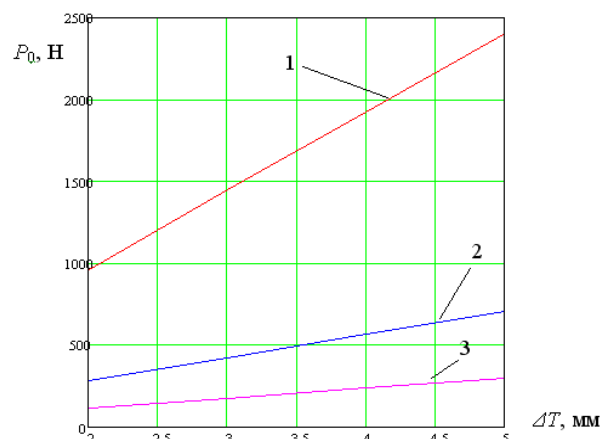


Рисунок 5 – Графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки від величина зменшення кроку витків ΔT при осьовому навантаженні $B=10$ мм, $s=2$ мм: 1) $R=20$ мм; 2) $R=30$ мм; 3) $R=40$ мм

З рисунків 4 і 5 та на основі аналізу рівняння (20) визначено, що із збільшенням ширини та товщини витка гвинтового затискного елемента, величини зменшення кроку витків осьова сила P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки зростає, а при збільшенні зовнішнього радіуса ГЗЕ – зменшується.

Максимальна величина осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки складає 3814 Н, а мінімальна величина – 122 Н. Збільшення ширини витка гвинтового затискного елемента від 10 мм до 20 мм призводить до зростання осьової сили P_0 в 7,6 рази.

Збільшення величини зміни кроку витків від 2 мм до 5 мм призводить до зростання осьової сили P_0 в 2,5 рази. При цьому збільшення величини зовнішнього радіуса гвинтового затискного елемента від 20 мм до 40 мм призводить до зменшення осьової сили P_0 в 7,6 рази.

Отже, для зменшення осьової сили P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки потрібно застосовувати ГЗЕ з мінімальною товщиною і шириною стрічки допустимими жорсткістю системи та з мінімальним зазором між заготовкою та ГЗЕ, що відповідно зменшує зміну кроку витків та хід затискної втулки.

Також на основі розробленої моделі рис. 1 за допомогою прикладного програмного забезпечення проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним ГЗЕ та закріплених на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів. Результати моделювання представлено на рис. 6, 7, 8.

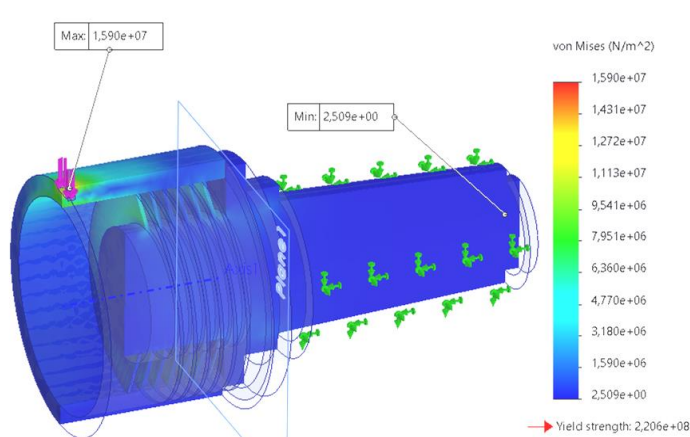


Рисунок 6 – Розподіл напружень в оправці з пружним ГЗЕ та закріплених на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили

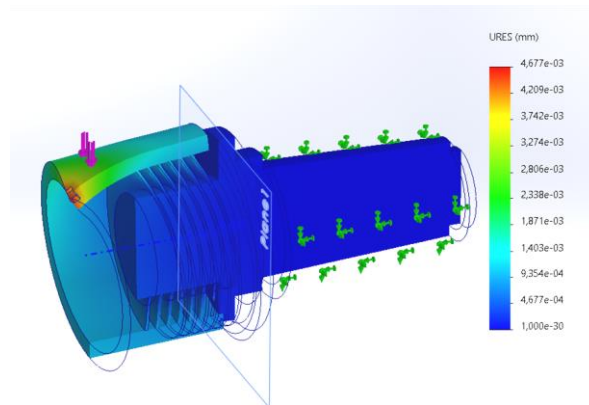


Рисунок 7– Розподіл деформацій в оправці з пружним ГЗЕ та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили

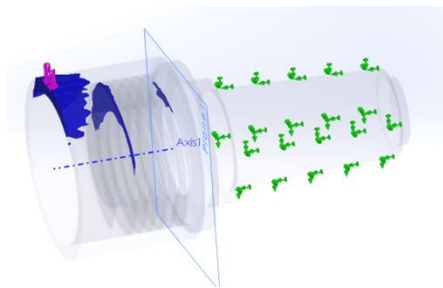


Рисунок 8 – Визначення місць оправки з пружним ГЗЕ та закріпленої на ній заготовки, що мають найменший запас міцності

В результаті моделювання (рис. 6 та 7) встановлено, що при зовнішній радіальній силі 200 Н максимальні напруження дорівнюють 15,9 МПа, а максимальні деформації виникають на консольній частині заготовки і дорівнюють 0,005 мм. Максимальні напруження (5 МПа) та деформації на оправці (0,0012 мм) спостерігались на першому витку ГЗЕ. Відповідно найменший запас міцності одержано на консольній частині заготовки та на першому витку ГЗЕ. Одержані значення напружень не перевищують границю текучості матеріалів заготовки та ГЗЕ, а деформації знаходяться в межах допуску на оброблення поверхонь заготовки.

Висновки. Представлено конструкцію і трьохмірну модель оправки з навитими стрічковими пружними гвинтовими затискними елементами. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок, за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Представлено параметричні рівняння поверхні гвинтового затискного елемента з конічними частинами. Розроблено розрахункову схему геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами. Виведено рівняння для визначення осьової сили, що необхідно прикладати на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при його деформуванні.

Побудовано графіки залежності осьової сили, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента. Проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним гвинтовим затискним елементом та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів. Подальші дослідження спрямовані на виготовлення оправки з ГЗЕ та проведення експериментів.

Інформаційні джерела

1. Гевко Б., Кочубинська О., Дячун А. Розрахунок затискних оправок верстатів з гвинтовими гофрованими елементами. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль, 2008. Т.13, №2. С. 54-60.
2. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Скиба О. П., Ляшук О. Л., Пік А. І. Теоретичне обґрунтування взаємодії гвинтових затискних елементів із заготовкою. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. Краматорськ, 2010. Вип. 27. С. 102-106.
3. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Ляшук О. Л., Клендій В. М. Розрахунок патрона для затискання тонкостінних циліндричних заготовок. Вісник Національного університету

“Львівська політехніка”. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2011. № 713. С. 63–67.

4. Васильків В. В., Генік І. С., Скиба О. П. До питання синтезу конструкції механізмів з робочими затискними пружними гвинтовими елементами. Житомирський державний технологічний університет. Зб. наук. праць. Житомир, 2006. Вип. 3. С. 171-180.

5. Гевко І. Б., Васильків В. В., Генік І. С., Скиба О. П. До питання розрахунку конструктивних параметрів затискних пристроїв з гвинтовими елементами. Наукові нотатки. Луцьк, 2005. Вип. 17. С. 49-57.

6. Скиба О. П. Синтез гвинтових затискних пристроїв для закріплення тонкостінних заготовок на металорізальних верстатах: дис. ... кандидата техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2010. 180 с.

7. Гевко І. Б., Скиба О. П. Дослідження сили затиску заготовок затискними гвинтовими патронами. Вісник ТДТУ. Тернопіль 2009. Том 14. №2. С. 57-62.

8. Генік І. С. Теоретичне обґрунтування параметрів гвинтових затискних пристроїв металорізальних верстатів : дис... кандидата техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2006. 178 с.

9. Гагалюк А. В. Підвищення якості оброблення циліндричних поверхонь деталей машин з використанням спорядження з передавально-підсилюючими елементами : дис... кандидата техн. наук : 05.02.08 Тернопіль, 2011. 177 с.

10. Nevko, I., Liashuk O., Diachun A., Hud V. Investigation of the sectional working body deformation of a flexible screw conveyor. ТЕКА. 2019. Vol. 19. No. 3. P. 11–20.

11. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи / Т. А. Довбуш та ін. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.

12. Луців І. В., Волошин В. Н. Затискні кулачки з адаптивними властивостями для затиску тонкостінних деталей. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 14-15 травня 2020 року. Т. : ТНТУ, 2020. С. 90–91.

13. Луців І., Волошин В., Лось І. Розрахунок напружено-деформованого стану затискного кулачка з адаптивними властивостями. МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 43–44.

14. Sohrabifard, M., Nategh, M. J., Ghazavi, M. R. Evaluation, calibration, and modal analysis for determination of contact stiffness between workpiece and components of milling fixture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2023. 237(12). P. 1819-1835.

15. Sobora, D., Povolny, M. Jig for clamping the chuck during milling. Proceedings of the 34th DAAAM International Symposium. 2023. 34. P. 531-536.

16. Ivanov V., Botko F., Dehtiarov I., Kočiško M., Evtuhov A., Pavlenko I., Trojanowska, J. Development of flexible fixtures with incomplete locating: connecting rods machining case study. Machines. 2022. 10. 493.

Diachun A., Fedorevych V., Grasovnyk V., Gynda T., Derysh O.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THE STUDY OF MANDREL PARAMETERS WITH WOUND ELASTIC TAPE SCREW CLAMPING ELEMENTS

The article presents the design and three-dimensional model of a mandrel with wound elastic tape screw clamping elements. The advantage of such mandrels is the ability to clamp thin-walled cylindrical workpieces by distributing the clamping force over the entire contact surface between the workpiece and the elastic screw clamping element. The parametric equations of the surface of a screw clamping element with conical parts are presented. The calculation scheme of the geometrical parameters of clamping the workpiece with a screw clamping element with conical parts was developed. The equation for determining the axial force that must be applied to the end of a screw clamping element with conical parts during its deformation is derived. Graphs of the dependence of the axial force applied to the end of the screw clamping element with conical parts when clamping the workpiece on the geometric parameters of the screw clamping element were constructed. The stress-strain state of a mandrel with an elastic screw clamping element and a workpiece fixed on it under the action of an external radial force was studied using the finite element method.

Keywords: mandrel, wound clamping element, tape screw clamping element, deformation, axial force, stress-strain state.

УДК 621.315.592

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-9

Луцьков С. В.

Луцький національний технічний університет

РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

Досліджено залежності питомого опору від потоку електронного опромінення з енергією 10 MeV для монокристалів германію, легованих домішкою сурми, при різних температурах. Для всіх одержаних залежностей характерним є наявність максимуму, який пов'язаний з максимальним ступенем компенсації опромінених монокристалів n-Ge та найбільш ефективним розсіянням електронів на утворених радіаційних дефектах для певного потоку опромінення. Встановлено, що при підвищенні температури питомий опір n-Ge зменшується за рахунок іонізації глибоких рівнів радіаційних дефектів та зростання рухливості носіїв струму. Для потоків $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16}$ ел./см² спостерігається значне зменшення питомого опору германію при переході через максимум, що пояснюється зростанням концентрації носіїв струму внаслідок n-p-конверсії типу провідності германію. Найбільшу радіаційну стійкість до електронного опромінення мають монокристали n-Ge, опромінені кратно меншими потоками електронів за $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ ел./см² або потоками $\Phi > 2 \cdot 10^{16}$ ел./см². Одержані результати є важливими при конструюванні та експлуатації електронних приладів та сенсорів, виготовлених на основі германію, які функціонують в полях підвищеної радіації.

Ключові слова: монокристали n-Ge, електронне опромінення, питомий опір, радіаційні дефекти, радіаційна стійкість, ступінь компенсації.

Постановка проблеми. Враховуючи те, що тривалість роботи ядерних та термоядерних реакторів, експлуатація космічних апаратів повинна бути не менше 10 років, то протягом цього ж часу повинні неперервно "працювати" і матеріали електроніки, яка використовується в автоматичності таких систем [1-3]. В іншому ж випадку такі матеріали будуть економічно не вигідними. Випромінювання космосу та реакторів призводить до змін структури цих матеріалів та, відповідно, їх міцності, електричних та інших властивостей. Тому також важливими вимогами, які висуваються до електроніки, яка має функціонувати в полях підвищеної радіації, є точність та стабільність її параметрів. А це, в свою чергу, вимагає проведення досліджень впливу різного роду випромінювань на матеріали електроніки та електронні прилади, розробки нових підходів та технологій стабілізації робочих характеристик цих приладів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш уразливими елементами електроніки до впливу проникаючої радіації є напівпровідникові матеріали. Тому сьогодні основною задачею науковців та інженерів є забезпечення надійного та тривалого функціонування таких елементів та, відповідно, напівпровідникової електроніки в цілому в умовах підвищеного радіаційного фону [4-7]. В монографії [4] розглядаються наукові основи одержання радіаційно-стійких датчиків Холла та контрольно-вимірювальної апаратури для термоядерних реакторів та прискорювачів заряджених частинок. В роботах [5-7] вивчався вплив космічного випромінювання на функціональну надійність пристроїв мікроелектромеханічних систем (MEMS), що є важливим для застосувань у верхніх шарах атмосфери та космосі. Було встановлено, що чутливість MEMS, робота яких базується на електростатичних принципах, до випромінювання сильно залежить від ступеня накопичення захопленого заряду в діелектриках. Термічно ж або електромагнітно керовані MEMS набагато більш стійкі до радіації. MEMS, що працюють на основі п'єзорезистивних принципів, починають повільно деградувати при низьких поглинутих дозах радіації, але їх параметри не виходять за катастрофічну межу збоїв до доз у кілька Мрад. В роботі [8] проведений детальний огляд різних матеріалів, стійких до опромінення, розглянуті параметри радіаційної стійкості та способи її оцінки, можливість застосування цих матеріалів в ядерних реакторах. Германій та кремній на сьогодні є базовими матеріалами мікро- та наноелектроніки [9-13]. Огляд сучасних робіт показує, що науковці прийшли до висновку щодо заміни кремнію на германій, оскільки він має більшу рухливість носіїв струму, та створені на основі нього, наприклад, МОН-транзистори матимуть більшу швидкодію [10, 14-16]. Тому актуальним щодо пошуку умов, за який забезпечується радіаційна стійкість германію та приладів, виготовлених на його основі, є вивчення впливу іонізуючого випромінювання на електричні властивості даного матеріалу, зокрема питомий опір.

Мета та основні завдання роботи. Метою дослідження є встановлення зв'язку між радіаційною стійкістю монокристалів германію та величиною потоком електронного опромінення. Для досягнення даної мети необхідним є вирішення наступних задач:

1. Провести дослідження електропровідності та визначити питомий опір опромінених електронами монокристалів n-Ge для різних температур та потоків опромінення.

2. Встановити вплив дефектної структури, створеної радіаційними дефектами, контрольованими та неконтрольованими домішками, на радіаційну стійкість досліджуваних монокристалів n-Ge.

Результати та їх обговорення. Нами досліджувались залежності питомого опору монокристалів n-Ge, вирощених за методом Чохральського та легованих домішкою сурми, концентрацією $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, від потоку електронного опромінення з енергією 10 MeV. Опромінювання зразків германію потоками електронів від $5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$ до $5 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ проводилося на мікротроні М-30, у відділі фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України (м. Ужгород). Параметри мікротрона дозволяють формувати пучки прискорених електронів з енергіями в діапазоні 1–25 MeV із моноенергетичністю 0,02% та струмом до 50 мкА. На рис. 1 та рис. 2 представлено результати вимірювань температурних залежностей питомого опору n-Ge від потоку опромінення електронами. Як слідує з даних рисунків, всі залежності $\rho = f(\Phi)$ характерним мають максимум, величина якого зменшується зі збільшенням температури. Також зростання температури призводить до зміщення цього максимуму в область менших потоків електронного опромінення.

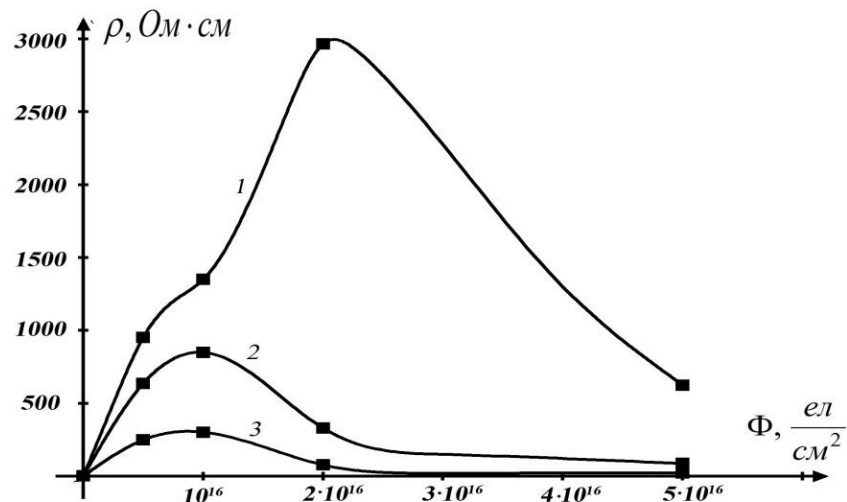


Рисунок 1 – Залежності питомого опору n-Ge від потоку електронного опромінення для різних температур T, К: 1 – 200; 2 – 225; 3 – 250.

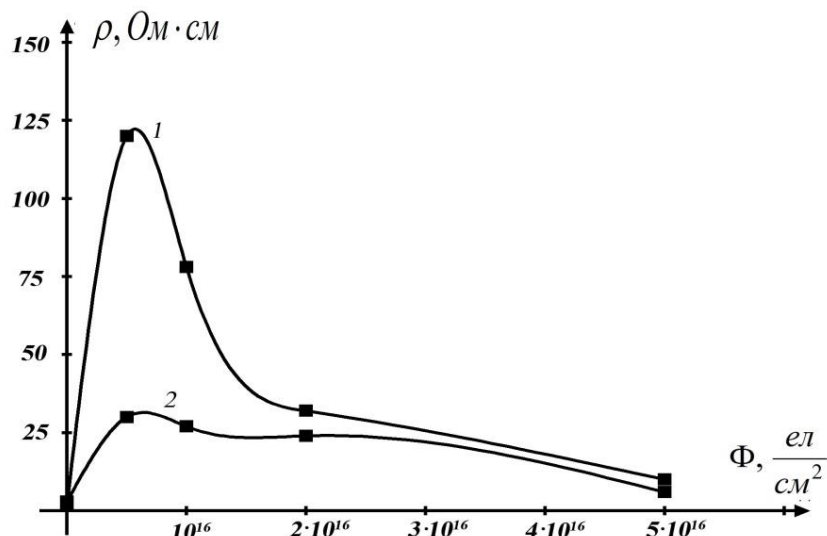


Рисунок 2 – Залежності питомого опору n-Ge від потоку електронного опромінення для різних температур T, К: 1 – 275; 2 – 300.

Згідно з одержаними результатами попередніх наших робіт [17-19], електронне опромінення монокристалів n-Ge призводить до утворення в їх об'ємі точкових дефектів, що належать кисневмісним комплексам $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$, а також складні дефекти – області розпорядкування. Комплекс $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ відноситься до А-центру, який модифікований двома міжвузловими атомами германію [20]. Він утворюється в монокристалах кремнію та германію з високим вмістом неконтрольованої домішки міжвузлового кисню O_i , яка вводиться в об'єм даних монокристалів при вирощуванні в атмосфері повітря. Тому ця домішка відіграє важливу роль в процесах дефектоутворення при електронному опроміненні в монокристалах n-Ge. Експериментально виявлені в роботі [21] смуги поглинання $716, 620$ та 669 см^{-1} відповідають подвійному негативному, нейтральному та негативному зарядовому стану А-центру відповідно. Комплекс $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ створює в забороненій зоні германію глибокі енергетичні рівні $E_c - 0,27 \text{ eV}$ та $E_v + 0,27 \text{ eV}$. Утворення таких комплексів дефектів при електронному опроміненні збільшує ступінь компенсації монокристалів n-Ge, що призводить до зменшення концентрації та, відповідно, зростання питомого опору германію. При цьому рухливість носіїв струму теж зменшується, оскільки утворені радіаційні дефекти є активними центрами розсіяння [17, 18]. Ступінь компенсації опромінених монокристалів n-Ge буде зменшуватись при збільшенні температури, що є основною причиною зменшення питомого опору та величини максимуму для залежностей $\rho = f(\Phi)$ рис. 1 та рис. 2. Також при збільшенні температури рухливість носіїв струму буде зростати за рахунок зменшення ролі їх розсіяння на радіаційних дефектах, що є ще однією причиною зменшення питомого опору. Як було встановлено в роботі [19], при потоках $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ германій за рахунок накопичення в його об'ємі значної концентрації комплексів $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ конвертував у р-тип. Це призвело до зростання концентрації носіїв струму та значного зменшення, як слідує з рис. 1 та рис. 2, питомого опору германію для таких потоків опромінення.

Висновки. Встановлено, що питомий опір n-Ge зростає при збільшенні потоку електронного опромінення, особливо при низьких температур та до n-p-конверсії типу його провідності. Це пояснюється двома причинами: 1) збільшенням ступеня компенсації опромінених монокристалів германію, що призводить до значного зменшення концентрації електронів провідності; 2) зростанням ролі розсіяння електронів на утворених радіаційних дефектах, що впливає на зменшення рухливості електронів.

1. Встановлено, що при потоках $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ спостерігається значне зменшення питомого опору германію при переході через максимум, що пояснюється зростанням концентрації носіїв струму внаслідок n-p-конверсії. Для області кімнатної температури питомий опір n-Ge практично не змінився при опроміненні такими потоками електронів.

2. Проведений аналіз залежностей $\rho = f(\Phi)$ показує, що найбільшу радіаційну стійкість мають монокристали германію, які опромінювались або малими, кратно меншими за $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$, або $\Phi > 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ потоками електронів.

3. Проведені дослідження радіаційної стійкості монокристалів n-Ge до дії електронного опромінення необхідно враховувати при експлуатації електронних приладів та сенсорів, виготовлених на основі германію, в умовах ядерних випромінювань (автоматика ядерних реакторів, атомних електростанцій, прискорювачів ядерних частинок, космічних апаратів).

Інформаційні джерела

1. Comprehensive nuclear materials / R. Konings, R. E. Stoller. 2020. Elsevier; 2nd edition. 4868 p.
2. Malerba L., Mazouzi Al, Bertolus A., Cologna M., Efsing P., Jianu A., Tarantino M. (2022). Materials for sustainable nuclear energy: a European strategic research and innovation agenda for all reactor generations. 2022. *Energies*. Vol. 15(5). P. 1845.
3. Meschini S., Laviano F., Ledda F., Pettinari D., Testoni R., Torsello D., Panella B. Review of commercial nuclear fusion projects. 2023. *Frontiers in Energy Research*. Vol. 11. P. 1157394.
4. Bolshakova I., Holyaka R., Marusenkova T., Shurygin F. Radiation-resistant Hall Magnetic Field Sensors and Instrumentations: monograph / Primedia eLaunch LLC, 2023. 148 p.
5. Janioud P., Poulain C., Koumela A., Armani J. M., Dupret A., Rey P., Morfouli P. (2020). Effects of gamma radiation on suspended silicon nanogauges bridge used for MEMS transduction. 2020. *Microelectronics Reliability*. Vol. 114. P. 113736.

6. Lynes D.D., Chandrahali H., Bevins J. E., Petrosky J. C. Effects of gamma ray radiation on the performance of microelectromechanical resonators. *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25, P. 2201837.
7. Tilli M., Paulasto-Kröckel M., Petzold M., Theuss H., Motooka T., Lindroos V. (Eds.). Handbook of silicon based MEMS materials and technologies / Elsevier, 2020. 1026 p.
8. Su Y., Ye Y. The Review of Types of Radiation Resistance Materials and Proposed Experiments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2386, No. 1, p. 012090.
9. Chen S., Zhang Y., Hong X., Li J. Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems: A brief review. *Journal of Semiconductors*. 2022. Vol. 43. P. 081301.
10. Zhao F., Feng Y., Feng W. Germanium-based monoelemental and binary two-dimensional materials: Theoretical and experimental investigations and promising applications. *InfoMat*. 2022. Vol. 4, P. 1-82.
11. Patel M., Karamalidis A. K. Germanium: A review of its US demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 275. P. 118981.
12. Luniov S. V., Lyshuk V. V., Maslyuk V. T., Burban O. V. Mechanisms of electron scattering in uniaxially deformed silicon single crystals with radiation defects. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol. 56. P. 45–57.
13. Jaikissoon M., Köroğlu Ç., Yang J. A., Neilson K. M., Saraswat K. C., Pop E. CMOS-compatible strain engineering for high-performance monolayer semiconductor transistors, 2024. P. 885-891 (arXiv preprint arXiv:2405.09792).
14. Krishna C. Saraswat. Germanium in 75th Anniversary of the Transistor. *IEEE*, 2023. P. 415–429.
15. Luniov S.V., Burban O.V., Nazarchuk P.F. Calculation of the Electron Mobility for the Δ_1 -Model of the Conduction Band of Germanium Single Crystals. *Semiconductors*. 2014. Vol. 48, №4. P. 438–441.
16. Luniov S.V., Burban O.V., Nazarchuk P.F. Electron scattering in the Δ_1 -model of the conduction band of germanium crystals. *Semiconductors*. 2015. Vol. 49, №5. P. 574–578.
17. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge. *Journal of Physical Studies*. 2015. Vol. 19, №4. P. 4704.
18. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2016. Vol. 171, Issue 11–12. P. 855–868.
19. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. Radiation defects parameters determination in n-Ge single crystals irradiated by high-energy electrons. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2016. Vol. 17, Issue 1. P. 47–52.
20. Dolgolenko A. P. Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2013. Vol. 14. P. 377–383.
21. Markevich V. P., Litvinov V. V., Dobaczewski L. et al. Vacancy-oxygen complex in Ge crystals. *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 340. P. 844–848.

Luniov S.

Lutsk National Technical University

RADIATION STABILITY OF ELECTRON-IRRADIATED n-Ge SINGLE CRYSTALS

The dependences of the resistivity on the electron irradiation flow with the energy of 10 MeV for germanium single crystals, doped by the antimony at different temperatures were investigated. All the obtained dependences are characterized by the presence of a maximum, which is associated with the maximum degree of compensation of the irradiated n-Ge single crystals and the most effective scattering of electrons on the created radiation defects for a certain irradiation flow. It was established that the resistivity of n-Ge decreases due to the ionization of deep levels of radiation defects and an increase in the mobility of current carriers with increasing temperature. A Significant decrease in the resistivity of germanium is observed when passing through the maximum for the flows of $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16}$ el./cm², which is explained by an increase in the concentration of current carriers due to the n-p-conversion of the conductivity type of germanium. The highest radiation resistance to electron irradiation is possessed by n-Ge single crystals, irradiated by multiple smaller electron flows than

$\Phi=5\cdot10^{15}$ el./cm² or flows of $\Phi>2\cdot10^{16}$ el./cm². The obtained results are important in the design and operation of electronic devices and sensors made on the basis of germanium that operate in fields of increased radiation.

Key words: n-Ge single crystals, electron irradiation, resistivity, radiation defects, radiation resistance, degree of compensation.

УДК 621.382

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-10

Мазур К. С.

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОГЛИНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

У даній роботі запропоновано математичну модель багатошарового мікрохвильового поглинального покриття та проведено аналіз його основних характеристик. Визначено теоретичну залежність коефіцієнту відбивання від основних характеристик матеріалу. Досліджено вплив діелектричної та магнітної проникностей на коефіцієнт відбиття запропонованої системи, а також визначено оптимальні параметри системи для ефективного поглинання електромагнітних хвиль у діапазоні 2–18 ГГц. Проаналізовано механізм поглинання електромагнітної енергії в діелектричному матеріалі в заданому частотному діапазоні. Побудовано та проаналізовано залежності комплексних діелектричної та магнітної проникностей модельного матеріалу. Побудовано залежності коефіцієнту відбивання системи вакуум-матеріал-ідеальний провідник. Аналіз експериментальних досліджень виявив потенційно перспективні композитні матеріали, зокрема графенову піну (CGF), що демонструє високий рівень поглинання. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення складу та механічних властивостей таких матеріалів.

Ключові слова: мікрохвильовий поглинальний матеріал, коефіцієнт відбиття, математична модель, комплексна діелектрична проникність, комплексна магнітна проникність, графен

Постановка проблеми. Протягом останніх десятиліть можна спостерігати, що кількість прикладів застосування пристроїв мікрохвильового діапазону невпинно зростає. Цей стрімкий розвиток приводить до значущості проблеми захисту від електромагнітного випромінювання. Саме мікрохвильові поглинальні матеріали відіграють ключову роль для різноманітних застосувань: для створення антен, радарів, систем зв'язку, систем захисту від електромагнітних перешкод, стелс-технологій для оборонних застосувань, а також захисту біологічних об'єктів від шкідливих мікрохвильових та терагерцових пристроїв.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент існує велика кількість поглинальних матеріалів. У комерційному доступі зазвичай переважають феритові пластини, завдяки високому рівню електромагнітних втрат в них. Проте вони мають дуже високу густину, тому їх застосування обмежене в легких конструкціях. Розроблено велику кількість композитних матеріалів, а також значним інтересом серед науковців протягом останніх десятиліть користуються наноструктурні матеріали. Проте, варто зазначити, що ці матеріали мають хоча б один із трьох недоліків:

- недостатня ефективність в широкому діапазоні частот [1];
- значна маса/об'єм матеріалу [2];
- висока вартість виготовлення через складність технологічного процесу [3].

Незважаючи на дуже значний прогрес, більшість поглинальних матеріалів мікрохвильового діапазону мають обмежену ефективність у широкому частотному діапазоні або ж мають вимоги до великої товщини матеріалу. Для прикладу, найефективніші сучасні матеріали мають наступні переваги та недоліки:

- композити, у складі яких переважають ферити, мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у широкому частотному діапазоні, проте мають також високу густину [4];
- CdS-MWCNTs мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 8...14 ГГц виключно за підвищених температур (50...250 °C) [5];
- вуглецеві стільники (Carbon Honeycomb) мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 2...18 ГГц [6];
- Fe-CNTs мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 12...14 ГГц [7].

Тому актуальною є проблема знаходження нових підходів для розробки матеріалів з покращеними характеристиками. У даній статті запропоновано математичну модель мікрохвильового поглинального покриття, проаналізовано, якими мають бути діелектричні та магнітні характеристики цього матеріалу, та проаналізовано деякі матеріали, що можуть бути використані для створення нового матеріалу мікрохвильового поглинального покриття.

Мета роботи. Створення математичної моделі мікрохвильового поглинального матеріалу та оцінка можливості її реалізації.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо систему, схематично зображену на рисунку 1.

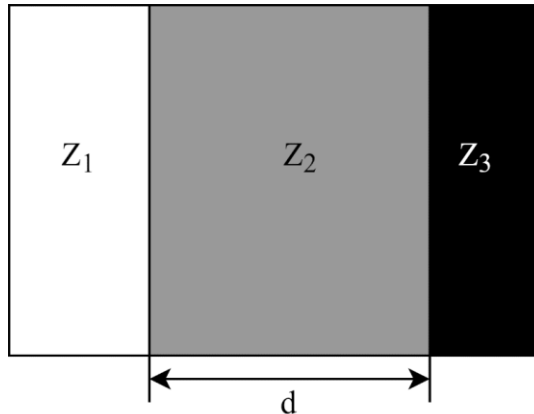


Рисунок 1 – Схема одношарового покриття

На металічну поверхню з імпедансом $Z_3 = 0$ нанесено шар поглинального матеріалу з імпедансом $Z_2 = Z_{in}$. Утворений зразок поміщено в середовище (повітря) з імпедансом $Z_1 = Z_0 = 377 \text{ Ом}$.

Відповідно до теорії довгих ліній, коефіцієнт відбиття такого поглинального матеріалу визначається як коефіцієнт відбиття лінії [8]:

$$R = 20 \lg \left(\left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \right), \quad (1)$$

де Z_{in} – імпеданс входу системи метал–поглинальний матеріал, Z_0 – імпеданс повітря.

Визначимо вхідний опір поглинального матеріалу [9]:

$$Z_{in} = Z_w \frac{(Z_w \operatorname{th}(\gamma d) + Z_{load})}{Z_w + Z_{load} \operatorname{th}(\gamma d)}, \quad (2)$$

де Z_w – імпеданс сегменту лінії, γ – стала поглинання лінії, що визначається як [9]

$$\gamma = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*}. \quad (3)$$

Врахувавши, що для металу $Z_{load} = Z_3$, отримуємо:

$$Z_{in} = Z_w \operatorname{th}(\gamma d). \quad (4)$$

Оскільки $Z_w = Z_0 \sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}}$ [8], маємо:

$$R = 20 \lg \left(\left| \frac{\sqrt{\mu^*} \operatorname{th}(\gamma d) - \sqrt{\varepsilon^*}}{\sqrt{\mu^*} \operatorname{th}(\gamma d) + \sqrt{\varepsilon^*}} \right| \right). \quad (5)$$

Врахувавши вираз (3), маємо загальну формулу для коефіцієнту відбиття:

$$R = 20 \lg \left(\frac{\left| \sqrt{\mu^*} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \right) - \sqrt{\varepsilon^*} \right|}{\left| \sqrt{\mu^*} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \right) + \sqrt{\varepsilon^*} \right|} \right). \quad (6)$$

Отже, коефіцієнт відбиття є функцією, що залежить від комплексних діелектричної та магнітної проникностей поглинального матеріалу, частоти, а також товщини матеріалу. Діелектрична та магнітна проникності є функціями частоти:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (7)$$

$$\mu^*(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega). \quad (8)$$

Підставивши вирази (7) та (8) у рівняння (6), отримуємо остаточну формулу:

$$R = 20 \lg \left(\frac{\left| \sqrt{\mu^*(\omega)} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^*(\omega) \mu^*(\omega)} \right) - \sqrt{\varepsilon^*(\omega)} \right|}{\left| \sqrt{\mu^*(\omega)} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^*(\omega) \mu^*(\omega)} \right) + \sqrt{\varepsilon^*(\omega)} \right|} \right). \quad (9)$$

Враховуючи попередню формулу (9), можна прийти до висновку, що задача моделювання мікрохвильового поглинального матеріалу зводиться до задачі із визначення частотних залежностей діелектричної (7) та магнітної (8) проникностей матеріалу. Перед тим як моделювати характеристики діелектричного матеріалу слід сформулювати вимоги до цього матеріалу:

1. Для практичного застосування поглинального матеріалу, його шар має бути тонким. Літературний огляд [10] показує, що сучасні поглинальні матеріали мають проектуватися за максимальної товщини матеріалу в 2 мм;

2. Оскільки більшість прикладних застосувань сьогодення охоплюють частотні діапазони S, C, X, Ku [11] то частотний діапазон визначимо на рівні 2...18 ГГц;

3. Вимоги до поглинальних властивостей матеріалу. Матеріал повинен мати мінімальне відбиття – максимальне поглинання. Літературний огляд [12] показує, що матеріал можна використовувати як поглинальний, коли коефіцієнт відбиття встановлюється на рівні нижче – 10 дБ.

Для моделювання діелектричних залежностей матеріалу слід проаналізувати механізми втрат у діелектрику. Існує три основних механізми діелектричних втрат [8]:

1. Безінерційна електропровідність;
2. Теплова поляризація (модель релаксатора);
3. Пружна поляризація (модель осцилятора).

Зазвичай матеріали, які використовуються для поглинальних мікрохвильових покриттів, є релаксаторами. Це пояснюється тим, що в мікрохвильовому діапазоні безінерційна електропровідність не спостерігається – цей механізм втрат діє в значно нижчому частотному діапазоні. Механізм пружної поляризації є резонансним – такі матеріали є ефективними під час проектування вузькосмугових загороджувальних фільтрів через різкий спад діелектричної проникності за частот, близьких до резонансної. Цей механізм працює на частотах, що є вищими ніж розглядаються в даній статті. Тому для побудови моделі скористаємось механізмом теплової поляризації (модель релаксатора). У такому випадку комплексна діелектрична проникність описується наступними формулами:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon'(\infty) + \frac{\varepsilon'(0) - \varepsilon'(\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon''(0) - \varepsilon''(\infty)) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (11)$$

Для моделювання оберемо матеріал з невисоким значенням діелектричної проникності (2...10) в мікрохвильовому діапазоні, оскільки за високих значень діелектричної проникності для зменшення коефіцієнту відбивання (виходячи з формули коефіцієнту відбивання) матеріал повинен мати високе значення і магнітної проникності, що важко досягти. Також під ці параметри підходить велика кількість діелектричних матеріалів, що полегшить задачу з реалізації такого матеріалу в майбутніх дослідженнях.

У результаті моделювання, прийнявши $\varepsilon'(0)=9$, $\varepsilon'(\infty)=2.5$, $\tau=8 \cdot 10^{-10}$ с отримано наступні залежності:

$$\varepsilon'(\omega) = 2.5 + \frac{6.5}{1 + 1.5 \cdot 10^{-16} \omega^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{8 \cdot 10^{-10} \omega}{1 + 1.5 \cdot 10^{-16} \omega^2} \quad (13)$$

Графіки побудованих залежностей зображено на рисунку 2.

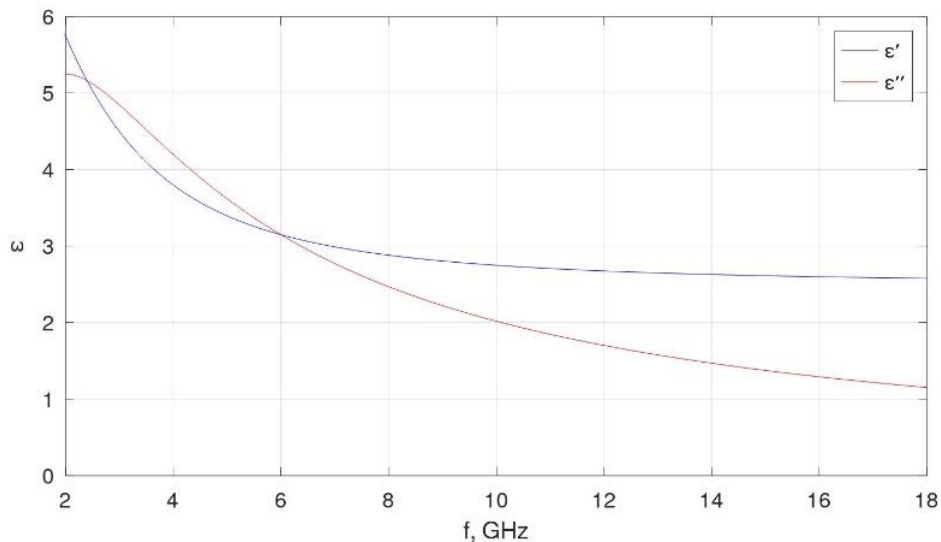


Рисунок 2 – Залежності дійсної (синя лінія) та уявної (червона лінія) частин комплексної діелектричної проникності

Якщо у випадку діелектричної проникності існує декілька основних механізмів поляризації, що можна описати математичними залежностями, то у випадку магнітних характеристик загальну формулу, що визначає частотну залежність магнітної проникності матеріалу, досить важко визначити [8].

Аналіз різних експериментальних досліджень [13,14,15] показує що матеріали зазвичай мають або стабільно низьку магнітну проникність без дисперсії, або ж мають магнітну дисперсію, що має спадний характер (явище ФМР не розглядаємо, оскільки ФМР зазвичай проявляється в феромагнетиках високої густини, що суттєво збільшують масу композитного матеріалу, а самі феромагнетики мають низьку діелектричну проникність).

З огляду на вищезгадане, скористаємось також гіперболічними залежностями для дійсної та уявної частин магнітної проникностей:

$$\mu'(\omega) = a' + \frac{b'}{\omega}, \quad (14)$$

$$\mu''(\omega) = a'' + \frac{b''}{\omega}, \quad (15)$$

де a', b', a'', b'' – сталі величини.

Для того щоб отримати коефіцієнт відбивання менше 10дБ, з урахуванням виразів (12) та (13) залежності дійсної та уявної частин комплексної магнітної проникності повинні мати вигляд:

$$\mu'(\omega) = 1 + \frac{3 \cdot 10^{10}}{\omega}, \quad (16)$$

$$\mu''(\omega) = \frac{10^{11}}{\omega}. \quad (17)$$

Графіки побудованих залежностей зображено на рисунку 3.

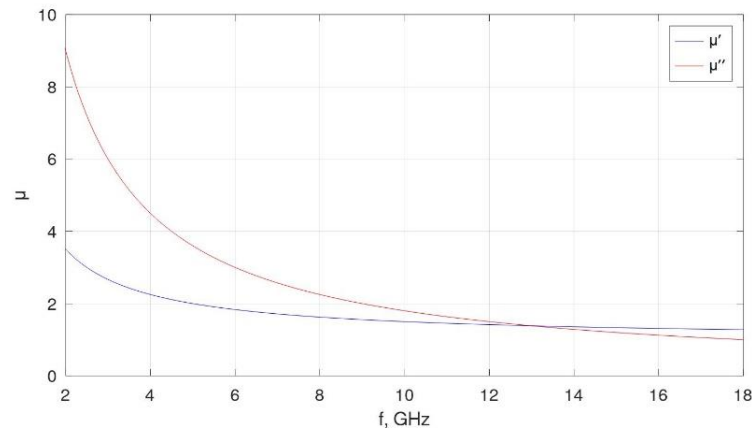


Рисунок 3 – Залежності дійсної (синя лінія) та уявної (червона лінія) частин комплексної магнітної проникності

Використовуючи формулу (9), змодельємо коефіцієнт відбиття отриманого матеріалу (рис. 4):

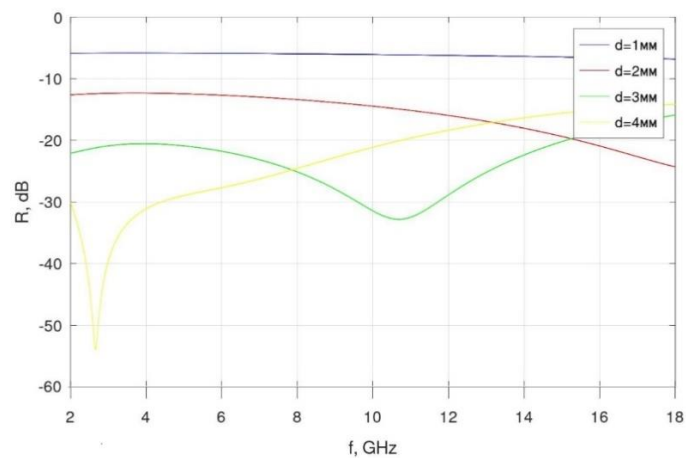


Рисунок 4 – Коефіцієнти відбиття змодельованого матеріалу для різних товщин матеріалу

Отримані результати моделювання (рис. 4) показують, що за прийнятих модельних значень ε та μ частотна залежність коефіцієнта відбиття відповідає поставленим умовам. Внаслідок зменшення товщини спостерігається менше затухання електромагнітної хвилі в матеріалі, що приводить до зменшення коефіцієнту поглинання і, відповідно, збільшення і коефіцієнту відбиття. За товщини матеріалу 2 мм коефіцієнт відбиття перебуває на рівні нижче -10 дБ, що відповідає вимогам мікрохвильового поглинального матеріалу.

На основі отриманої моделі було проаналізовано експериментальні дослідження на наявність матеріалів, що потенційно можуть задовольняти дану модель за характеристиками діелектричної/магнітної проникностей. Слід зауважити, що магнітна проникність має сягати доволі високих значень, що можливо за наявності феромагнітних матеріалів в композиті. Зокрема, у статті [16] проаналізовано матеріал на основі Со, С та парафіну, що демонструє багатообіцяючі результати (коефіцієнт відбиття менше -10 дБ) – проте парафін не є надійним матеріалом для покриття, а заміна парафіну епоксидною смолою призвела до суттєвих погіршень характеристик. Також слід зазначити, що магнітна проникність цього матеріалу має дуже низькі значення за високих значень діелектричної проникності, що не відповідає запропонованій моделі.

У статті [17] проаналізовано CGF – матеріал на основі графену, що відповідає запропонованим значенням діелектричної проникності (2...10) в мікрохвильовому діапазоні, а також має високий рівень діелектричних втрат ($\tan \delta$ сягає 1,3). У статті не наведено значень магнітної проникності матеріалу, проте матеріал CG7F-400 показує значення коефіцієнту відбиття $-40...-10$ дБ у діапазоні частот 2...18 ГГц, що може відповідати запропонованій моделі. На рисунках 5–8 наведені порівняльні графіки змодельованих і реальних значень дійсних/уявних частин комплексних діелектричної та магнітної проникностей :

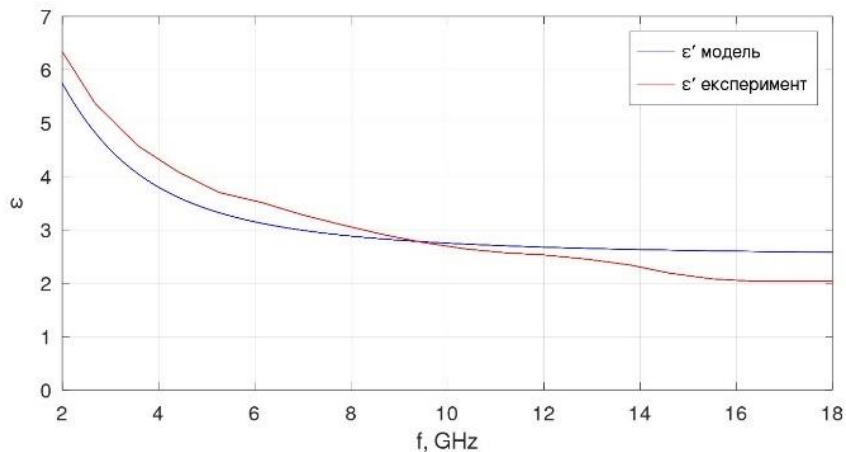


Рисунок 5 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) дійсних частин комплексної діелектричної проникності

Графіки показують, що моделі дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності мають дуже близькі значення. У випадках магнітної проникності значення дійсної частини дуже схоже до значення моделі, проте уявна частина (експеримент) свідчить про те, що мають місце піки поглинання за частот близьких до 6 та 11 ГГц. Це означає, що модель комплексної частини магнітної проникності потребує врахування додаткових факторів.

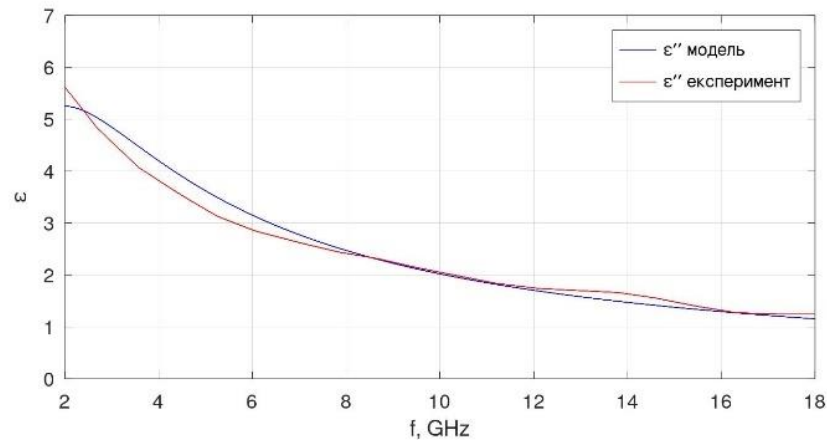


Рисунок 6 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) уявних частин комплексної діелектричної проникності

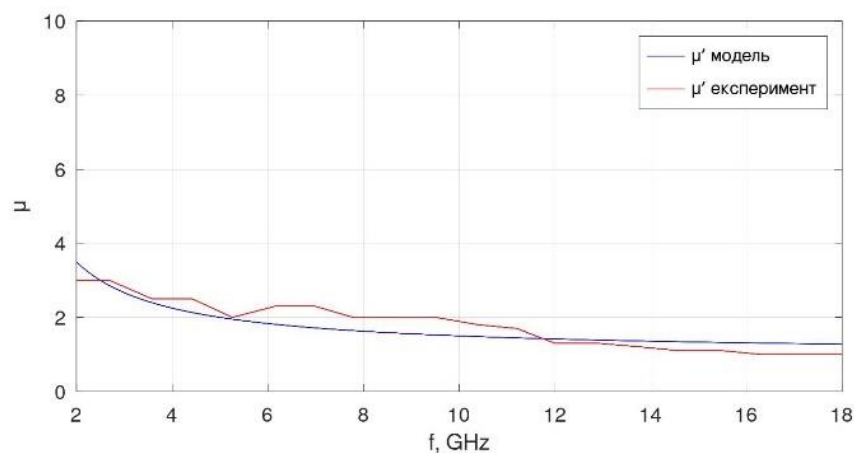


Рисунок 7 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) дійсних частин комплексної магнітної проникності

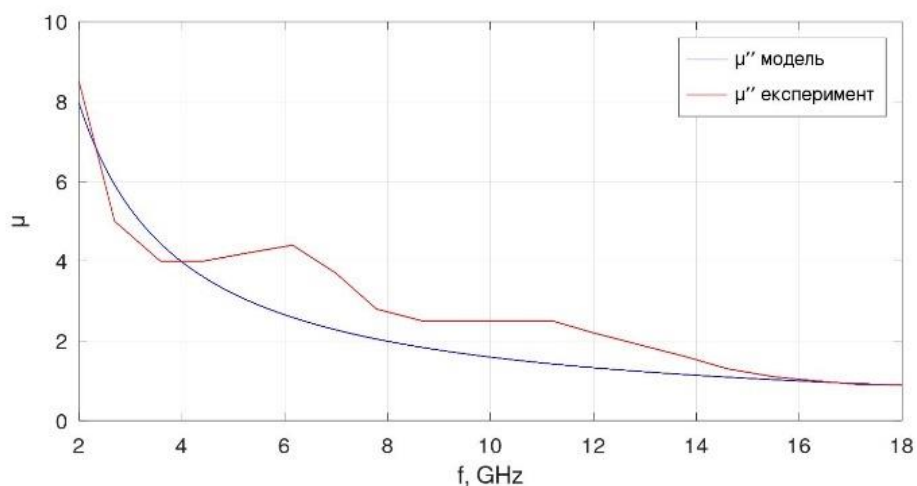


Рисунок 8 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) уявних частин комплексної магнітної проникності

Враховуючи, що матеріал є крихким, а додавання епоксидної смоли (як у попередньому проаналізованому варіанті) може призвести до погіршення частотних характеристик або ж порушення структури матеріалу, модель потребує доопрацювань з урахуванням другого шару матеріалу, що гарантував би міцність структури за мінімальної товщини та маси. Також відкритим залишається питання, чому графенова

піна має такий високий рівень магнітних втрат за немагнітних властивостей карбону? Автор пояснює це еквівалентною індуктивністю утвореної пористої структури матеріалу, що може свідчити про індуктивні можливості й інших пористих матеріалів.

Висновки. У даній роботі було запропоновано математичну модель мікрохвильового поглинального покриття та проведено аналіз основних характеристик, що впливають на його ефективність. На основі отриманих розрахунків було встановлено, що коефіцієнт відбиття матеріалу визначається комплексними діелектричною та магнітною проникностями, частотою електромагнітної хвилі та товщиною шару. В досліджуваному діапазоні частот 2...18 ГГц дійсна частина комплексної діелектричної проникності має варіюватися в межах 6...2,5, уявна частина – 5...1. Дійсна частина магнітної проникності має бути в межах 4...1, уявна – 9...1. Аналіз експериментальних досліджень показав, що потенційно перспективними матеріалами для реалізації запропонованої моделі є композитні матеріали на основі графенової піни (CGF). Вони демонструють високий рівень поглинання електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот, проте мають обмеження у вигляді крихкості та можливого погіршення характеристик за додавання зв'язувальних компонентів. Також були розглянуті матеріали на основі Со, С та парафіну, які показали багатообіцяючі результати, однак їх використання також обмежене через недостатню механічну стабільність. Загалом, результати дослідження підтвердили актуальність розробки нових підходів до створення ефективних мікрохвильових поглинальних матеріалів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію складу композитних матеріалів та пошук альтернативних зв'язувальних компонентів, що не погіршують поглинальні характеристики матеріалу.

Інформаційні джерела

1. Elmahaishi M. F., Azis R. S., Ismail I., Muhammad F. D. A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 2188–2220.
2. Houbi A., Zharmenov A. A., Yomen A., Bagasharova Z. T., Mirzalieva S., Kadyrakunov K. Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 529, No 167839.
3. Sahoo P., Saini L., Dixit A. Microwave-absorbing materials for stealth application: a holistic overview. *Oxford Open Materials Science*. 2023. Vol. 3, No 1. P. 1–4.
4. Baoji Miao et al. Scalable synthesis of 2D Ti₂CTx MXene and molybdenum disulfide composites with excellent microwave absorbing performance. *Advanced Composite Materials*. 2023. Vol. 61, No 42114.
5. Lu, M., Wang, X., Cao, W., Yuan, J., Cao, M. Carbon nanotube-CdS core-shell nanowires with tunable and high-efficiency microwave absorption at elevated temperature. *Nanotechnology*, 2015, 27(6), 065702. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/6/065702>
6. Khurram A., Naveed A., Rakha S., Peiheng Z., Arshad M. Optimization of the Carbon Coating of Honeycomb Cores for Broadband Microwave Absorption. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56, No. 5. P. 1061-1066..
7. W.Q. Guo et al. Highly-improved microwave absorption performance of LaFeO₃/Fe@CNTs nanocomposites through in-situ synthesis of Fe@CNTs. *Ceramics International*. 2025. Vol. 51, No 1. P. 764-776.
8. Дробахін О. О., Гнатушенко В. В., Рябчій В. Д., Салтиков Д. Ю. Основи теорії мікрохвильових кіл : навч. посіб. Дніпро : РВВ ДНУ, 2011. 76 с.
9. Поплавко Ю. М., Воронов С. О., Якименко Ю. І. Фізичне матеріалознавство Ч. 3. Провідники та магнетики: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 372 с.
10. Didenko Y., Orlov A., D. Tatarchuk and Y. Poplavko. Fundamental Limitations in the Properties of Microwave Protective Component // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) materials, Kyiv, Ukraine, May 13-16 2024, P. 56-61.
11. Cheng Y., Wang W., Cao Y., Wang H. Graphene-Based Materials toward Microwave and Terahertz Absorbing Stealth Technologies. *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7, No. 8(1801318).
12. Didenko Y., Orlov A., D. Tatarchuk and Y. Poplavko. Metamaterials for Microwave Absorption and Reflection Control // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) materials, Kyiv, Ukraine, May 13-16 2024, P. 1-6.

13. Liang Y.-J., Zhang L., Chen M., Fan L., Liao W., Xun Y., Fu L. Anisotropic shaped Fe_3O_4 nanoparticles: Microwave-assisted thermal decomposition synthesis and their electromagnetic properties. AIP Advances. 2020. Vol. 10, No. 8(085208).
14. Folgueras L. C., Alves M. A. and Rezende M. C. Dielectric properties of microwave absorbing sheets produced with silicone and polyaniline. Materials Research. 2010. Vol. 13. No. 2. P. 211-218.
15. Feng W. et al. Ti_3C_2 MXene: a promising microwave absorbing material. RSC Advances. 2018. Vol. 8, No. 5. P. 2398–2403.
16. Y. Wang, Y. Wu, Y. Zhang, Y. Yan, and X. Wang. Graphene/carbon nanotube/polyaniline ternary nanocomposite with excellent electromagnetic absorption properties. Carbon. 2014. Vol. 79. P. 94–101.
17. Chen H, et al. Synergistically assembled MWCNT/graphene foam with highly efficient microwave absorption in both C and X bands. Carbon. 2017. Vol. 124. P. 506-514.

Mazur K.

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

MATHEMATICAL MODEL OF A MICROWAVE ABSORBING MATERIAL

In this paper, a mathematical model of a multilayer microwave absorbing coating is proposed, and an analysis of its main characteristics is carried out. The theoretical dependence of the reflection coefficient on the main material characteristics has been determined. The influence of dielectric and magnetic permeabilities on the reflection coefficient of the proposed system has been studied, and optimal system parameters for effective absorption of electromagnetic waves in the frequency range of 2–18 GHz have been identified. The mechanism of electromagnetic energy absorption in a dielectric material within the specified frequency range has been analyzed. Dependencies of the complex dielectric and magnetic permeabilities of the model material have been constructed and analyzed. Reflection coefficient dependencies of the vacuum-material-ideal conductor system have been constructed. The analysis of experimental studies revealed potentially promising composite materials, in particular, graphene foam (CGF), which demonstrates a high level of absorption. Further research should focus on improving the composition and mechanical properties of such materials.

Keywords: microwave absorbing material, reflection coefficient, mathematical model, complex dielectric permittivity, complex magnetic permeability, graphene.

УДК 004.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-11

Сахнюк І. О., Федосєєва І. К., Битков М. Х.

Технічний центр Національної академії наук України

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ПЕВНИХ ПОЛОЖЕНЬ У СФЕРІ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглянуто та проаналізовано міжнародну нормативну базу стандартів Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) і Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), пов'язаних із технологією AI, яка налічує майже 400 стандартів. Зосереджено увагу на декількох ключових стандартах штучного інтелекту, що забезпечують основу для відповідального та етичного використання технологій штучного інтелекту. Наведено огляд сфери їхнього застосування. Зазначені у статті стандарти охоплюють такі сфери, як: термінологія та поняття штучного інтелекту; система управління; управління ризиками; конфіденційність; упередженість; прозорість; підзвітність тощо. Дотримуючись цих стандартів, організації можуть працювати над тим, щоб їхні системи штучного інтелекту були справедливими, прозорими та дотримувалися етичних принципів.

На основі проведеного аналізування показано, що штучний інтелект все частіше застосовується в усіх секторах, які використовують інформаційні технології. Беручи це до уваги, запропоновано включати до щорічних програм робіт із національної стандартизації прийняття та/або розроблення згармонізованих стандартів ISO та IEC штучного інтелекту.

Ключові слова: інформаційні технології, штучний інтелект, стандарт, система управління, структура систем штучного інтелекту.

Постановка проблеми. Сприятливою умовою з розроблення продукції і послуг та освоєння ринків збуту є впровадження згармонізованих міжнародних і європейських стандартів. Стандарти забезпечують технологіям, продукції і послугам сумісність, оскільки стандарт містить детальну інформацію про використання та їхній зміст. Застосування стандартів надає перевагу інноваційним технологіям у науці та презумпцію відповідності у виробництві, машинобудуванні, приладобудуванні, бізнесі тощо. Існує потреба в забезпеченні дослідників відповідними інструментами для допомоги в розроблянні та застосуванні інформаційних технологій, зокрема технології штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI), і в цьому випадку стандартизація як інструмент передачі знань відіграє важливу роль.

У 2021 році наказом Національного органу стандартизації - ДП «УкрНДНЦ» «Про створення технічного комітету стандартизації «Штучний інтелект» від 10.11.2021 № 416 був створений технічний комітет стандартизації ТК 200 з відповідною назвою «Штучний інтелект». Організацією, що виконує функції секретаріату ТК 200, визнано Міністерство цифрової трансформації України. Попри те, до сьогодні залишається невирішеною проблема щодо наявної чинної нормативної бази з питань технології штучного інтелекту. Для єдиного розуміння цієї технології та визначення ключових термінів, ризиків та переваг щодо застосування штучного інтелекту доречно прийняти в Україні відповідні міжнародні стандарти ISO/IEC, ISO/IEC TR, ISO/IEC TS як національні методом перекладу.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні розкриття потенціалу технології штучного інтелекту безперервно вдосконалюється. Розробникам та користувачам штучного інтелекту потрібно адаптуватися до цих змін, зосередившись на різних способах. Тут постає питання, як розумно використовувати весь потенціал можливостей штучного інтелекту, не стаючи жертвою ризиків? Відокремити можливості та ризики можна лише за умови надійного управління. Ось чому важливо ознайомитися з системою управління штучним інтелектом, що викладена у першому у світі стандарті ISO/IEC 42001:2023 Information technology - Artificial intelligence - Management system (Інформаційні технології - Штучний інтелект - Система управління), та який закладає основу для етичного, безпечного та перспективного використання технології штучного інтелекту в різних сферах його застосування [1].

Окремо важливо зазначити, що 1 серпня 2024 року набув чинності Європейський закон про штучний інтелект [2]. Цей закон є першим у світі всеосяжним нормативно-правовим актом щодо штучного інтелекту. Закон про штучний інтелект покликаний гарантувати, що штучний інтелект, розроблений і використовуваний в ЄС, заслуговує довіри з гарантіями захисту основних прав людей. Регламент спрямований на створення гармонізованого внутрішнього

ринку штучного інтелекту в ЄС, заохочення впровадження цієї технології та створення сприятливого середовища для інновацій та інвестицій.

Мета роботи та постановка проблеми полягає в тому, щоб звернути увагу наукової спільноти на важливість послідовного використання та більш чіткого розуміння технології штучного інтелекту через стандартизацію. Під час розроблення або комерціалізації відповідних застосувань використання згармонізованих міжнародних та європейських стандартів у сфері штучного інтелекту на національному рівні сприятиме однаковому розумінню, презумпції відповідності та послідовному впровадженню технології штучного інтелекту.

Викладання основного матеріалу. За своєю суттю штучний інтелект означає здатність машини або комп'ютерної системи виконувати завдання, які зазвичай вимагають людського інтелекту. Вона передбачає програмування систем для аналізу даних, навчання на досвіді та прийняття розумних рішень – керуючись людським внеском. Штучний інтелект має потенціал революціонізувати різні галузі, дозволяючи машинам вирішувати складні проблеми та мислити інтуїтивно, виходячи за рамки простої автоматизації. Це охоплює різні підгалузі та технології, такі як машинне навчання та обробка природної мови.

Машинне навчання (Machine Learning, ML) відноситься до здатності комп'ютерної системи навчатися на основі даних без явного програмування. Усе починається з даних. Алгоритми ML навчаються на величезних наборах даних, які вони вчаться аналізувати, щоб виявляти закономірності, взаємозв'язки та тенденції. Ці закономірності потім можуть бути використані для прогнозування або прийняття рішень на основі нових, невидимих даних. Машинне навчання має надзвичайні переваги та застосування в нашому повсякденному житті. Іноді використовуються машинне та глибоке навчання як синоніми, але є різниця. Глибоке навчання – це різновид машинного навчання. Однак глибоке навчання може аналізувати більше типів інформації, виконувати складніші операції, робити більш тонкі та глибокі прогнози на основі даних тощо.

У стандарті ISO/IEC 23053:2022 Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems Using Machine Learning (ML) (Структура систем штучного інтелекту (AI) з використанням машинного навчання (ML)) встановлюється структура штучного інтелекту (AI) і машинного навчання (ML) для опису загальної системи AI з використанням технології ML [3]. ML - це царина AI, яка використовує обчислювальні методи, щоб дозволити системам навчатися на основі даних або досвіду. Іншими словами, системи ML розробляються за допомогою оптимізації алгоритмів, щоб відповідати навчальним даним, або покращують їхню продуктивність на основі максимізації винагороди. Методи ML включають глибоке навчання, яке також розглядається в цьому документі. Структура описує компоненти системи та їхні функції в системі AI. Цей документ застосовується до організацій усіх типів і обсягів, у тому числі державних і приватних компаній, державних установ і некомерційних організацій, які впроваджують або використовують системи AI. У цьому документі використовуються такі терміни, як знання, навчання та рішення. Цей документ має на меті надати структуру для опису систем AI, які використовують машинне навчання. Встановлюючи загальну термінологію та загальний набір понять для таких систем, цей документ забезпечує основу для чіткого пояснення систем і різних визначень, які стосуються їх розробки та використання. Цей документ призначений для широкої аудиторії та забезпечує основу для інших стандартів, спрямованих на конкретні аспекти систем ML та їхні компоненти.

Обробка природної мови (Natural language processing, NLP) - це царина штучного інтелекту, яка зосереджена на тому, щоб дозволити комп'ютерам розуміти людську мову та взаємодіяти з нею. NLP включає в себе широкий спектр технологій, що дозволяють комп'ютерам розуміти структуру і значення людської мови. Він охоплює такі завдання, як розпізнавання мови, розуміння природної мови та генерація природної мови. Аналізуючи та інтерпретуючи мову, NLP дозволяє комп'ютерам отримувати корисну інформацію, відповідати на запитання та вести бесіди. Завдяки здатності синтезувати, аналізувати та діяти з величезними обсягами даних за лічені секунди, штучний інтелект є надзвичайно потужним. Як і у випадку з будь-якою потужною технологією, дуже важливо впроваджувати її відповідально, щоб максимізувати її потенціал і мінімізувати негативні наслідки. Ще однією з ключових етичних проблем, пов'язаних зі штучним інтелектом, є конфіденційність. Оскільки системи штучного інтелекту збирають величезні обсяги даних із баз даних по всьому світу, існує потреба забезпечити захист особистої інформації та її відповідальне використання.

Технологія AI робить машини та комп'ютерні програми розумними, дозволяючи їм виконувати завдання, які зазвичай вимагають людського інтелекту. Загалом системи штучного

інтелекту працюють, обробляючи величезні обсяги даних, шукаючи закономірності, за якими можна моделювати власне прийняття рішень.

Відповідно до ISO/IEC 22989:2022 Information technology - Artificial intelligence - Artificial intelligence concepts and terminology Інформаційні технології - (Штучний інтелект - Поняття та термінологія штучного інтелекту) під штучним інтелектом мається на увазі «<дисципліна> дослідження та розробка механізмів і застосувань систем AI» [4, 3.1.3]. Система AI генерує результати, такі як вміст, прогнози, рекомендації або рішення для заданого набору цілей, визначених людиною [4, 3.1.4]. Сконструйована система може використовувати різні методи та підходи, пов'язані зі штучним інтелектом, задля розробки моделі для представлення даних, знань, процесів тощо, які можна використовувати для виконання завдань. Системи штучного інтелекту розроблені для роботи з різними рівнями автоматизації.

Оскільки можливості штучного інтелекту зростають у геометричній прогресії, виникають глибокі занепокоєння щодо конфіденційності, упередженості, нерівності, безпеки та захисту. Вивчення того, як ризики штучного інтелекту впливають на користувачів, має вирішальне значення для забезпечення відповідального та сталого розгортання цих технологій. Сьогодні, як ніколи, компаніям потрібна структура, яка б скеровувала їх на шляху до штучного інтелекту. Міжнародний стандарт ISO/IEC 42001:2023 відповідає цій потребі і містить настанови щодо управління технологіями штучного інтелекту. Він пропонує систематичний підхід до вирішення проблем, пов'язаних із впровадженням штучного інтелекту у визнану структуру системи управління, що охоплює такі сфери, як етика, підзвітність, прозорість та конфіденційність даних. Розроблений для нагляду за різними аспектами штучного інтелекту, він забезпечує інтегрований підхід до управління проектами зі штучного інтелекту, від оцінки ризиків до ефективного запобігання цим ризикам.

Як стандарт системи управління, ISO/IEC 42001 побудований на процесі встановлення, впровадження, підтримки та постійного вдосконалення штучного інтелекту. Цей підхід важливий із багатьох причин: по-перше, він гарантує, що цінність штучного інтелекту визнається і існує правильний рівень нагляду. По-друге, система управління дозволяє організації активно адаптувати свій підхід відповідно до експоненціального розвитку технології, а також заохочує організації проводити оцінку ризиків AI. Прогнозується, що зі швидким поширенням штучного інтелекту в усьому світі ISO/IEC 42001 стане невід'ємною частиною успіху організації, наслідуючи інші стандарти систем менеджменту, такі як ISO 9001 для якості, ISO 14001 для навколишнього середовища та ISO/IEC 27001 для IT-безпеки.

Що таке система управління штучним інтелектом? Система управління штучним інтелектом полягає в тому, як організація керує своїми проектами зі штучним інтелектом. Вся справа в налаштуванні правил і методів, щоб переконатися, що штучний інтелект використовується відповідально та ефективно. Ця система допомагає керувати всім, від оцінки ризиків до відповідального впровадження штучного інтелекту в дію. Структура управління штучним інтелектом має структурований спосіб управління ризиками та можливостями, пов'язаними зі штучним інтелектом. Він охоплює ключові компоненти, такі як прозорість, зрозумілість і автономність, надаючи організаціям чіткі настанови щодо використання штучного інтелекту відповідно до нових нормативних актів (наприклад, Закон ЄС про штучний інтелект). Зокрема у стандарті ISO/IEC TR 24030:2024 Information technology - Artificial intelligence (AI) - Use cases (Інформаційні технології - Штучний інтелект (AI) - Приклади використання) наведено колекцію репрезентативних випадків використання програм штучного інтелекту в різних галузях [5]. Загалом у період із липня 2018 року до кінця червня 2022 року експерти надали 187 випадків використання AI. У цьому стандарті термін «випадки використання» означає «випадки використання, вибрані з поданих». Цей документ вибрав 81 робочий випадок з усіх поданих матеріалів. За умови відповідального управління та нагляду штучний інтелект може реалізувати свій потенціал як надзвичайно позитивний технологічний розвиток.

Впровадження стандарту ISO 14001 має на меті допомогти організаціям відповідально виконувати свою роль щодо систем штучного інтелекту (наприклад, використовувати, розробляти, контролювати або надавати продукти чи послуги, які використовують штучний інтелект). Штучний інтелект потенційно викликає певні обміркування, такі як:

- використання штучного інтелекту для автоматичного прийняття рішень, іноді в непрозорий і незрозумілий спосіб, може вимагати специфічного управління, що виходить за рамки управління класичними IT-системами;

- використання аналізу даних, розуміння та машинного навчання, а не логіки, закодованої людиною, для проєктування систем, що як збільшує можливості застосування систем штучного інтелекту, так і змінює спосіб розробки, обґрунтування та розгортання таких систем;
- використання систем штучного інтелекту, які виконують безперервне навчання, змінюють свою поведінку тощо.

Цей документ містить вимоги до створення, впровадження, підтримки та постійного вдосконалення системи управління AI в контексті організації. Очікується, що організації зосередять застосування вимог на функціях, які є унікальними для штучного інтелекту. Певні функції штучного інтелекту, такі як здатність постійно навчатися та вдосконалюватися або відсутність прозорості чи зрозумілості, можуть вимагати різних запобіжних заходів, якщо вони викликають додаткові занепокоєння порівняно з тим, як традиційно виконувалося б завдання. Впровадження системи управління на основі штучного інтелекту для розширення існуючих структур управління є стратегічним рішенням для організації.

Потреби та цілі організації, процеси, розмір та структура, а також очікування різних зацікавлених сторін впливають на створення та впровадження системи управління штучним інтелектом. Іншим набором факторів, які впливають на створення та впровадження системи управління штучним інтелектом, є численні варіанти використання штучного інтелекту та необхідність знайти належний баланс між механізмами управління та інноваціями. Організації можуть вирішити застосовувати ці вимоги, використовуючи підхід, заснований на оцінці ризиків, щоб забезпечити належний рівень контролю для конкретних випадків використання штучного інтелекту, послуг або продуктів у межах сфери діяльності організації.

Система управління штучним інтелектом повинна бути інтегрована з процесами організації та загальною структурою управління. Конкретні питання, пов'язані з AI, повинні враховуватися під час проєктування процесів, інформаційних систем і засобів управління. Ключовими прикладами таких процесів управління є:

- визначення організаційних цілей, залучення зацікавлених сторін та організаційної політики;
- управління ризиками та можливостями;
- процеси управління проблемами, пов'язаними з надійністю систем штучного інтелекту, такими як безпека, справедливість, прозорість, якість даних та якість систем штучного інтелекту протягом усього їхнього життєвого циклу;
- процеси управління постачальниками, партнерами та третіми сторонами, які надають або розробляють AI-системи для організації.

Цей документ містить рекомендації щодо застосування засобів керування для підтримки таких процесів. Цей документ дозволяє уникнути конкретних вказівок щодо процесів управління. Організація може поєднувати загальноприйняті рамки, інші міжнародні стандарти та власний досвід для впровадження критично важливих процесів, таких як управління ризиками, управління життєвим циклом та управління якістю даних, які підходять для конкретних випадків використання штучного інтелекту, продуктів або послуг у межах сфери.

Одним із таких міжнародних стандартів у сфері штучного інтелекту є ISO/IEC 23894:2023 Information technology - Artificial intelligence - Guidance on risk management (Інформаційна технологія - Штучний інтелект - Настанова щодо управління ризиками) [6], який зосереджений на управлінні ризиками в системах штучного інтелекту. Цей стандарт спрямований на забезпечення того, щоб алгоритми та моделі штучного інтелекту були зрозумілими та могли бути перевірені на упередженість та справедливість, тим самим зміцнюючи довіру та впевненість у системах штучного інтелекту.

Організація, яка дотримується вимог зазначених вище стандартів, може надати докази своєї відповідальності та підзвітності щодо своєї ролі стосовно систем штучного інтелекту.

Висновки. У міру того, як штучний інтелект стає все більш складним, ми можемо очікувати, що він відіграватиме важливу роль у вирішенні глобальних проблем і прискоренні пошуку рішень.

ISO і IEC утворюють спеціалізовану систему всесвітньої стандартизації. Національні органи стандартизації держав, які є членами ISO або IEC, беруть участь у розробці міжнародних стандартів через технічні комітети, створені відповідною організацією для вирішення окремих сфер технічної діяльності. Технічні комітети ISO та IEC співпрацюють у сферах, що становлять взаємний інтерес.

За результатами аналізування міжнародної нормативної бази стандартів ISO/IEC, ISO/IEC

TR, ISO/IEC TS, пов'язаних із технологією AI, визнано, що ці стандарти відповідають сумісності систем штучного інтелекту, гарантуючи, що технології штучного інтелекту можуть безперервно працювати разом і ефективно обмінюватися даними. Це особливо важливо, оскільки штучний інтелект стає все більш інтегрованим у різні сфери та програми.

Оскільки розробка та впровадження штучного інтелекту продовжує прискорюватися, розробка та гармонізація стандартів на національному рівні сприятиме єдиному розумінню цієї технології та визначенню ключових термінів, ризиків, переваг тощо.

У статті зосереджено увагу на ключових, на нашу думку, стандартах щодо виключення неправильного тлумачення термінів, сприяння спілкуванню та розумінню у сфері AI. Розглянуто всесвітньо визнаний стандарт ISO/IEC 42001, який містить рекомендації щодо управління системи штучного інтелекту.

Зазначені у статті ключові стандарти штучного інтелекту доречно прийняти в Україні як національні методом перекладу через технічний комітет стандартизації ТК 200 «Штучний інтелект».

Отже, потенційні наслідки штучного інтелекту є далекосяжними та глибокими. Штучний інтелект стає все більш потужним. Щоб забезпечити його розробку та відповідальне використання, доречно вирішувати питання упередженості, конфіденційності та прозорості через стандартизацію.

Інформаційні джерела

1. ISO/IEC 42001:2023 Information technology - Artificial intelligence - Management system. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:42001:ed-1:v1:en> (дата звернення: 11.02.2025).

2. Artificial Intelligence Act. REGULATION (EU) 2024/1689 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024, laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689> (дата звернення: 11.04.2025).

3. ISO/IEC 23053:2022 Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems Using Machine Learning (ML). URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:23053:ed-1:v1:en> (дата звернення: 11.04.2025).

4. ISO/IEC 22989:2022 Information technology - Artificial intelligence - Artificial intelligence concepts and terminology. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:22989:ed-1:v1:en> (дата звернення: 11.04.2025).

5. ISO/IEC TR 24030:2024 Information technology - Artificial intelligence (AI) - Use cases. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:tr:24030:ed-2:v1:en> (дата звернення: 11.04.2025).

6. ISO/IEC 23894:2023 AI - Guidance on risk management. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:23894:ed-1:v1:en> (дата звернення: 11.04.2025).

Sakhniuk I., Fedoseyeva I., Bytkov M.

Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

STANDARDIZATION OF CERTAIN PROVISIONS IN THE FIELD OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY

The article considers and analyzes the international regulatory framework of standards of the International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC) related to AI technology, which has almost 400 standards. The focus is on several key AI standards that provide a framework for the responsible and ethical use of AI technologies. An overview of the scope of their application is given. The standards specified in the article cover such areas as: terminology and concepts of artificial intelligence; control system; risk management; confidentiality; Bias; transparency; accountability, etc. By adhering to these standards, organizations can work to ensure that their AI systems are fair, transparent, and ethical.

Based on the analysis, it is shown that artificial intelligence is increasingly used in all sectors that use information technology. Taking this into account, it is proposed to include in the annual programs of work on national standardization the adoption and/or development of harmonized ISO and IEC standards for artificial intelligence.

Keywords: *information technology, artificial intelligence, standard, management system, structure of artificial intelligence systems.*

УДК 681.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-12

Симонюк В. П.¹, Божко К. М.², Мушкет К. Я.²¹Луцький національний технічний університет²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ЯК ОСНОВА ДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЇЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК

Використання сонячної енергії у вимірювальних технологіях спонукає до пошуку оригінальних схемних рішень. Прикладом цього є застосування мендосинського двигуна, особливістю якого є левітаційний магнітний підвіс та комутація обмоток ротору на основі періодичної зміни освітленості сонячних панелей, розташованих безпосередньо на самому роторі. Аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості. Розвиток динамічного методу вимірювання електричних параметрів та характеристик сонячних панелей отримав значний і суттєвий поштовх при створенні засобу їх безконтактного вимірювання. Перехідний процес сонячної панелі є основою для динамічного методу вимірювання її електричних параметрів і характеристик. Зокрема, за періодом вільних коливань в колі розгортки струму в початковій фазі режиму короткого замикання вимірюють електричну ємність сонячної панелі, а за декрементом затухання – її послідовний опір.

Ключові слова: Освітленість, мендосинський двигун, сонячна енергія, сонячна панель, перехідні процеси, вільні коливання.

Постановка проблеми. Увага до використання сонячної енергії у вимірювальних технологіях спонукає до пошуку оригінальних схемних рішень, про що свідчить, наприклад, застосування в них мендосинського двигуна, особливістю якого є левітаційний магнітний підвіс та комутація обмоток ротору на основі періодичної зміни освітленості сонячних панелей, розташованих безпосередньо на самому роторі [1].

На основі перехідного процесу в сонячній панелі створено динамічний метод вимірювання, який полягає у періодичному перемиканні сонячної панелі від стану холостого ходу до стану короткого замикання сонячної панелі [2]. Перемикання станів здійснюється швидким електронним ключем на потужному польовому транзисторі. При цьому в колі проходження струму включено котушку індуктивності, яка гальмує процес зростання струму. Параметри схеми розраховані таким чином, щоб розгортка струму відбувалась лінійно з малою похибкою нелінійності розгортки. Цей метод дозволяє в межах одного вимірювального імпульсу отримати вольт-амперну характеристику сонячної панелі. Основним вимірювальним пристроєм тут є цифровий осцилограф. Отримана осцилограма з виходу сонячної панелі відтворює її вольт-амперну характеристику в координатах – струм-напруга. Струм тут прямо пропорційний до часу, тому часова розгортка сигналу на екрані осцилографу є також і розгорткою струму. В результаті осцилограф працює за даних умов в якості характериографу.

При використанні динамічного методу вимірювання на початку режиму короткого замикання в сонячній панелі виникають затухаючі коливання. Коливальний контур утворює власна ємність сонячної панелі та котушка індуктивності пристрою лінійної розгортки струму. Осцилографічне вимірювання періоду коливань та декременту затухання дозволяють визначити величину електричної ємності та послідовного опору сонячної панелі. При зміні освітленості отримують залежність ємності від напруги – вольт-фарадну характеристику сонячної панелі, яка є важливим джерелом інформації про фізичні параметри фото-шару напівпровідникового матеріалу сонячних елементів.

Постановка завдання та аналіз стану. Таким чином, зазначені підходи до реалізації динамічного методу вимірювання дозволяють отримати і якісно обробити вимірювальну інформацію, на основі якої розраховують електричні параметри і отримують характеристики сонячних панелей та елементів. При аналізі сонячних елементів і панелей широко застосовують еквівалентні електричні схеми [3]. Реальний сонячний елемент має електричну ємність, яку при аналізі на основі еквівалентної схеми раніше не враховували.

Основні результати дослідження. Вдосконалена еквівалентна схема сонячної панелі із пристроєм розгортки струму має в своєму складі електричну ємність C . Крім того, до схеми додано послідовний опір сонячної панелі R_s , а замість ідеального джерела напруги включено ідеальне джерело струму I_{sc} . На схемі показано точку контролю, з якою утворює контакт щуп цифрового осцилографу, це шина «плюс» сонячної панелі. Таким чином, дана схема (рис. 1) відтворює метод динамічного вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної панелі в режимі лінійної розгортки струму [2].

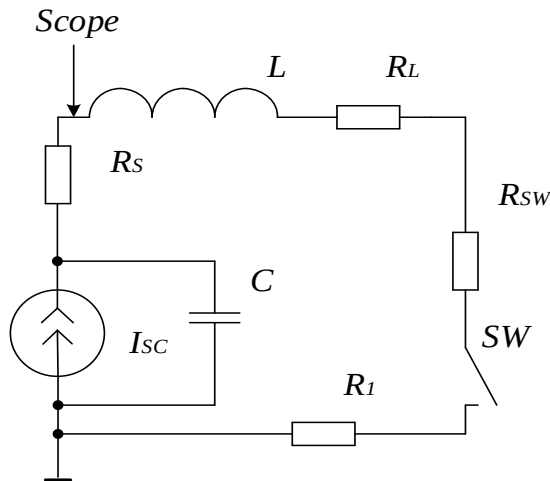


Рисунок 1 – Вдосконалена еквівалентна схема сонячної панелі із пристроєм розгортки струму: I_{sc} – ідеальне джерело струму (має величину струму короткого замикання сонячної панелі); L – індуктивність; R_L – активний опір котушки індуктивності; SW – ключ; R_1 – резистор для вимірювання струму; C – ємність сонячної панелі; R_s – послідовний опір сонячної панелі; *Scope* – вхідний канал осцилографа

В схемі (рис. 1) відсутній шунтовий опір сонячної панелі, оскільки його впливом на процес розгортки струму можна знехтувати. Типова величина шунтового опору – від 2 до 10 кОм, що перевищує на три порядки величину послідовного опору, яка дорівнює звичайно лише 2-15 Ом.

Вдосконалена еквівалентна схема дозволяє пояснити виникнення коливань в колі розгортки струму сонячної панелі при її короткому замиканні наприкінці процесу зростання струму від нуля до I_{sc} . В послідовному коливальному контурі, який складають ємність сонячної панелі C та зовнішня індуктивність виникають затухаючі вільні коливання. Затухання коливань відбувається внаслідок наявності в коливальному контурі активних опорів. Елементи R_s , C , I_{sc} відображають еквівалентну схему самої сонячної панелі в режимі короткого замикання, при цьому ігнорують наявність її шунтового опору внаслідок його малого впливу на коливальний процес (рис. 1). При перехідному процесі від режиму холостого ходу до режиму короткого замикання виникають вільні коливання в послідовному контурі, який утворюють власна ємність і зовнішня індуктивність кола розгортки струму. Коливання виникають одразу після закінчення процесу розгортки струму і потім поступово затухають. Осцилограму напруги сонячної панелі в режимі вільних коливань наведено на (рис. 2). За допомогою вертикального курсору (рис.2) було виміряно період T затухаючих коливань, який склав 118 мкс. Період коливань залежить від ємності та індуктивності контуру:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1)$$

Ємність C згідно формули (1) дорівнює:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \quad (2)$$

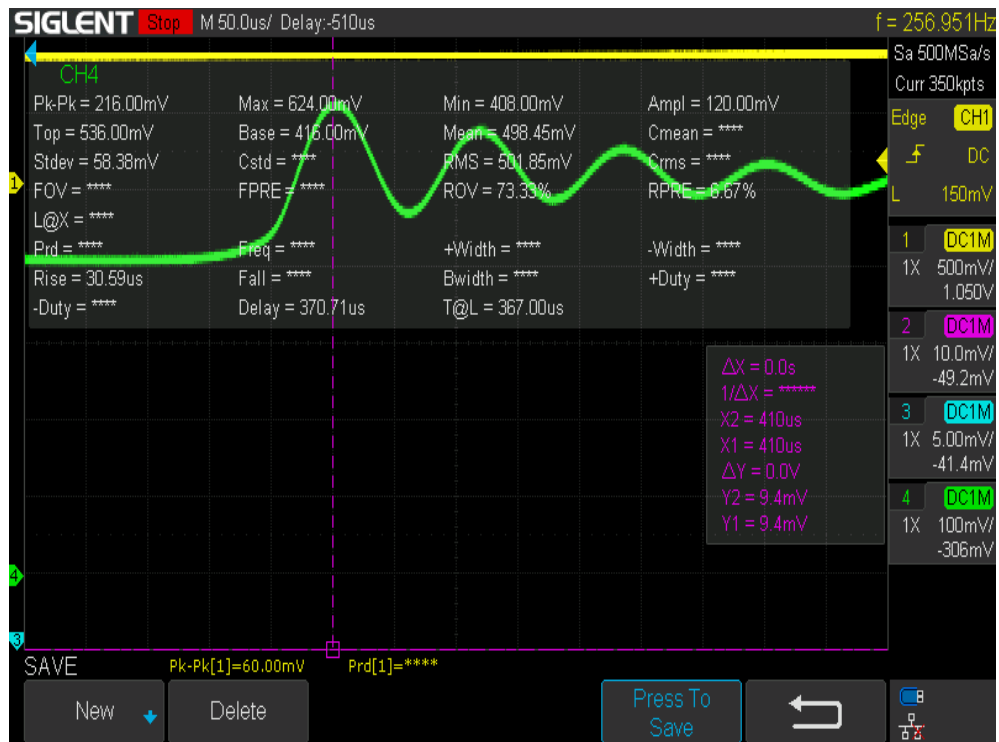


Рисунок 2 – Осцилограма напруги сонячної панелі при її короткому замиканні: сонячна панель має номінальні параметри 12 В, 50 Вт; струм короткого замикання 1,04 А

Відповідно до даних осцилографічного вимірювання (рис. 2) та при використанні котушки індуктивності з $L = 499$ мкГн маємо:

$$C = \frac{118^2 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 499 \cdot 10^{-6}} = 0,707 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,707 \text{ мкФ}.$$

Наявність активного опору в коливальному контурі дещо знижує частоту коливань, про що свідчить формула [4] для частоти коливань f^* реального контуру:

$$\omega = 2\pi f^* = \frac{2\pi}{T^*} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad (3)$$

звідки період коливань T^* дорівнює:

$$T^* = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (4)$$

Виконаємо оцінку періоду коливань реального контуру T^* при $R = 4$ Ом, що є типовим значенням для послідовного опору сонячної панелі:

$$T^* = \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{\frac{1}{499 \cdot 10^{-6} \cdot 0,707 \cdot 10^{-6}} - \left(\frac{4}{2 \cdot 499 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} = \frac{6,28 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{\frac{1}{352,8} - \frac{1}{62250}}} = 118,3 \cdot 10^{-6} = 118,3 \text{ мкс}.$$

Корекція періоду коливань складала:

$$T^* - T = 0,3 \text{ мкс або } 0,25\%.$$

Із формули (4) знайдемо скореговане значення ємності C^* :

$$C^* = \frac{T^2}{L(4\pi^2 + \frac{T^2 R^2}{4L^2})}. \quad (5)$$

Отримаємо числове значення C^* :

$$C^* = \frac{118^2 \cdot 10^{-12}}{499 \cdot 10^{-6} (4 \cdot 3,14^2 + \frac{118^2 \cdot 10^{-12} \cdot 4^2}{4 \cdot 499^2 \cdot 10^{-12}})} = \frac{27,904 \cdot 10^{-6}}{39,44 + 0,22} = 0,704 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,704 \text{ мкФ}.$$

Корекція ємності сонячної батареї дорівнює:

$$C - C^* = 0,707 - 0,704 = 0,003 \text{ мкФ або } 0,4\%.$$

Таким чином, припущення про малість впливу активного опору в коливальному контурі, який утворюють елементи схеми розгортки струму сонячної панелі, на результати вимірювань її електричних параметрів є вірним. Відносна похибка вимірювання при цьому складає долі одного відсотка від вимірювальної величини.

Розглянемо параметри затухання коливань в контурі (рис. 2). Амплітуда коливань U^A в контурі зменшується з часом за експоненціальним законом [4,5]:

$$U^A(t) = U_0^A e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

де λ – логарифмічний декремент затухання.

Параметр λ визначають за формулою:

$$\lambda T = \ln\left(\frac{U^A(t_1)}{U^A(t_1 + T)}\right), \quad (7)$$

де $U^A(t_1)$ – амплітуда сигналу, яку виміряли в момент часу t_1 ; $U^A(t_1 + T)$ – амплітуда сигналу по закінченні одного періоду T .

Звернемось знову до осцилограми (рис. 2). Параметри сигналу тут були виміряні вбудованим в осцилограф мультиметром. Зафіксовані такі значення:

- постійна складова 516 мВ;
- амплітуда першого періоду 92 мВ;
- амплітуда другого періоду 68 мВ;
- період коливань 118 мкс.

Застосувавши формулу (7), отримуємо:

$$\lambda T = 0,302, \text{ звідки:} \\ \lambda = 2559 \text{ с.}$$

Логарифмічний декремент затухання визначають за допомогою індуктивності та сумарного опору контуру R_{sum} відповідно до [4]:

$$\lambda = \frac{R_{sum}}{2L}, \quad (8)$$

звідки:

$$R_{sum} = 2L\lambda. \quad (9)$$

Для коливального контуру (рис. 1), активний опір R_{sum} дорівнює:

$$R_{sum} = 2 \cdot 499 \cdot 10^{-6} \cdot 2559 = 2,55 \text{ Ом}$$

Відповідно до еквівалентної схеми (рис. 1) складовими опору R_{sum} є:

- опір котушки R_L ;
- опір ключа R_{SW} ;
- опір для вимірювання струму R_1 ;
- послідовний опір сонячної панелі R_s .

Формула для сумарного опору контуру має вигляд:

$$R_{sum} = R_L + R_{SW} + R_1 + R_s. \quad (10)$$

Перші три з цих компонентів відомі і тоді, використавши формулу (10), отримаємо вираз для послідовного опору сонячної панелі R_s :

$$R_s = R_{sum} - R_L - R_{SW} - R_1, \quad (11)$$

або:

$$R_s = 2,55 - 0,38 - 0,0053 - 0,102 = 2,06 \text{ Ом} \pm 0,010 \text{ Ом}.$$

Таким чином, аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості [6]. Розвиток динамічного методу вимірювання електричних параметрів та характеристик сонячних панелей отримав значний і суттєвий поштовх при створенні засобу їх безконтактного вимірювання [7].

Висновки. Перехідний процес сонячної панелі є основою для динамічного методу вимірювання її електричних параметрів і характеристик. Зокрема, за періодом вільних коливань в колі розгортки струму в початковій фазі режиму короткого замикання вимірюють електричну ємність сонячної панелі, а за декрементом затухання – її послідовний опір. Аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості.

Інформаційні джерела

1. . Симонюк В. П., Божко К. М., Пташенчук В. В. Спосіб заміру освітленості із автономним джерелом живлення від сонячної енергії. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2023. №23. С.82-86.
2. Bozhko K. M., Zashchepkina N. M., Markin M. O, Markina O. M. Single-pulse method for measuring the current-voltage characteristics of solar panels. «Archives of Materials Science and Engineering», Volume 99, Issues 1-2, September-October 2019, P. 24-29.
3. Antonio Luque, Steven Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.. 2-nd ed., Wiley India, 2018, 1168 p.
4. Сусь Б. А., Заболотний В. Ф., Мисліцька Н. А. Коливання і хвилі : навчальний посібник. ВІТІ НТУУ «КПІ», 2010. 190 с.
5. Sree Harsha N. R., Anupama Prakash and Kothari D. P. The Foundations of Electric Circuit Theory. IOP Publishing Ltd, 2016, 207 p.
6. Божко К. М., Мушкет К. Я. Безконтактне вимірювання електричних параметрів сонячних елементів. Збірник наукових праць «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». 2024. №2(94), С. 191-198.

Simonyuk V.¹, Bozhko K.², Mushket K.²

¹ Lutsk National Technical University

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

TRANSIENT PROCESS OF A SOLAR PANEL AS THE BASIS OF A DYNAMIC METHOD FOR MEASURING ITS ELECTRICAL PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

The use of solar energy in measurement technologies encourages the search for original circuit solutions. An example of this is the use of the Mendocino motor, a feature of which is levitation magnetic suspension and commutation of the rotor windings based on periodic changes in the illumination of solar panels located directly on the rotor itself. Analysis of the transient process of a solar panel provides the ability to measure the series resistance of a solar panel. This method is an alternative to the measurement method based on obtaining several current-voltage characteristics at different illumination. The development of a dynamic method for measuring the electrical parameters and characteristics of solar panels received a significant and essential boost with the creation of a means of their non-contact measurement. The transient process of a solar panel is the basis for a dynamic method of measuring its electrical parameters and characteristics. In particular, the period of free oscillations in the current sweep circuit in the initial phase of the short-circuit mode measures the electrical capacitance of the solar panel, and the decay decrement measures its series resistance.

Keywords: Illumination, Mendocino engine, solar energy, solar panel, transients, free oscillations.

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-13

Якимчук Н. М., Євсюк М. М.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АДАПТИВНИЙ МОНІТОРИНГ КОГНІТИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ОБМЕЖЕНОЇ ВИДИМОСТІ ЦІЛІСНОСТІ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В статті розглядається проблема взаємозв'язку між технічним обслуговуванням оптичних мереж та системами управління безпекою. Досліджено зміни вимог до ефективності моніторингу та безперерйного функціонування інфраструктури. На основі аналізу аномалій, які пов'язані з умисним та неумисним пошкодженням в мережах PON запропоновано когнітивний алгоритм моніторингу, що поєднує спектральний аналіз оптичних сигналів із методами машинного навчання. Запропонований підхід дозволяє підвищити деталізацію діагностики волоконно-оптичної інфраструктури, зменшити вплив слабозатухаючих мод та забезпечити прогнозування деградації волокна в режимі реального часу. Результати моделювання показали, що використання багатоспектрального аналізу та адаптивних методів класифікації аномалій дозволяє скоротити час виявлення несправностей на 40–50%, зменшити витрати на обслуговування на 30% та знизити частоту критичних відмов на 35–40%. Запропоноване рішення сприяє створенню більш надійних та безпечних PON-мереж, здатних адаптивно реагувати на технічні й кіберзагрози.

Ключові слова: пасивна оптична мережа, моніторинг, рефлектометрія OTDR, адаптивність, когнітивні мережі.

Постановка проблеми. У сучасних пасивних оптичних мережах (PON) система управління мережею (NMS) не забезпечує повної прозорості фізичної інфраструктури. Це явище обумовлене як технічними обмеженнями архітектури PON, так і недостатнім розвитком методів моніторингу фізичного стану мережі. Головна особливість PON – використання пасивних компонентів, таких як розгалужувачі та волоконно-оптичні лінії, які не містять активних пристроїв для діагностики або самостійного виявлення несправностей. Відсутність електронних елементів на рівні користувацького доступу знижує експлуатаційні витрати, однак водночас ускладнює оперативний контроль за фізичними пошкодженнями та деградацією волоконно-оптичних каналів.

Наслідком цієї проблеми є зростання часу виявлення несправностей, що негативно впливає на рівень обслуговування кінцевих користувачів та може спричинити значні фінансові втрати для операторів. Оскільки в традиційних активних мережах кожен вузол містить пристрої, здатні передавати інформацію про стан лінії у режимі реального часу, NMS може швидко реагувати на відхилення в параметрах сигналу. Натомість у PON-системах збої часто залишаються непомітними до моменту фактичної відмови сервісу, що унеможливорює своєчасне прогнозування аварійних ситуацій. Отже, проблема обмеженої видимості фізичної інфраструктури в PON залишається актуальною та потребує розробки нових підходів до моніторингу мережі.

Аналіз останніх досліджень. Важливо зазначити, що сучасні методи моніторингу PON здатні частково вирішити цю проблему. Оптичний рефлектометричний контроль (OTDR) дозволяє здійснювати аналіз стану волокон у мережі, однак його впровадження у масштабних системах є складним і не завжди забезпечує необхідний рівень деталізації [1, 2]. Додатково використовуються методи спектрального аналізу сигналу, які дають змогу оцінювати якість передавання даних. Проте навіть ці технології поки що не дозволяють створити повноцінну модель фізичної інфраструктури в NMS у режимі реального часу [3]. Крім цього у сучасних телекомунікаційних системах, зокрема в оптичних мережах, важливим завданням є ефективне розрізнення випадкових відмов та навмисних атак. Втрата зв'язку може бути спричинена як фізичними факторами, такими як механічні пошкодження кабелів, деградація компонентів або несприятливі зовнішні умови, так і навмисними діями зловмисників, які спрямовані на порушення роботи інфраструктури [4]. Відсутність чіткої диференціації між цими типами інцидентів створює додаткові ризики для надійності мережі та ефективності її функціонування.

Класичні методи технічного обслуговування оптичних систем здебільшого зосереджені на виявленні фізичних пошкоджень. Оптична рефлектометрія та аналіз рівня сигналу дозволяють

ідентифікувати проблеми, пов'язані з деградацією волокна або розривами лінії. Однак ці методи не враховують можливість навмисного втручання, яке може бути спрямоване на несанкціоноване прослуховування або повне перехоплення трафіку. У такому випадку оптична лінія може залишатися фізично непошкодженою, проте її використання буде скомпрометоване. Саме тому необхідно забезпечити інтеграцію систем технічного обслуговування з інструментами управління безпекою.

Використання адаптивних алгоритмів моніторингу, що поєднують фізичний аналіз волокна з оцінкою аномальної поведінки трафіку, може стати ефективним рішенням. Потенційним напрямом є інтеграція системи управління мережею з інтелектуальними моделями прогнозування пошкоджень, які враховуватимуть статистичні зміни в параметрах передавання сигналу. Крім того, перспективним є використання новітніх технологій когнітивного спектрального моніторингу, які можуть забезпечити більш точне виявлення аномалій без потреби у встановленні додаткових активних пристроїв [5, 6].

Наприклад, у випадку випадкової аварії система фіксуватиме різке зниження рівня сигналу або повний його розрив. Натомість у разі атаки можуть спостерігатися нестандартні зміни у спектральних характеристиках переданих даних або поява паразитних відбитих сигналів, що вказують на можливу спробу прослуховування.

Таким чином, посилення взаємозв'язку між технічним обслуговуванням і кібербезпекою дозволить не лише підвищити загальну надійність мереж, а й мінімізувати час реагування на інциденти. Завдяки використанню технологій штучного інтелекту та машинного навчання відкриваються можливості створювати динамічні моделі поведінки мережі, які виявлятимуть навіть незначні відхилення від норми та автоматично класифікуватимуть їх як технічні або безпекові загрози.

Впровадження сучасних методів аналізу дозволить суттєво зменшити ризики аварійних відмов, оптимізувати експлуатаційні витрати та підвищити якість обслуговування кінцевих користувачів.

Реалізація таких когнітивних засобів моніторингу сприятиме побудові стійких телекомунікаційних систем, здатних ефективно протистояти як фізичним несправностям, так і кіберзагрозам, що є критично важливим у контексті зростаючої складності та вразливості цифрової інфраструктури.

Мета роботи. Розробка та вдосконалення методів моніторингу пасивних оптичних мереж (PON) шляхом інтеграції спектрального аналізу, оптичної рефлектометрії (OTDR) та методів машинного навчання для підвищення точності виявлення несправностей, прогнозування деградації волоконно-оптичних ліній та диференціації випадкових відмов від кібератак.

Виклад основного матеріалу. У контексті розвитку пасивних оптичних мереж (PON), технологія TDM-PON залишається одним із ключових рішень для забезпечення широкосмугового доступу до кінцевих користувачів. Ефективний моніторинг таких мереж є важливим компонентом для підтримки їхньої надійності, безпеки та довговічності. У TDM-PON використовується часовий поділ для передачі даних, що забезпечує спільне використання єдиного волокна кількома користувачами. Використання інтегрованого OTDR (інтегровані оптичні рефлектометри) є одним найпоширенішим методом моніторингу TDM-PON. Цей підхід передбачає встановлення рефлектометрів на OLT для періодичного аналізу оптичного тракту. OTDR генерує тестовий сигнал і вимірює зворотне розсіювання, що дозволяє виявляти несправності, такі як вигини, обриви або погіршення якості з'єднання. Рефлектометрія базується на ефекті зворотного розсіювання Релея та Бріллюєна, а також на відбиттях від дискретних неоднорідностей. Основне рівняння відгуку оптичного рефлектометра (OTDR) визначає потужність сигналу, що повертається до джерела [7]:

$$P_{\text{rec}}(z) = P_0 e^{-2\alpha z} \Gamma(z) + \sum_i R_i P_0 e^{-2\alpha z_i} \quad (1)$$

де P_0 – потужність зондуючого імпульсу,

α – коефіцієнт загасання волокна,

$\Gamma(z)$ – коефіцієнт зворотного розсіювання,

R_i – коефіцієнт відбиття від точкових неоднорідностей,

z_i – координати відбиваючих точок.

Основними перевагами цього підходу є висока точність локалізації проблем та відсутність впливу на користувацький трафік. Однак їх використання має низку обмежень, які впливають на точність і ефективність моніторингу таких мереж.

Одним із основних недоліків є обмежена здатність OTDR до точного розрізнення слабких сигналів або сигналів, які проходять через численні розгалуження. В умовах TDM-PON, де мережа складається з кількох каналів, що передають сигнали через одну оптичну лінію, виникають труднощі в аналізі інтерференцій та взаємодії сигналів, що можуть призвести до спотворень результатів вимірювань. Це обмежує здатність OTDR точно ідентифікувати джерела проблем та визначити точні місця пошкоджень або деградації сигналу.

OTDR зазвичай не підходить для оперативного моніторингу в реальному часі, оскільки цей метод вимагає запуску тестових сигналів і аналізу їх відбиття. Метод може бути непридатним для швидко змінюваних умов, характерних для високошвидкісних TDM-PON, де швидкість адаптації мережі до змін дуже важлива для збереження її ефективності.

Крім того, OTDR може мати труднощі з точністю вимірювань у складних топологіях. Технічні перешкоди, велика кількість оптичних розгалужувачів-сплітерів, можуть спотворювати сигнали, що ускладнює їх інтерпретацію та оцінку стану мережі.

У цьому контексті моніторинг спрямований на забезпечення контролю за станом фізичної інфраструктури в реальному часі та захистом від несанкціонованого доступу стикається з додатковими труднощами.

Аналіз сучасних досліджень у галузі волоконної оптики і методів захисту інформації підтверджує, що основними причинами витоку інформації в оптичному діапазоні є місця введення світла у хвилевід (стики), внаслідок чого в оптоволокні виникають моди випромінювання. Наявність таких слабозатухаючих мод, що поширюються за межами волокна ускладнює коректний підрахунок загасання, оскільки частина енергії витікає у зовнішнє середовище.

Це явище обумовлене розбіжністю геометричних параметрів, зокрема профілю поперечного перерізу, а також відмінностями у розподілені параметрах, таких як діелектрична та магнітна проникність волокон, що з'єднуються. В результаті, частина енергії оптичного сигналу може випромінюватися у навколишній простір або переходити у слабозатухаючі моди, що поширюються поза основним оптичним ядром.

Таке неконтрольоване випромінювання може мати суттєві наслідки для якості оптичного контролю та моніторингу волоконно-оптичних ліній. По-перше, втрати сигналу в місцях стику знижують рівень переданого оптичного потоку, що впливає на точність вимірювання потужності сигналу та його спектральних характеристик. Це може створювати труднощі при використанні оптичної рефлектометрії (OTDR), оскільки рефлектометричні імпульси будуть частково розсіяні поза волокном, що ускладнює аналіз відбитого сигналу.

По-друге, слабозатухаючі моди, що поширюються за межами волокна, можуть створювати паразитні відбиття, які імітують наявність додаткових з'єднань або аномалій у структурі оптичної лінії. Це призводить до появи хибних сигналів у системах моніторингу, що ускладнює діагностику несправностей і може спричинити хибні тривоги. Зокрема, у довгих оптичних лініях такі ефекти можуть накопичуватися, погіршуючи загальну точність діагностики.

Крім того, випромінювання світла в місцях стику може сприяти витоку інформації, що є критично важливим з точки зору безпеки телекомунікаційних систем. Оскільки слабозатухаючі моди можуть поширюватися поза оптичним волокном на значні відстані, зловмисники потенційно можуть використовувати ці витоки для перехоплення переданих даних без фізичного втручання в лінію.

Наприклад, припустимо, що поверхневий опір приймача дуже великий, тобто за своїми властивостями приймач є магнітним екраном рис. 1. [8]. Тоді розподіл електричного поля по осі у просторі товщиною матиме осцилюючий характер.

Розподіл поля у відсутності екрана має монотонно спадаючий вигляд [7]. Тобто розподіл поля між кордоном оптоволокна та екраном може сильно відрізнятися від розподілу поля діелектричного хвилеводу. Більше того, з наведених фізичних міркувань випливає, що за наявності фотоприймача хвилевідна мода (направлена мода) може перейти в моду випромінювання. Така ситуація виникне у разі, коли поверхневий опір буде дійсною або комплексною величиною [7, 8].

Моди випромінювання, як і направлені моди є рішеннями рівнянь Максвелла, що мають неперервний спектр власних частот.

Розглянемо оптичне волокно з радіусом a та діелектричною проникністю ϵ_1 , оточене середовищем з діелектричною проникністю ϵ_2 . Хвилі у волокні описуються рівняннями Максвелла, а власні моди визначаються із рівняння Гельмгольца. Слабозатухаючі моди

характеризуються тим, що їхні електромагнітні поля простягаються за межі волокна, але поступово згасають у навколишньому середовищі.

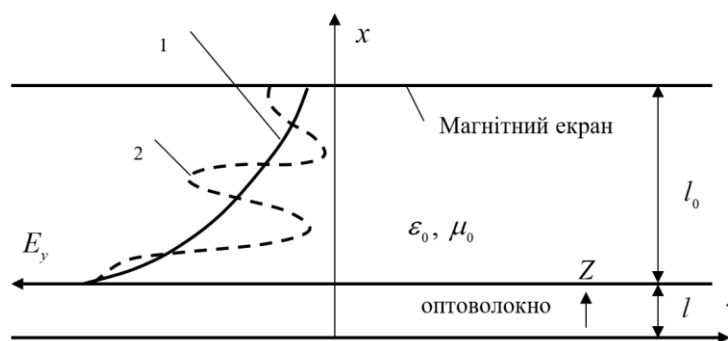


Рисунок 1 – Розподіл електричного поля ТЕ моди за межами плоского оптоволокна: 1 – без магнітного екрану; 2 – за наявності магнітного екрану

У циліндричних координатах хвильове рівняння для електричного поля у волокні записується як:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2)$$

де $k = \frac{\omega}{c} n$ – хвильове число в середовищі,

n – показник заломлення (відповідно n_1 для волокна і n_2 для зовнішнього середовища),

ω – кутова частота,

c – швидкість світла у вакуумі.

Для слабозатухаючих мод рівняння Гельмгольца розв'язується окремо в середині волокна та в навколишньому середовищі з відповідними граничними умовами. У середині волокна рішення для мод ТЕ або ТМ має вигляд [9]:

$$E_z(r, \phi, z) = A J_m(hr) e^{j(m\phi + \beta z)} \quad (3)$$

де $J_m(hr)$ – функція Бесселя першого роду,

$h^2 = k_1^2 - \beta^2$, β – позовжне хвильове число.

За межами волокна рішення записується через функції Ханкеля:

$$E_z(r, \phi, z) = B H_m^{(1)}(qr) e^{j(m\phi + \beta z)} \quad (4)$$

де $H_m^{(1)}(qr)$ – функція Ханкеля першого роду, що описує випромінювання назовні,
 $q^2 = \beta^2 - k_2^2$.

Слабозатухаючі моди визначаються умовою:

$$\beta \approx k_2 \quad (5)$$

що означає, що поле значною мірою поширюється поза волокном і поступово загасає.

Граничні умови на межі $r = a$ (неперервність полів) приводять до рівняння дисперсії:

$$\frac{J'_m(ha)}{J_m(ha)} = \frac{H_m^{(1)'}(qa)}{H_m^{(1)}(qa)} \quad (6)$$

де штрих означає похідну по r . Розв'язок цього рівняння для даних параметрів волокна дає можливі значення β , що визначають слабозатухаючі моди.

Втрати в слабозатухаючих модах оцінюються через уявну частину q , що описує загасання поля у зовнішньому середовищі. Коефіцієнт загасання визначається як:

$$\alpha = 2\text{Im}(\beta) \quad (7)$$

що дозволяє оцінити ефективний радіус поширення поза волокном.

Для реальних волокон розрахунок слабозатухаючих мод проводиться чисельними методами, такими як чисельне розв'язання рівняння дисперсії для знаходження β або моделювання розподілу електромагнітного поля методом скінченних різниць або методом скінченних елементів.

Серед усього спектру підходів для виявлення несанкціонованого втручання у пасивні оптичні мережі найкраще підходять методи, які забезпечують високу чутливість до змін у волоконно-оптичній лінії та дозволяють локалізувати джерело втручання з високою точністю.

Аналіз існуючих методів показує, що підходи, засновані на частковому та розподіленому контролі окремих параметрів мережі, не можуть повністю забезпечити всі вимоги до моніторингу, особливо в реальному часі. Ці методи є ефективними для періодичного моніторингу, однак у критичних системах, де необхідний безперервний контроль і швидке реагування на зміну стану мережі, потрібні нові адаптивні когнітивні підходи. Вони повинні інтегрувати механізми самонавчання, аналізу великих даних та прогнозування потенційних збоїв на основі динамічної корекції параметрів сигналу.

Для розв'язання цієї проблеми пропонується удосконалений алгоритм, що включає методи спектрального аналізу, машинного навчання та адаптивного коригування профілю загасання. Розглянемо наступні етапи алгоритму (рис. 2):



Рисунок 2 – Адаптивний алгоритм моніторингу PON

1.1. Збір та обробка даних. На початковому етапі алгоритму моніторингу PON виконується багатохвильове OTDR-вимірювання на довжинах хвиль 1310, 1490, 1550 і 1625 нм. Це дозволяє отримати рефлектограми, які містять ключову інформацію про стан мережі. Записані дані включають часову затримку сигналу, рівень загасання та інтенсивність відбиття для кожної довжини хвилі, що забезпечує базу для подальшого аналізу.

1.2. Усереднення та фільтрація шумів. На наступному етапі дані очищуються від шумів для підвищення точності аналізу. Використовуються методи ковзного середнього та вейвлет-фільтрації. Ковзне середнє згладжує сигнал, усуваючи короткочасні коливання, спричинені електричними шумами або зовнішніми впливами. Розрахунок виконується за формулою:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], \quad (8)$$

де $y[n]$ – згладжений сигнал;
 $x[n]$ – початковий сигнал;
 M – ширина вікна згладжування.

Вейвлет-фільтрація відокремлює високочастотні шуми, зберігаючи низькочастотну інформацію.

$$x(t) = \sum_j \sum_k c_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (9)$$

де $c_{j,k}$ – коефіцієнти розкладу сигналу;
 $\psi_{j,k}(t)$ – базисні вейвлети;
 j і k – масштаби та зсуви.

Додатково оцінюється стабільність сигналу між вимірюваннями, що дозволяє виявляти випадкові флуктуації та отримувати більш достовірні результати для подальшої діагностики.

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt, \quad (10)$$

де $R(\tau)$ – кореляційна функція;
 τ – часовий зсув;
 T – тривалість сигналу.

Ці підходи дозволяють отримати більш достовірні результати для подальшої діагностики, забезпечуючи точність і стабільність аналізу.

1.3. Аналіз спектрального розподілу мод. Для аналізу частотного спектра сигналу застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT), яке допомагає ідентифікувати низькочастотні складові, пов'язані із слабозатухаючими модами у волокні. Такі моди можуть свідчити про дефекти або погіршення якості волокна. Крім того, на цьому етапі виділяються паразитне розсіювання та витоки енергії, які вказують на місця можливих пошкоджень або невідповідні втрати сигналу. Ця інформація дає змогу виявити критичні дефекти мережі та оптимізувати її стан.

2.1. Корекція впливу слабозатухаючих мод. На цьому етапі ідентифікуються ділянки OTDR-рефлектограми з аномальним загасанням, що не відповідає типовим профілям волокна. Такі відхилення можуть сигналізувати про пошкодження або дефекти, які викликають ненормальне зниження сигналу. Аналіз змін загасання на різних довжинах хвиль, зокрема 1310 нм і 1550 нм, дозволяє виявити паразитний витік енергії, що може бути пов'язаний із дефектами з'єднань або волокна. Цей процес визначає проблемні ділянки, які потребують уваги для відновлення якості сигналу.

2.2 Розрахунок корекційного коефіцієнта загасання. На основі порівняння між прогнозованими та фактичними значеннями загасання визначається корекційний коефіцієнт $K_{\text{mod}}(z)$. Цей коефіцієнт використовується для компенсації впливу слабозатухаючих мод, що дозволяє відновити правильний профіль загасання. Загасання на кожній ділянці волокна коригується за допомогою формули:

$$\alpha_{\text{кор}}(z) = \alpha_{\text{вим}}(z) - K_{\text{mod}}(z) \quad (11)$$

де $\alpha_{\text{вим}}(z)$ – виміряне загасання на певній ділянці, а $K_{\text{mod}}(z)$ – поправка, що компенсує вплив слабозатухаючих мод.

Цей процес дозволяє коригувати отримані дані, що знижує ефект від паразитних витоків енергії та покращує точність моніторингу стану оптичної мережі.

2.3. Оновлення профілю загасання. На етапі оновлення профілю загасання створюється коригована OTDR-рефлектограма, яка відображає реальне загасання без впливу паразитних мод. Це досягається шляхом застосування раніше розрахованого корекційного коефіцієнта, що дозволяє усунути спотворення, викликані слабозатухаючими модами, та отримати більш точне представлення стану оптичної мережі. Коригована рефлектограма дає змогу оцінити справжні

характеристики загасання на різних ділянках волокна, відображаючи реальний рівень втрат без додаткових паразитних впливів.

Після отримання коригованих даних здійснюється порівняння з історичними вимірюваннями для перевірки коректності проведеного коригування. Це дозволяє оцінити, наскільки змінилися параметри загасання після застосування корекційного коефіцієнта, і забезпечує впевненість у тому, що процес корекції був виконаний правильно. Якщо результати коригування відповідають очікуваним значенням, то це вказує на ефективність усунення паразитних мод і точність оновленого профілю загасання.

3. Виявлення аномалій у волокні.

3.1. Автоматизоване виявлення змін загасання. На етапі виявлення аномалій у волокні використовується автоматизоване виявлення змін загасання. Для цього застосовується алгоритм адаптивного порогового аналізу, який дозволяє виявити різкі зміни загасання у волокні. Порівнюються профілі загасання до та після корекції, що дозволяє виявити будь-які відхилення, які можуть вказувати на наявність дефектів або втручання в мережу. Особливу увагу приділяють визначенню областей з аномальними стрибками загасання, оскільки це може бути сигналом про пошкодження волокна, несанкціоноване підключення чи інші проблеми, що потребують негайного усунення.

3.2. Класифікація аномалій за допомогою машинного навчання. Для класифікації аномалій в оптоволоконній мережі використовується нейронна мережа, зокрема автоенкодер або LSTM (довгострокова короткострокова пам'ять). Вхідними параметрами для цієї класифікації є форма сигналу, спектральні характеристики, рівень загасання та наявність паразитних мод, що дозволяють глибше аналізувати мережеві аномалії. Модель здатна визначати різні типи дефектів, зокрема перегин волокна, який характеризується поступовим збільшенням загасання на локальній ділянці, або розрив, при якому відбувається різкий стрибок загасання без відбитого сигналу. Також розпізнаються несанкціоновані підключення, що проявляються у вигляді відбиття з аномальними характеристиками, а також деградація волокна, що проявляється в рівномірному збільшенні загасання на великій відстані.

4. Прогнозування розвитку деградації волокна.

4.1. Створення прогнозової моделі загасання. На етапі прогнозування розвитку деградації волокна створюється прогнозна модель загасання за допомогою рекурентної нейронної мережі (LSTM). Ця модель використовується для аналізу динаміки змін загасання в оптоволоконній мережі, зокрема для передбачення майбутніх тенденцій деградації. Для побудови моделі аналізуються історичні дані загасання для кожної конкретної ділянки волокна. На основі цих даних нейронна мережа вчиться прогнозувати зміни загасання на найближчий період, що дозволяє оперативно оцінити стан мережі та вчасно вжити заходів для усунення потенційних проблем або дефектів.

4.2. Визначення критичних зон. На етапі визначення критичних зон ідентифікуються ділянки волокна, де прогнозується суттєве зростання загасання. Це дозволяє визначити проблемні місця в мережі, які можуть потребувати термінового втручання. Для кожної такої ділянки автоматично генерується сигнал тривоги, який сповіщає оператора мережі про можливу деградацію. Такий підхід дає змогу оперативно реагувати на потенційні проблеми, зменшуючи ризик виникнення серйозних дефектів і забезпечуючи стабільну роботу мережі.

4.3. Автоматична оптимізація параметрів мережі. На етапі автоматичної оптимізації параметрів мережі система здійснює когнітивну корекцію в разі прогнозування критичного зростання загасання. Якщо модель виявляє потенційні проблеми, система адаптується, регулюючи потужність передавачів, що дозволяє зменшити загасання сигналу в проблемних ділянках. Крім того, система може змінити довжину хвилі передачі для обходу зон з аномальними показниками загасання, що дозволяє покращити якість зв'язку. Якщо ці заходи виявляються недостатніми, система автоматично перемикає маршрути передачі трафіку, забезпечуючи безперебійний зв'язок і мінімізуючи вплив дефектів на мережеву інфраструктуру.

Запропонований алгоритм забезпечує точніше виявлення аномалій у когнітивних PON-мережах за рахунок корекції впливу слабозатухаючих мод. Завдяки спектральному аналізу та методам машинного навчання система може ефективно відокремлювати паразитні ефекти від реальних проблем у волокні. Це дозволяє підвищити надійність виявлення несправностей, зменшити кількість хибних тривог і впровадити прогнозовану діагностику для запобігання деградації мережі.

Застосування цього алгоритму у когнітивних PON-системах забезпечить покращений контроль якості обслуговування, автоматизоване управління мережею та зниження витрат на технічне обслуговування.

Таким чином, розвиток когнітивних PON-технологій дозволить забезпечити проактивний моніторинг та управління мережею, що значно зменшить ризик критичних відмов і підвищить її надійність та ефективність у складних умовах експлуатації.

Для мінімізації негативного впливу цього явища на оптичний контроль та моніторинг необхідно застосовувати методи точного зрощування волокон, що забезпечують мінімальну розбіжність їхніх геометричних та оптичних параметрів. Крім того, перспективним напрямом є використання покращених алгоритмів обробки сигналів в OTDR-системах, які дозволяють компенсувати вплив паразитних відбиттів та втрат на стиках.

Висновки. Стаття розглядає проблему обмеженої видимості фізичної інфраструктури пасивних оптичних мереж (PON), що ускладнює оперативне виявлення несправностей і підвищує ризики фінансових втрат операторів. Традиційні методи моніторингу, зокрема оптична рефлектометрія, не забезпечують достатньої деталізації стану мережі та не дозволяють розрізняти випадкові відмови й навмисні кібератаки.

Запропонований підхід поєднує багатоспектральний аналіз OTDR із методами машинного навчання для точнішого виявлення аномалій та їхньої класифікації. Запропонований підхід передбачає використання когнітивних алгоритмів для автоматичного коригування параметрів мережі залежно від змін у середовищі передавання. Це включає адаптивну корекцію втрат через слабозатухаючі моди, підвищення точності оцінки аномалій за рахунок багатоспектрального аналізу, а також інтеграцію з системами штучного інтелекту для автоматичного усунення паразитних ефектів, що спотворюють результати вимірювань. Додатково впроваджується прогностичний аналіз, який дозволяє передбачати деградацію оптичного каналу та мінімізувати аварійні відмови. Моделювання показало, що застосування адаптивного моніторингу дозволяє зменшити час виявлення несправностей на 40–50% та скоротити витрати на технічне обслуговування до 30%.

Використання штучного інтелекту забезпечує автоматичну оптимізацію параметрів мережі, що скорочує час реагування на відхилення. Це не лише підвищує ефективність технічного обслуговування, а й зміцнює захист від загроз безпеки.

Інформаційні джерела

1. Fernández M. P., Bulus Rossini L. A., Morbidel L. and Costanzo Caso P. A. PON Monitoring Technologies based on OTDR Techniques: State of the Art and Trends. 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Miguel de Tucuman, Argentina, 2018, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ARGENCON.2018.8646139
2. Zhang C., Zhang M., Tang X. and Shen S. Ghost Reflection Processing Method in PON Branch Monitoring Based on OTDR. 2022 IEEE 10th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), Zhangye, China, 2022, pp. 174-177. DOI: 10.1109/ICICN56848.2022.10006422
3. Champavère A. New OTDR measurement and monitoring techniques. OFC 2014, San Francisco, CA, USA, 2014, pp. 1-3. DOI: 10.1364/OFC.2014.W3D.1
4. Zhang C., Tang X., Zhang M., Shen S. Multi-branch monitoring technology of PON based on OTDR. Proc. SPIE 12562, AOPC 2022: Optical Information and Networks, 1256202, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2642507>
5. Abdelli K., Tropschug C., Griesser H., & Pachnicke S. Faulty branch identification in passive optical networks using machine learning. Journal of Optical Communications and Networking, Optica Publishing Group, 15(4), 187, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.475882>
6. Abdelli K., Tropschug C., Griesser H. and Pachnicke S. Fault Monitoring in Passive Optical Networks using Machine Learning Techniques. 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICTON59386.2023.10207489
7. Hartog A. H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC Press. 2017. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315119014>
8. Anderson D. R., & Bell F. G. Optical Time-Domain Reflectometry. Telecommunications Press. 1997. <https://www.alibris.com/Optical-time-domain-reflectometry-Duwayne-R-Anderson/book/4874182>
9. Дифракційна теорія оптичних систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. К.: НТУУ «КПІ», 2011. 140 с. ISBN 978-966-622-415-9

Yakymchuk N., Yevsiuk M.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ADAPTIVE MONITORING OF COGNITIVE OPTICAL NETWORKS TO ADDRESS THE PROBLEM OF LIMITED INFRASTRUCTURE INTEGRITY VISIBILITY

The paper examines the relationship between optical network maintenance and security management systems. Changes in monitoring efficiency requirements and the uninterrupted operation of infrastructure are analyzed. Based on the study of anomalies associated with intentional and unintentional damage in PON networks, a cognitive monitoring algorithm is proposed that integrates spectral analysis of optical signals with machine learning methods. The proposed approach enhances the accuracy of fiber-optic infrastructure diagnostics, reduces the impact of weakly attenuated modes, and enables real-time fiber degradation prediction. Simulation results demonstrate that the use of multispectral analysis and adaptive anomaly classification methods can reduce fault detection time by 40–50%, lower maintenance costs by 30%, and decrease the frequency of critical failures by 35–40%. The proposed solution contributes to the development of more reliable and secure PON networks capable of adaptively responding to both technical and cyber threats.

Keywords: *passive optical network, monitoring, OTDR reflectometry, adaptability, cognitive networks.*

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 A4 (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:

G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка;

G6 Інформаційно-вимірювальні технології;

G7 Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;

G8 Матеріалознавство;

G9 Прикладна механіка;

G11 Машинобудування (за спеціалізаціями);

G22 Біомедична інженерія.

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 UA348201720313291011201017820 Призначення платежу: За інформаційно-аналітичне забезпечення наукової діяльності від ППБ.

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

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

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

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

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

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

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Здано у виробн. 30.05.2025 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 14. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.

Видавництво «Вежа-Друк»
43021, Україна, м. Луцьк, вул. Шопена 12