

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2024-24

Збірник наукових праць

Випуск 24
(квітень, 2024)

Луцьк 2024

УДК 004, 351, 528, 539, 616, 621, 658, 685

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол №10 від 26 квітня 2024 р.

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

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк, квітень 2024 р. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. 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.

Адреса організаційного комітету:

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

Телефон: (050) 378-82-31

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ	
Марчук Віктор Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА	
Четвержук Тарас Іванович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР:	
Пташенчук Віталій Віталійович , кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.	
Валецький Богдан Петрович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	
1	Заболотний Олег Васильович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
2	Захаров Ігор Петрович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
3	Антонюк Віктор Степанович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
4	Гераймчук Михайло Дем'янович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
5	Гайдук Мікулас (Hajduk Mikuláš) , доктор технічних наук, професор, професор кафедри робототехніки, Технічний університет Кошице, Slovakia.
6	Редько Ростислав Григорович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
7	Повстяной Олександр Юрійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
8	Ларшин Василь Петрович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в інжинірингу, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
9	Антоній Свіць (Antoni Shwic) , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатизації та роботизації продукції, Люблінська політехніка, Poland.
10	Богуш Вісніці (Bogusz Wisnicki) , PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
11	Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek) , PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецинська морська академія, Poland.
12	Станіслав Іван (Stanislaw Iwan) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
13	Збігнев Матушак (Zbigniew Matuszak) , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
14	Андрушак Ігор Євгенович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Луцький національний технічний університет, Україна.
15	Ткачук Анатолій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
16	Гулай Любомир Дмитрович , доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
17	Денисюк Віктор Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
18	Коломісць Леонід Володимирович , доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна.
19	Куц Юрій Васильович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
20	Лапченко Юрій Сергійович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
21	Луців Ігор Володимирович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри 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 металорізучі верстати, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут», Україна.
26	Середюк Орест Євгенович , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.
27	Тимчик Григорій Семенович , доктор технічних наук, професор, декан приладобудівного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
28	Ткачук Роман Андрійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
29	Тонконогий Володимир Михайлович , доктор технічних наук, професор, директор Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
30	Федосов Сергій Анатолійович , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики Луцький національний технічний університет, Україна
31	Шваб'юк Василь Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна.
32	Яворський Богдан Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
33	Ярошевич Микола Павлович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
34	Григор'єва Наталія Сергіївна , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
35	Тулашвілі Юрій Йосипович , доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук, Луцький національний технічний університет, Україна.
36	Захарчук Віктор Іванович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
37	Пальчевський Богдан Олексійович , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
38	Решетило Олександр Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
39	Гуменюк Лариса Олександрівна , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
40	Кайдик Олег Леонтійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
41	Симонюк Володимир Павлович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
42	Дагмар Цаганова (Dagmar Caganova) , Prof. M.A., Ph.D., Institute of Industrial Engineering and Management, Faculty of Materials Science and Technology STU, Slovakia
43	Євсюк Микола Миколайович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
44	Хвищун Микола В'ячеславович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
45	Заблоцький Валентин Юрійович , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
46	Селепина Йосип Романович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
47	Мороз Сергій Анатолійович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
48	Лишук Віктор Васильович , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
49	Луньов Сергій Валентинович , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики, Луцький національний технічний університет, Україна.
50	Павло Комада (Paweł Komada) , dr hab. inż., katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Lubelska, Poland

ЗМІСТ	
Kruhliak I., Sereda D., Krivko R. IMPROVING THE DURABILITY OF THE MECHANICAL EQUIPMENT OF THE SHAFT BALANCING SYSTEM OF THE 1680 MILL STAND	6
Sereda B., Udod A. OBTAINING CHROME COATINGS ON STRUCTURAL MATERIALS WORKING IN CONDITIONS OF ULCANIZATION OF NEW HUMOTECHNICAL PRODUCTS	11
Берест В.Ю., Борисов О.В., Лупина Б.І. АКТИВНЕ ІНФРАЧЕРВОНЕ ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ОПТИЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ОСВІТЛЕНОСТІ.	16
Витвицька Л.А., Чуйко М.М., Біліщук В.Б., Витвицький З.Я., Лаврук Х.З. ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ КРОВ'Ю БІОМАТЕРІАЛІВ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ЙОГО КОНТРОЛЮ	27
Денисюк В.Ю. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУЮВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЛАДІВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ	32
Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	38
Кармаліта А.К., Пундик С.І. ВЗАЄМОДІЯ СТРУМЕНІВ ПОВІТРЯ З ПОВЕРХНЕЮ ПЛОСКОЇ ДЕТАЛІ В ПРОЦЕСІ ОРГАНІЗАЦІЇ СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ	45
Криницький О.С., Біліщук В.Б., Середюк О.Є. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ	50
Мазур І.А., Волох В.І., Морозов І.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШЛАКОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЗАГОТОВКАХ ПРИ МАШИННО- БЕЗПЕРЕРВНІЙ РОЗЛИВЦІ СТАЛІ	58
Маркіна Л.М., Смолянкін О.О., Сацик В.О., Решетило О.М. ВИКОРИСТАННЯ ОДНОПЛАТНОГО КОМП'ЮТЕРА RASPBERRY PI ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ФЕРМЕНТАЦІЇ МОЛОКА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СИРУ	65
Мороз С.А., Чалий В.Д., Лишук В.В.,Ткачук А.А., Горайчук А.А. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЧУТЛИВІСТЬ ПРОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЙМАЧІВ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ДАВАЧАХ РУХУ	71
Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А., Ліневич Я.О. АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК НА ПОВЕРХНІ БІО- ТА ШТУЧНИХ ПОЛІМЕРІВ ДЛЯ СЕНСОРІВ ВИГИНУ	76
Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ	85
Сацик В.О., Сацик О.В., Сацик С.І., Решетило О.М. СУЧАСНИЙ СТАН КООРДИНАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В УКРАЇНІ ТА СФЕРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ	92
Світловський Є.В. МОДЕЛІ І АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ ДЛЯ АУДІО-ФАЙЛІВ	99

УДК 621.793.6

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-01

I. Kruhliak, D. Sereda, R. Krivko

Dnipro State Technical University

IMPROVING THE DURABILITY OF THE MECHANICAL EQUIPMENT OF THE SHAFT BALANCING SYSTEM OF THE 1680 MILL STAND

Current article is a research devoted to an important aspect of improving the durability of mechanical equipment of the shaft balancing system of the working stand of mill 1680, used in the cold rolling process. The paper deals with the methods of reinforcement of machine parts and mechanisms necessary to ensure high reliability and durability of industrial equipment used in metallurgical production. Particular attention is paid to the application of functionally active coatings obtained using the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in order to increase wear resistance and reduce energy consumption in operation balancing mechanism. In addition, the article considers the principles of stand operation of rolling mill 1680, including consideration of the features of rolls, supporting rolls, pressure mechanisms and balancing systems, as well as the technology of roll drive and rolling thickness adjustment mechanisms. The final part of the article presents the results of experimental studies on wear resistance of steels with different protective coatings obtained by SHS method, taking into account their microhardness and dependence of wear intensity on the type of alloying, to improve the durability of mechanical equipment.

Key words: production, rolling, durability, self-propagating high-temperature synthesis, pressure mechanism, roller balancing, coating, wear resistance, microhardness.

Problem Statement. The problem statement is to identify the key aspects that need to be addressed in order to improve the durability of mechanical equipment in the conditions of metallurgical production. One of the main challenges is the need to increase the service life of equipment in cold rolling processes, where high mechanical and thermal effects lead to intensive wear. To solve this problem, functional coatings and alloying technologies are actively used to improve the surface characteristics and increase its resistance to wear. However, despite the advances made in this field, it is still unclear which specific factors influence the effectiveness of such coatings and how their application processes can be optimized. It is also important to consider the influence of various manufacturing parameters such as temperature, pressure, speed and material composition on the quality and durability of the coatings. Thus, the main objective is to research and analyze the key factors that determine the performance of functional coatings in a metallurgical manufacturing environment

Analysis of the latest research. Analysis of recent research in the field of functional coatings and alloying technologies to improve the durability of mechanical equipment in metallurgical production allows us to highlight several key directions and results. In recent years, there has been a lot of research devoted to optimizing the composition and structure of functional coatings in order to improve their adhesion, hardness and wear resistance. One of the most promising approaches is the use of alloyed coatings incorporating chromium, silicon and titanium. These materials have high hardness and resistance to abrasive and adhesive wear, making them ideal candidates for metallurgical applications. Considerable attention is also being paid to the study of wear mechanisms and surface-in-contact interactions, allowing for a more accurate determination of factors affecting the durability of coatings. The molecular-mechanical theory of rubbing is widely used to explain the processes occurring during friction and to develop effective methods for reducing wear of surfaces. An important result of research is also the determination of optimal production parameters such as temperature, pressure and speed that maximize the performance of coatings and alloyed materials. This allows optimizing the application processes and improving the quality of the final product. Thus, the analysis of recent research indicates significant progress in the field of functional coatings and alloying technologies for improving the durability of mechanical equipment in metallurgical production, which opens new prospects for the development of this field and improving the efficiency of production processes.

Summary of the main material. Hardening of machine and mechanism parts in industrial engineering for metallurgical production is aimed at ensuring the reliability and durability of rolling

mill parts. To improve the reliability of the pressing mechanism of the 1680 continuous cold rolling mill, it is necessary to harden their surface layer, which is obtained with minimal thermokinetic load and increased surface hardness, which directly affects their wear resistance. The wear resistance of the pressure screws was increased by using functionally active blends that provide minimal hardening costs and a significant reduction in energy consumption.

The use of SHS for the formation of protective coatings is based on the use of powdered exothermic mixtures where there is a strong exothermic interaction of chemical elements in the condensed phase, which is capable of minimal expansion in the form of a combustion wave. SHS is one of the most high-temperature combustion processes ($t = 800-4000\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1-2]. The essence of the SHS method is to carry out exothermic reactions in the mode of combustion wave propagation with the formation of combustion products in the form of compounds and materials that are of practical value and have valuable characteristics [3]. Such synthesis of materials differs significantly from standard methods of powder metallurgy based on sintering of chemically inert compounds and have a number of obvious advantages, among which we can note the following:

- formation of active chemical and thermal zones, which allows to intensify the transformation of reagents and leads to the formation of desired products;
- use of less expensive chemical energy (heat generation during exothermic reactions) instead of electrical energy to achieve high temperatures required for obtaining products;
- use of relatively simple equipment (instead of furnaces and other heating devices);
- use of rapid layer-by-layer heating of large volumes of reagents instead of slow heating through walls from external heat sources.

From this point of view, SHS processes should find practical application in all cases where there are no raw material or economic constraints. The list of materials in which SHS processes are already playing a significant role includes refractory powders, carbide and boride materials, hard alloys, refractory and building materials, oxide charge and single crystals, phosphors and high-temperature superconductors. Many of these materials are produced on an industrial scale with high technological and economic efficiency [4].

The main working body (tool) of a rolling mill are rolls mounted on roller bearings and support rolls mounted on liquid friction bearings. Very high requirements are imposed on the quality of rolled mill rolls, as they determine the nominal operation of the mill, its productivity and the quality of rolled products produced.

The continuous cold rolling mill 1680 consists of four consecutive quarto working stands. The working stand (fig. 1) consists of two massive cast steel stands made of 35L steel, mounted on plates and fixed with anchor bolts. The stands of the working stand are the most responsible parts of the rolling mill, designed to absorb the forces arising during rolling, and also serve as a connecting element for the installation of all mechanisms of the working stand: working and support rolls with pads, pressure mechanism, flat wire table, the platform of the pressure device and hydraulic device for balancing the upper support and working rolls with pads [5].

Rolls work under conditions of continuous abrasion by metal during rolling, experiencing high dynamic pressures at high metal sliding speeds and varying temperatures. High-quality steels containing a minimum amount of impurities are used for manufacturing of working and supporting rolls. Working rolls of the mill are made of 9X2MF steel. The surface of the working roll barrel after hardening has a hardness of 90 to 105 Shore units.

Support rolls of the mill are made of composite: axles are made of 40XH2MA steel, bands are made of 60X2CMF steel. The hardness of the barrels of support rolls is from 70 to 85 Shore units. Rolls are driven by electric motors through intermediate shafts with gear coupling, gear stand and spindle connection. Rolling speed: working speed up to 10 m/s (maximum), tucking speed up to 0.5m/s [6].

In order for the rolling process to run smoothly, the rolls must occupy a certain position in the working stand. For this purpose, the following mechanisms and devices are provided in each working stand of the continuous wide strip cold rolling mill 1680:

- a) vertical positioning of the rolls (pressure mechanisms);
- b) balancing of the upper working roll.

The main purpose of the pressure mechanism of the mill is to regulate the thickness of the rolled product, where it is necessary to compensate for its insignificant but rapidly changing deviations. Figure 1 shows the kinematic diagram of the mill.

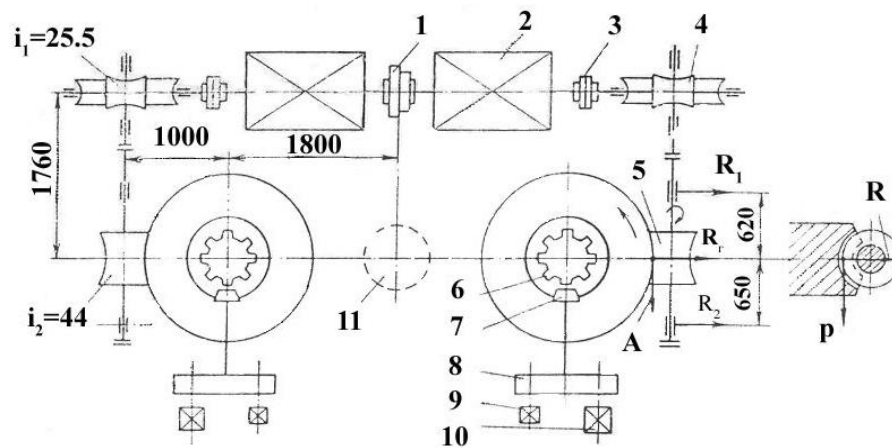


Figure 1 – Pressing mechanism of continuous cold strip mill - 1680 [5-7].

1 - electromagnetic clutch, 2 - electric motor, 3 - gear clutch, 4, 5 - worm globoid reducers, 6 - pressure screws, 7 - bevel gear, 8 - kinematic reducer, 9 - selsyn sensors, 10 - command apparatus

The pressure screws of each stand are driven by two electric motors mounted on the same axis and connected by electromagnetic clutch 1, to ensure joint or separate operation of the pressure screws[7]. Power of electric motors 2,46 kW, with a speed of 625 rpm. Rotation from electric motors to pressure screws 6 is transmitted through gear couplings 3 and worm globoid reducers 4, 5. Control of the pressure screws movement is carried out with the help of selsin-sensor 9 (BD-501).

The upper position of the pressure screw is limited by the command device 10, connected to the hub of the worm wheel through the bevel gear 7 and kinematic reducer 8. The distance between the axes of the pressure screws is 2700 mm. The total ratio from the motor to the pressure screw $i = 1026$. Speed of movement of pressure screws:

- a) with a crimping stroke of 8 mm/min;
- b) in the reverse stroke, 12.2 mm/min.

The rolling force ($P/2$) is transmitted from the screw through the nut to the bed and through the latter to the stand foundation. The screws are made of 40X or 40XM steel grades, which, after forging, have a tensile strength of 700-750 MPa. The diameter of the pressure screw is 560 mm, pitch 12 mm. The pressure mechanism gearbox is mounted in a separate housing on top of the frame [8]. If, in one way or another, the top roll cushions were suspended from the ends of the pressure screws, and the top roll was set only by moving the screws up and down, the following negative phenomena would occur:

- 1) during the idling of the mill under the action of the weight of the top roll and its cushions, gaps would necessarily form between the ends of the pressure screws and their bearings, as well as in the thread of the pressure nut. At the subsequent task of metal into the rolls there would be dynamic loads on the roll journals and on the pressure screws, which would be accompanied by strong shocks;
- 2) the solution between the rolls would never correspond to the required compression due to the unknown value of the specified gaps.

To avoid these negative phenomena, special devices for balancing the top roll and its cushions are provided in the working stands. With the help of such devices, the cushions of the top roll are always tightly pressed against the faces of the pressure screws and no gaps are formed in the connections between the roll neck and the pressure nut.

Balancing of the upper support and working rolls is performed by means of hydraulic system with oil pressure of 105 atm. Pressure in the hydraulic jack system of the support rolls transfer system is 175 atm.

Protective coatings on 40X steel are widely used in mechanical engineering. Therefore, it is of interest to evaluate the wear resistance of steel after protective boron coatings alloyed with chromium, silicon and titanium have been applied to its surface. The high hardness of these coatings and their ability to retain lubricants on the surface leads to an increase in the wear resistance of these materials. The main objective of the wear resistance study is to determine the most favorable operating conditions for parts hardened by the proposed technology using the developed SHS blends.

The nature and intensity of wear of rubbing surfaces are determined by the conditions in which the product operates and by such characteristics of its working surface as roughness, hardness,

presence of a protective coating, etc. In the friction zone of a pair, there are many phenomena of mechanical and physicochemical interaction of materials that determine the nature of wear on their surfaces. These are the processes of strengthening and weakening of the contacting surface areas due to their repeated deformation, heat generation, structure change, oxidation, setting due to micro-welding of irregularities with subsequent erosion, and others. Among the various theories of friction, the molecular-mechanical (or adhesion-deformation) theory stands out, which most fully takes into account the processes occurring during friction [9].

Deformation interaction occurs in areas of contact with rough surfaces and causes repeated deformation of the surface layer by irregularities. Mechanical impact can be in the form of elastic or plastic interaction, as well as micro-cutting. Adhesive interaction occurs when micro-weld bridges are formed in the contact zone. Reducing the intensity and even suppressing wear according to molecular mechanical theory helps to: prevent the formation of strong adhesive bonds in friction pores; increase the hardness of friction surfaces. Applying a durable coating to rubbing surfaces can, on the one hand, form a barrier that prevents adhesion of the mating surfaces, and on the other hand, increase the surface hardness. Increasing the hardness of the coated surface, making it difficult to deform plastically and eliminating microneedling, promotes elastic interaction of the rubbing surfaces, which is most favorable for increasing wear resistance. Hence, it is legitimate to assess the performance of a surface with a hardening coating by its hardness (microhardness). The results of testing steel samples for wear under sliding friction conditions on the SMT-1 friction machine are shown in Fig. 2.

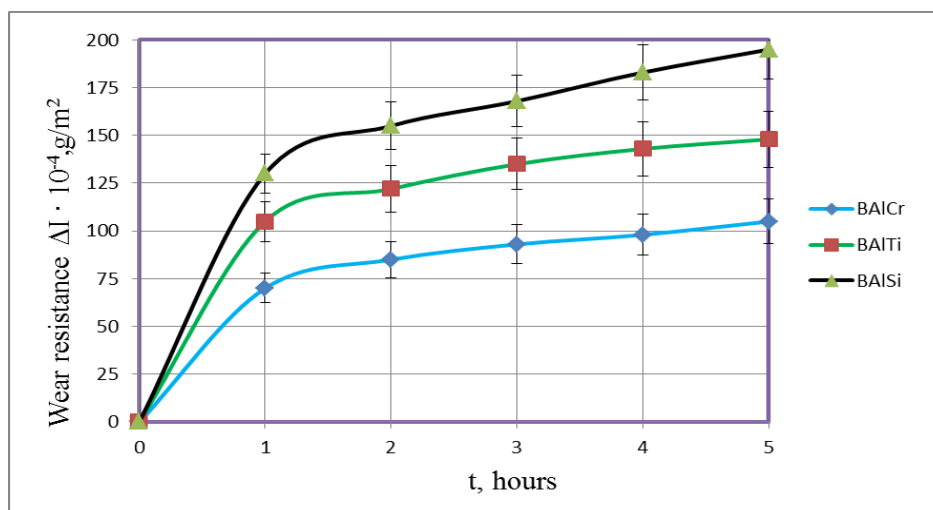


Figure 2 – Wear resistance of coatings on 40X steel obtained under conditions of thermal self-ignition $t_{in} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60\text{ min}$ (test on the friction machine SMT-1)

The wear resistance of the alloyed coatings obtained during testing on the SMT-1 friction machine was determined to depend on the type of alloying, which is described by a fifth-order polynomial depending on the test time. It is proved that the best indicators of wear resistance under sliding friction conditions are protective coatings alloyed with chromium and titanium. Thus, in tests on the SMT-1 machine, protective coatings alloyed with chromium and titanium have a wear value of $\Delta I = 105\text{-}148 \cdot 10^{-4}\text{ g/m}^2$. Their wear resistance is 1.2-1.3 times higher than that of protective coatings obtained under isothermal conditions, which is explained by their higher microhardness values. Thus, the microhardness for coatings obtained under isothermal conditions with titanium alloying $H_{100} = 18600\text{ MPa}$, with silicon alloying $H_{100} = 17800\text{ MPa}$, with chromium alloying $H_{100} = 18200\text{ MPa}$.

Conclusions. After conducting research, it was found that the use of SHS-synthesis-based functional-active charges contributes to a significant increase in the wear resistance of parts of the shaft balancing system of the working stand of the 1680 mill. This important discovery reflects the prospects for the metallurgical industry, offering effective methods to reduce energy costs and increase the durability of equipment. In tests on the SMT-1 machine, protective coatings alloyed with chromium and titanium have a wear value of $\Delta I = 105\text{-}148 \cdot 10^{-4}\text{ g/m}^2$. Their wear resistance is 1.2-1.3 times higher than that of protective coatings obtained under isothermal conditions, which is explained by their higher microhardness values. Thus, the microhardness for coatings obtained under isothermal conditions with titanium alloying $H_{100} = 18600\text{ MPa}$, with chromium alloying $H_{100} = 18200\text{ MPa}$. Thus, the research results not only confirm the effectiveness of the application of these coatings, but

also have broad practical and scientific implications, including the improvement of production processes and competitiveness of enterprises in the metallurgical industry.

References

1. Трефілова Н.В. Аналіз сучасних методів нанесення захисних покриттів // Сучасні наукомісткі технології. 2014. № 10. С. 67–67.
2. Серета Б.П., Банніков Л.П., Нестеренко С.В, Кругляк І.В., Гайдаєнко О.С, Серета Д.Б. Поверхнєве зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. 170с.
3. Sereda B. High-performance chrome coatings to protect against wear and corrosion Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 39–41.
4. Савуляк В.І. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів/ Савуляк В. І., Шенфельд В.Й.// Монографія. Вінниця: ВНТУ. 2016. 124с.
5. Прищип М.Г. Обладнання прокатних цехів Навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форми навчання / Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 116с.
6. Серета Б.П. Обробка металів тиском. Навч. посіб. для студ. ВНЗ / Запорізька держ. інженерна академія. Запоріжжя : [Видавництво Запорізької держ. інж. акад.], 2009. 342 с. Бібліогр.: с. 342. ISBN 978-966-8462-11-5
7. Данченко В.М. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямком "Металургія". 2006. 183 с.
8. Серета Б.П. Прокатне виробництво: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Запорізька держ. інженерна академія. Запоріжжя : Вид-во Запорізької держ. інж. акад. 2008. 310с.
9. Cheiliakh, O.P., Ryabikina, M. A., & Kutsomelia, Y. Y. (2015). Моделювання впливу параметрів дифузійного хромовання на експлуатаційні та фізико-механічні властивості сталей для штампового інструменту. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (29), 56–64.

Ірина Кругляк, Дмитро Серета, Руслан Кривко
Дніпровський державний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ УРІВНОВАЖЕННЯ ВАЛІВ РОБОЧОЇ КЛІТИ СТАНУ 1680

Дослідженням, присвяченим важливому аспекту підвищення довговічності механічного обладнання системи врівноваження валів робочої кліти стану 1680, використовуваного в процесі холодної прокатки. У роботі розглядаються методи посилення деталей машин і механізмів, необхідних для забезпечення високої надійності та довговічності промислового обладнання, що застосовується в металургійному виробництві. Особлива увага приділяється застосуванню функціонально-активних покриттів, одержуваних з використанням методу саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС), з метою підвищення зносостійкості та зниження енерговитрат при експлуатації врівноважуючого механізму. Крім того, у статті представлено докладні описи конструкції та принципів роботи робочої кліти прокатного стану 1680, включно з розглядом особливостей валків, опорних валків, натискних механізмів і систем врівноваження, а також технології приводу валків і механізмів регулювання товщини прокату. У заключній частині статті представлено результати експериментальних досліджень щодо зносостійкості сталей з різними захисними покриттями, отриманими методом SHS, з урахуванням їхньої мікротвердості та залежності інтенсивності зносу від типу легування, що робить роботу актуальною та корисною для практичного застосування в індустріальній сфері.

Ключові слова: виробництво, прокатка, довговічність, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, натискний механізм, врівноваження валків, покриття, зносостійкість, мікротвердість.

УДК 621.793.6

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-02

B. Sereda, A. Udod

Dnipro State Technical University

OBTAINING CHROME COATINGS ON STRUCTURAL MATERIALS WORKING IN CONDITIONS OF VULCANIZATION OF NEW HUMOTECHNICAL PRODUCTS

This work investigated the possibility of obtaining protective coatings, under conditions of self-propagating high-temperature synthesis, on parts of equipment for vulcanizing new rubber products. Research is focused on finding effective ways to strengthen the working surfaces of conditionally important elements of equipment operated in aggressive environments, in particular, press tooling. Given the high requirements for wear and corrosion resistance of such parts, special attention was paid to the choice of composition and coating process parameters. To achieve this goal, various composite materials and application methods were used, and a set of studies was conducted to investigate the properties of the resulting coatings. The results obtained indicate the possibility of successful application of chrome coatings alloyed with silicon, boron, and aluminum for further strengthening and protection of vulcanization equipment parts. The conducted research is relevant for the development of new production technologies and improving the efficiency of operation of press equipment for vulcanization of rubber products

Key words: self-propagating high-temperature synthesis, silicon, boron, chromium, coatings, elastomeric materials, wear resistance, microhardness.

Formulation of the problem. Given the rapid development of technology in Ukraine, the issues of increasing the reliability and durability of machine parts, devices and installations operating under conditions of vulcanization of rubber products have become so urgent. The role of surface hardening processes in the durability of machines and mechanisms has become especially important at the present stage, as the development of machine-building industries is associated with an increase in loads, temperatures and aggressiveness of the environments in which critical parts operate. An effective method of increasing the durability of various parts, which changes the chemical composition, structure and properties of the metal surface layers, is chromium plating using the SHS method [1-4]. An analysis of the literature shows that there are currently many methods of diffusion saturation of the steel surface with chromium and other elements, among which the common one is to perform the saturation process at high temperatures, when the free energy reserve of the system is large enough for diffusion in the solid phase.

Analysis of recent research and publications. This paper analyzes the latest research and publications in the field of formation of protective coatings on metal surfaces under hydrocarbon conditions. In particular, the use of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) technology has made it possible to link the structure of materials formed during combustion to the kinetics of rapid exothermic reactions. Studies have shown that solid flame in its pure form is a rare phenomenon that can occur only in systems with a highly developed contact surface of the reactants. Gaseous SHS coatings have shown better characteristics compared to their analogues, as they have the properties of the applied material and high adhesive strength. According to research, the amount of gaseous reaction products increases with increasing temperature, and condensed products can occur in areas of ultra-high temperatures[5-8].

Obtaining innovative chrome coatings on structural materials operating under conditions of vulcanization of rubber products has proven to be an urgent task in the context of the rapid development of technology in Ukraine. Given the increasing loads and aggressive environment in which critical parts operate, the effectiveness of surface hardening methods has become critical. In particular, diffusion silicification has proven to be an effective method of increasing the durability of various parts by changing their chemical composition, structure and properties [9-11].

Based on the analysis of literature sources, it became known that there are many methods of diffusion saturation of the steel surface with chromium. They include processes that occur at high temperatures, when the free energy of the system is large enough for diffusion in the solid phase. Various methods are used to produce chromium-based coatings, such as in the environment of molten electrolytes, in the gas phase, using powder masses in a neutral or reducing atmosphere.

According to [1-12], there are many methods for diffusion saturation of the steel surface with silicon. Their main common aspect is the implementation of the saturation process at high temperatures, when the free energy of the system is sufficiently large for diffusion to occur in the solid phase. It has been found that self-propagating high-temperature synthesis (SHS) has made it possible to relate the structure of materials formed during combustion to the kinetics of fast exothermic reactions. It is noted in [8] that a solid flame in its pure form is a rare phenomenon and can occur only in systems with a very developed contact surface of the reactants. The study of gaseous SHS coatings shows that they have better characteristics than their analogues, as they have the properties of the applied material and high adhesive strength. It is known that pure rubber is characterized by low mechanical, thermal, chemical and electrical properties.

Setting objectives. The purpose of this study is to develop and improve technologies for obtaining protective coatings on metal surfaces using self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The paper investigates in detail the processes of combustion and formation of protective coatings under SHS conditions, and considers the possibilities of using various components to obtain improved coating properties. The main goal is to optimize the process parameters in order to achieve the most effective coating characteristics.

The influence of temperature, isothermal holding time, and component concentration on the thickness, structure, and properties of the resulting coatings was investigated. The results of the study allow us to develop recommendations for the improvement and practical application of technologies for the formation of protective coatings on metal surfaces. The knowledge gained in this work has significant practical potential and can be used in industrial production to improve the properties of metal structures and increase their service life.

Presenting main material. The coatings coated in SHS-processes, when accompanying gas-transport reactions take place, are very peculiar. They consist of a film of the applied product, as in gas-phase sedimentation (GP), and a wide transition diffusion (gradient) zone, as in diffusion saturation. As a consequence, gas-transport SHS - coatings have the best features of their counterparts - they have the properties of the applied material (i.e. they can be much more wear-resistant or heat-resistant than the base) and high adhesion strength of powders in which the particles of one substance are covered by a layer of another, which provides a sufficiently large specific contact surface of the reactants, if, of course, the particles are small enough. Micron sizes in such conditions are satisfactory. If the particles do not melt, then the interaction between the reactants occurs solid-phase in the regime of reaction diffusion. Low values of mass transfer constants in the solid phase can be compensated by a large contact surface. High temperature is an important intensifying factor. The pure solid flame regime can be realized in the case in which all substances (not only initial and final, but also intermediate substances) are in the solid state.

Determination of reaction products allows us to model the process of formation of protective layers under SHS conditions, and on the basis of calculation of adiabatic combustion temperatures of SHS systems we can solve the heat balance equation of the systems under consideration.

In the work, samples from mass-produced steels 20, steel 45, U8, 40X, 40X16M were used for coating. As reaction agents, mixtures of powders with a dispersion of 60-250 microns of the following materials were used: chromium, silicon, boron, aluminum oxide, aluminum, iodine, ammonium fluoride. In determining the required dispersion of reagents, we were guided by studies that showed that the maximum transformation completeness is observed when using a reaction mixture with a fraction of 100-120 microns. The protective coatings on the samples under SHS conditions were obtained using the developed pilot plant DSTU12, consisting of the following main functional systems: reaction equipment; system for monitoring and controlling technological parameters; gas utilization system.

Today, composite materials (rubbers, rubber) based on natural and artificial rubber have become an integral part of the metallurgical, textile and chemical industries. The use of rubbers makes it possible to produce structural and tribotechnical products characterized by enhanced damping properties, high elasticity and corrosion resistance. In addition, the use of rubbers instead of metals reduces the material consumption of structures and machines, shortens the production time of parts (even those with complex configurations), and increases corrosion resistance. The pressing was carried out on a hydraulic vulcanization press 100-400 2E. with plate sizes 400x400 of new elastomeric materials based on a copolymer of vinyl di-fluoride and hexopropylene, ethylene-propylene rubber, containing carbonized fiber from PAN (polyacrylonitrile), stone (granite) flour, aluminosilicate microspheres as Np. Rubber is a mixture of substances, the main component of which is natural or

artificial rubber. It is known that pure rubber is characterized by low mechanical, thermal, chemical and electrical properties. Effective fillers for natural and artificial rubbers include clay, carbon black, modified montmorillonite octadecylamine (organo-MMT), silica (SiO_2), aluminosilicate hollow microspheres (ASM), industrial carbon.

The existence of temperature limits to which the propagation of the combustion front is possible introduces certain restrictions on the use of the combustion mode as a technological mode. On the contrary, the thermal autoignition mode is free from these limitations. By diluting the initial powder mixture with an inert substance up to 85-90% wt. %, it is possible to reduce the maximum temperature of the process to the technologically necessary temperatures.

The main compounds in the gas phase in the temperature range of 400 - 1600 K are as follows: SiCl , SiCl_2 , SiCl_3 , SiCl_4 , SiJ_2 , SiJ_3 , AlJ , AlJ_2 , AlCl , AlCl_2 , CrCl_2 , CrF , CrF_2 , CrF_4 , BF_3 , TiCl_2 , TiCl_3 , TiCl_4 , as well as iodine in atomic and molecular form.

With increasing temperature, the amount of products in the gaseous phase increases and condensed products are released. Characteristically, in the temperature range of 400-1600 K the share of condensed phase decreases, which is associated with the evaporation of the carriers used. Simultaneously, starting from the temperature of 800 K, the decomposition of reaction products occurs, which confirms the appearance of decomposition products and a sharp increase in the number of moles of gas. The gaseous products interact with the elements of the powder system (Al, Si, B, Ti, W, Cr) and transfer them to the gas phase (appearing SiCl , SiCl_2 , SiCl_3 , SiCl_4 , SiJ_2 , SiJ_3 , AlCl , AlCl_2 , AlCl_3 , BF_3 , CrF , CrF_2 , CrF_4 , TiCl_2 , TiCl_3 , TiCl_4 , AlJ and others). At temperatures above 800 K, the fraction of condensed phase practically does not change. This fact suggests that in the temperature range of 800-1600 K reactions with the release of condensed phase occur, but without changing the number of moles, which is characteristic of decomposition reactions, disproportionation, or eCrChange with the substrate, i.e. essentially there is a chemical transport of elements.

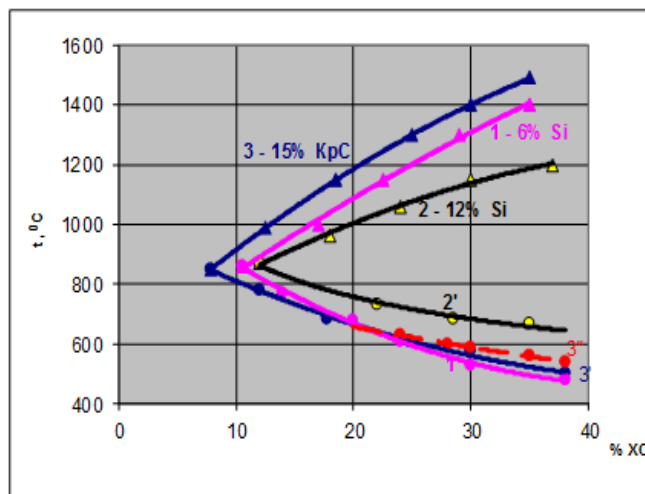


Figure 1 – Dependence of autoignition temperature (t^*) and maximum temperature (t_m) on CrC content for the system $n\text{CrC} + 8\text{Si} + 6\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{I}_2$: 1, 1' - 6% wt., Si; 2, 2' - 12% wt., Si and for the system: $n\text{CrC} + 15\text{SiC} + 6\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{I}_2$, curves 3, 3', 3''

Aluminum powder, chromium oxide, chromium oxide, aluminum oxide, aluminum oxide, crystalline silicon, silicon oxide, ammonium chloride, and metallic iodine were used to obtain chromoaluminosilicized coatings. To carry out the joint surface saturation of chromium, aluminum, and silicon, the content of crystalline silicon was selected up to 7% wt%, and the siliceous component (SiC) up to 20%. As can be seen from the literature [11], at higher silicon content, predominantly silicification takes place. The dependence of ignition temperature (t^*) and maximum temperature (t_m) on CrC is shown in fig. 1. The use of silicon component (curve 3) leads to the occurrence of double ignition (3', 3''), which is caused by the beginning of the reaction of aluminum reduction by silicon oxide. The overall temperature rise of the process, when using the silicon component is higher than using only the chromium component, which indicates the higher thermal characteristics of the mixture. Optimal compositions of SHS - mixtures for chromoaluminosilicification, obtained because of graphical optimization for the thermal autoignition condition.

The influence of process temperature and isothermal holding time on the thickness of the siliconized layer doped with chromium and aluminum. The variation of the layer depth as a function of temperature and saturation time deviates from the exponential and parabolic law characteristic of purely diffusion kinetics. This is probably due to the fact that the absolute value of concentrations and the ratio between the number of diffusion atoms of chromium, aluminum and silicon changes with increasing temperature, which in turn leads to a change in the limiting concentrations that cause phase recrystallization, and also changes the diffusion rate of each of the elements.

Powders of aluminum oxide, chromium oxide, crystalline silicon, silicon oxide, silicon oxide, titanium, aluminum, and crystalline iodine were used to obtain multicomponent chromium-doped coatings doped with Si, Al B, and Ti. When the surface was saturated with chromium, aluminum and titanium, the content of crystalline silicon was: 7.5% wt. and SiC 15% wt. At higher silicon content, predominantly silicification takes place. The dependence of autoignition temperature (t^*) and maximum temperature (t_m) on CrC content is shown in Fig. 1. As can be seen, when using SiC, there is an increase in the maximum temperature and the occurrence of the point of secondary temperature rise, which is due to the reaction of aluminum reduction by silicon oxide. The optimal amount of gas-transporting agent: J_2 - 2%, NH_4Cl - 3%.

Microhardness of multicomponent chromium alloyed layers doped with silicon, aluminum on technical iron and steel 20 is within 7100 - 8200 MPa, on steel 45 and U8A it reaches 15000 - 16800 MPa, which is associated with the formation of carbide phases of chromium type $(Cr,Fe)_3C_2$. The character of microhardness variation by thickness of protective layers is shown in fig. 2.

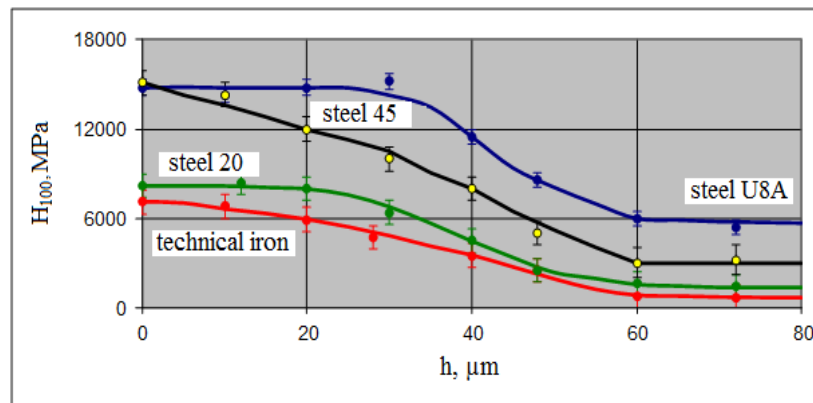


Figure 2 – Variation of microhardness of chrome layers doped with silicon and aluminum as a function of layer depth: $t_n = 1000$ °C, $t_b = 60$ min.

Conclusions. After analyzing the latest research and publications on chromium plating, the purpose of this study was to develop and improve methods for protecting metal structures used in the vulcanization of rubber products using innovative chrome coatings. The main attention was paid to the study of surface hardening and diffusion saturation processes, in particular the use of self-propagating high-temperature synthesis. The experimental results showed that the obtained coatings have increased strength and resistance to aggressive environments, and are able to maintain their properties for a long time. The research objectives included analyzing the effect of various methods of diffusion saturation of the steel surface with silicon on the formation of the coating structure and its properties, developing the optimal composition and process mode, and studying the mechanisms of interaction between the system components during the formation of the protective layer. We obtained a chromium-alloyed coating alloyed with silicon, aluminum, titanium, and boron. The aim of the study was to strengthen the working surfaces of parts operated in aggressive conditions on equipment for vulcanization of products made of new elastomeric materials based on a copolymer of vinyl develfluoride and hexopropylene, ethylene-propylene rubber. The surface microhardness of boron-doped multicomponent chrome layers is 20000-22000 MPa, which is due to the presence of the FeB phase. The microhardness of the Fe2B alloyed phase is 15000-16000 MPa. The obtained results indicate that silicon is displaced from the boride zone to the sublayer of the α -phase, alloying only the Fe2B phase. Based on the results, it can be concluded that chrome coatings are effective in protecting metal structures under conditions of vulcanization of rubber products. The data obtained provide a basis for the transition from theoretical calculations to practical applications in industry, ensuring an increase in the quality and service life of press tooling.

References

1. Трефілова Н.В. Аналіз сучасних методів нанесення захисних покриттів / Сучасні наукоємні технології. 2014. № 10. С. 67–67.
2. Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Б.П. Серета, Л.П. Банніков, С.В. Нестеренко, І.В. Кругляк, О.С. Гайдаєнко, Д.Б. Серета – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. 170с.
3. Sereda V. High-performance chrome coatings to protect against wear and corrosion Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 39–41.
4. Воєводин В.Н., Змії В.І., Руденський С.Г. Високотемпературні жаростійкі покриття для захисту тугоплавких металів та їх сплавів / Порошкова металургія. Київ. НАН України. 2017. 03(04). С. 100-117.
5. Домбровській Ю.М., Степанов М.С. Нові аспекти хіміко-термічної обробки металів в порошкових середовищах / Вісник ДГТУ. 2011. № 8(59). С. 1217–1221
6. Савуляк В. І., Шенфельд В.Й. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів / Монографія. Вінниця: ВНТУ, 2016. 124с.
7. Нові комбіновані методи оброблення робочих поверхонь деталей машинобудування (із застосуванням нейросітьового аналізу) : монографія / С. В. Ковалевський [та ін.]. Краматорськ : ДДМА, 2013.196 с.
8. Хижняк В.Г. Хижняк В.Г. Дифузійні покриття за участю титану, алюмінію та кремнію на сталі 12Х18Н10Т / Хижняк В.Г., Аршук М.В., Дацюк О.Е. // Наукові вісті. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – № 5 (97). С. 84–88.
9. Сахненко М.Д. Ресурсозаощаджувальна технологія відновлення зношених деталей / М. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Г. В. Каракуркчі, І. Ю. Єрмоленко, С. І. Зюбанова // Інтегровані технології та енергозбереження. 2013. № 2. С. 9–13.
10. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – К.:ВПІ ВПК «Політехніка». 2006. 328с.
11. Лазаренко, Н.М. Дифузійне хромування сталей та твердих сплавів [Текст] / Н.М. Лазаренко, Н.І. Васянович, А.І. Дегула // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18-22 квітня 2011 року / Ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. Суми : СумДУ, 2011. Ч.2. С. 111.
12. Cheiliakh, O. P., Ryabikina, M. A., & Kutsomelia, Y. Y. (2015). Моделювання впливу параметрів дифузійного хромування на експлуатаційні та фізико-механічні властивості сталей для штампового інструменту. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (29). С 56–64.

Борис Серета, Андрій Удод

Dnipro State Technical University

ОТРИМАННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ НА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ВУЛКАНІЗАЦІЇ НОВИХ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ

У даній роботі досліджувалася можливість отримання захисних покриттів, в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, на деталях обладнання для вулканізації нових гумотехнічних виробів. Дослідження спрямоване на пошук ефективних шляхів зміцнення робочих поверхонь умовно важливих елементів обладнання, що експлуатуються в агресивних умовах, зокрема, пресової оснастки. Враховуючи високі вимоги до зносостійкості та корозійної стійкості таких деталей, особлива увага приділялася вибору складу та параметрів процесу отримання покриття. Для досягнення цієї мети було використано різні композиційні матеріали та методи нанесення, а також проведено комплекс досліджень з вивчення властивостей отриманих покриттів. Отримані результати свідчать про можливість успішного застосування хромованих покриттів, легованих кремнієм, бором, алюмінієм для подальшого зміцнення та захисту деталей вулканізаційного обладнання. Проведені дослідження, є актуальними для розробки нових технологій виробництва та підвищення ефективності експлуатації пресової оснастки для вулканізації гумотехнічних виробів.

Ключові слова: саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, кремній, бор, хром, покриття, еластомерні матеріали, зносостійкість, мікротвердість.

УДК 351.81, 621.3.089, 621.397

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-03

Берест В.Ю., Борисов О.В., Лупина Б.І.

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

АКТИВНЕ ІНФРАЧЕРВОНЕ ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ОПТИЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ОСВІТЛЕНОСТІ.

Досліджено вплив режимів підсвічування об'єкта джерелом ближнього інфрачервоного випромінювання на оптичні характеристики зображень, отриманих в умовах низького рівня або повної відсутності освітленості зони спостереження. Для отримання та аналізу зображень вибрано роботизовану відеокамеру моделі Reolink E1 Outdoor PoE, оснащену кремнієвою КМОН матрицею роздільної здатності 8 МП та вбудованими підсвічуючими прожекторами у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні. Проведено фіксацію зображень в специфічних умовах підсвічування об'єкта додатковим зовнішнім джерелом з врахуванням спектральної характеристики чутливості приймача для низки оптичних та електричних характеристик випромінювачів: стробованих параметрів живлення та підсвічувачів різної довжини хвилі. В якості додаткових зовнішніх освітлювачів експериментальної частини роботи використано світлодіоди з максимумом інтенсивності на довжині хвилі 850 нм (OSRAM, модель SFH 4556) та 940 нм (Everlight, модель IR928-6C-F). Для реалізації низки електричних режимів освітлювачів в роботі використано платформу для розробки віртуальних інструментів NI ELVIS II, розроблено власний драйвер світлодіодів на основі операційного підсилювача та транзисторного каскаду з регульованими параметрами імпульсного підсвічування: амплітудою, частотою, скважністю. Об'єктивну оцінку якості зображення тестової мішені Standard Layout Chart стандарту USAF 1951 в частині яскравості, контрастності, різкості, шумів виконано з використанням розробленого в роботі програмного пакету. Отримані результати показали, що режим додаткового підсвічування в ближньому інфрачервоному діапазоні має значні резерви в сенсі оптимізації енергоспоживання автономного джерела живлення системи відеоспостереження без суттєвої втрати якості отриманого зображення і функціональності камери. Встановлені кореляції параметрів зображення мають суттєве значення для вибору оптимальних режимів підсвічування з точки зору оптимізації енергоспоживання для комплектів з автономними джерелами живлення в залежності від конкретних застосувань, зокрема для мобільного комплексу відеоспостереження.

Ключові слова: активне інфрачервоне підсвічування, напівпровідникові сенсори зображення, камера відеоспостереження.

Постановка проблеми. Отримання достатньо якісного зображення об'єкта в умовах його низької природної освітленості - традиційна задача в різноманітних галузях життєдіяльності: в наукових дослідженнях; системах відеонагляду за територією з вимогою цілодобової повнофункціональної експлуатації камер відеоспостереження, включаючи приховане виявлення та запобігання несанкціонованого доступу в нічний час; задачах ідентифікації рухомих об'єктів, наприклад, транспортних засобів за номерними знаками; розв'язанні подібних побутових задач оцінки сценарію розвитку подій всередині житлових приміщень і офісів, тощо [1-4]. Сучасні споживчі відеокамери пропонують високу чутливість матричних приймачів, високу роздільну здатність і частоту кадрів за прийнятною ціною [5-12]. Інтегровані функції програмного забезпечення надають можливість вибору: передавати відеопослідовність у режимі реального часу на реєстратор або мережевий комп'ютер чи зберігати інформацію безпосередньо на елементі пам'яті камери, роблячи їх використання портативним.

Виклики останнього періоду критично розширили сферу експлуатації подібних систем в Україні в індивідуальних мобільних застосунках спеціального призначення для візуальної орієнтації рухомих платформ на місцевості в умовах не бажаного використання традиційних систем підсвічування у видимому для людського ока оптичному діапазоні [13-24]. Додаткове підсвічування в ближньому інфрачервоному оптичному діапазоні поза межами видимості людського ока наразі стає все більш актуальним інструментом, що відкриває низку інноваційних можливостей і формує перспективний напрямок розробок систем розширеної функціональності

© Берест В.Ю., Борисов О.В., Лупина Б.І.

на основі комерційно доступних камер відеоспостереження і пристроїв підсвічування. Вимоги подовження терміну використання акумуляторної батареї між перезарядкою вимагає оптимізації режиму енергоспоживання подібних мобільних систем, в яких прожектор підсвічування є основним енергозатратним вузлом. Обмежена доступна потужність режиму живлення функції Power over Ethernet (PoE) у мережевих камерах і істотне підвищення температури корпусу з вбудованими підсвічуючими вузлами також обмежує можливості підвищення якості зображення шляхом виділення більшої потужності системі освітлення [25, 26].

Незважаючи на наявність на ринку України значної кількості комерційно доступних продуктів – камер відеоспостереження з вбудованим інфрачервоним підсвічуванням та окремих світлодіодних матричних прожекторів переважно на довжину хвилі випромінювання близько 850 нм та 940 нм, у вітчизняній науково-технічній літературі спостерігається критично низька кількість публікацій на цю тему. Наразі бракує результатів досліджень, що давали б обґрунтовані практично важливі інженерні рекомендації стосовно окремих важливих аспектів експлуатації подібних систем, оптимального режиму живлення освітлювача та його конфігурації з метою зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації електричних режимів та спектральних характеристик пари «випромінювач – чутливий елемент фотоприймача». Ця робота є спробою започаткувати усунення дефіциту практично важливої технічної інформації в описаній галузі.

Мета та основне завдання дослідження. Метою даного дослідження є аналіз режимів інфрачервоного підсвічування об'єкта в умовах його критично низької чи повної відсутності природної освітленості для отримання зображення, придатного для наступного суб'єктивного сприйняття і оперативного використання оператором в задачах орієнтації на місцевості, а також об'єктивного аналізу програмними засобами. Важливою додатковою умовою режиму підсвічування може бути низька або повна відсутність чутливості людського ока до спектрального складу підсвічуючого випромінювання. Результати дослідження є актуальними в аспекті формування рекомендацій прихованого використання мобільного пристрою відеоспостереження з зовнішнім інфрачервоним підсвічуванням та енергоефективного використання його акумуляторної батареї.

Аналіз літературних джерел за темою дослідження. На поточний момент спостерігається широкий вибір моделей функціональних камер відеоспостереження від провідних світових виробників на вітчизняному ринку і одночасно значна кількість публікацій на тему розширення функціональності цих пристроїв в англomовному науково-технічному середовищі [1-4]. В Україні активно представлені висококваліфіковані учасники ринку надання послуг, як правило – авторизовані на виконання робіт із монтажу та сервісного обслуговування систем відеонагляду відповідно до технічної документації та рекомендацій виробників. В той же час, в українomовному технічному середовищі маємо констатувати критично низьку кількість публікацій про результати пошукових науково-дослідних робіт із розширення функціональності подібних систем, що базувалися б на елементній базі, комерційно доступній на вітчизняному ринку. Актуальними є потреби активізації робіт в цьому напрямку, включаючи підготовку кваліфікованих кадрів в навчальних закладах належних освітніх рівнів відповідно до викликів останнього часу з орієнтацією на сегмент технічних пристроїв спеціального призначення.

Аналіз алгоритмів зчитування в матрицях зображення. Фотоприймальна кремнієва матриця як ПЗЗ, так і КМОН, традиційно має значно ширший діапазон спектральної чутливості в порівнянні з людським оком - від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного випромінювання включно. В спектральному діапазоні її чутливості наявна вагома складова ближнього інфрачервоного світла; типова матриця камери може реагувати на фотони з довжиною хвилі до 1100 нм [12, 13, 29]. Формування інформаційного потоку починається з аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів зображення від первинного перетворювача - матриці фотоелектричних сенсорів. Перетворення кольорового сигналу зображення з аналогової форми в цифрову передбачає дискретизацію в часі та квантування за рівнем; після аналого-цифрового перетворення отриманий сигнал зображення підлягає кодуванню (стисненню). Частота дискретизації сигналу повинна не менше ніж вдвічі перевищувати верхню частоту інформаційного спектру сигналу, інакше ймовірне виникнення значних спотворень зображення в процесі аналого-цифрового перетворення.

Матриці комплементарних металооксидних напівпровідникових (КМОН) світлочутливих сенсорів (англ. Complementary Metal Oxide Semiconductors, CMOS) та матриці світлочутливих пристроїв із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (англ. Charge Coupled Devices, CCD) є двома провідними технологіями сенсорів зображення сучасних оптоелектронних систем. ПЗЗ сенсори традиційно

відрізняються кращою якістю зображення, вищою чутливістю та роздільною здатністю, також меншим рівнем шуму, а отже ширшим динамічним діапазоном вхідного сигналу. Крім того, більш зрілий виробничий процес робить ПЗЗ виграшними для додатків, які не можуть поставити під сумнів чи загрозу якість зображення. Навпаки, сенсорні матриці КМОН споживають менше енергії, технологія їх виробництва більш економна та надає гнучкість щодо алгоритмів вибіркового зчитування окремих пікселів. У звіті Wiley Industry News за 2022 рік ПЗЗ матриці наразі вважаються домінуючими на ринку з покриттям близько 75% обсягу. Проте КМОН швидко вдосконалюється і завойовує все більшу частку ринку. Останні розробки розширили можливості обох технологій. Сенсори ПЗЗ все ще мають покращений вихідний сигнал, вищу чутливість і якість зображення.

В технічних аспектах матриці світлочутливих сенсорів КМОН та ПЗЗ принципово відрізняються своєю архітектурою, алгоритмами фіксації і зчитування зображення. У ПЗЗ сенсорі заряд просторово переноситься через увесь чіп матриці і зчитується в одному куті масиву. Єдиний аналого-цифровий перетворювач ПЗЗ матриці послідовно трансформує кожен піксель зображення в цифровий код. Навпаки, кожен сенсор матриці КМОН (піксель) має кілька транзисторів, які одночасно надають доступ до пікселя, підсилюють заряд і транспортують його до індивідуального для кожного пікселя аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Підхід КМОН більш гнучкий, оскільки кожен піксель можна зчитувати і обробляти окремо чи в складі вибраного фрагменту зображення.

Відомі алгоритми фіксації зображення з матриці в загальному випадку передбачають наступні режими зчитування:

- режим рухомого затвора (англ. rolling shutter) – метод формування зображення, при якому кадр зчитується не як миттєвий знімок, а як послідовне в часі сканування площини матриці рядок за рядком горизонтально або стовпчик за стовпчиком вертикально. Метод «rolling shutter» виконується шляхом умовного «прокручування щілини електронного затвора» по площині світлочутливого матричного сенсора, на який протягом певного проміжку часу відбувається експонування зображення. Перевагою такого методу є те, що КМОН сенсор зображення може продовжувати реєструвати фотони світлового потоку протягом всього процесу експонування, таким чином збільшуючи світлочутливість. При цьому, оскільки не всі частини зображення фіксуються в один і той самий момент часу; динамічний фрагмент, відображений як єдине ціле в результуючому знімку, може бути спотвореним, розмитим за рахунок руху об'єкту зйомки відносно камери.

Таким чином, хоча кожен рядок в кадрі зчитується за однаковий проміжок часу, однак початок зчитування відбувається в різний час, що призводить до зсуву зчитування окремих рядків. Кінцева частота кадрів буде залежати від того, з якою швидкістю завершується повне зчитування одного кадру. Такий режим зчитування називається режимом рухомого затвору (англ. rolling shutter), схему якого показано нижче на рис. 1.

Для КМОН-матриці у режимі рухомого затвору частота кадрів визначається швидкістю аналого-цифрового перетворення одного рядка інформаційного сигналу (тактова частота АЦП), помноженою на кількість рядків матриці сенсора. Наприклад, для КМОН-камери, яка має тактову частоту 283 МГц із 1080 рядками пікселів, час зчитування одного рядка і, отже, затримка між зчитуванням двох сусідніх рядків становить приблизно 8,7 мкс. З 1080 рядками затримка початку експозиції та часу зчитування від верхньої частини кадру до нижньої становить приблизно 10 мс. Це відповідає максимальній частоті кадрів 100 кадрів за секунду і мінімальній часовій роздільній здатності у повному кадрі 10 мс.

КМОН сенсор має набір (масив) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), кожен з яких обслуговує окремий стовпець пікселів. Масив АЦП одночасно оцифровує один стовпець і робить цифровий вихід доступним для аналізу, перш ніж перейти до оцифровування наступного рядка. Затримка між зчитуванням різних рядків змушує реєструвати світло (збирати фотони) у децю інший час в кожному з рядків зображення (з інтервалом приблизно 14,82 мкс при частоті кадрів 60 кадрів/с в режимі високої роздільної здатності full HD), що зрештою створить артефакт рухомих затворів. Цей ефект буде більш вираженим для захоплення зображення більш швидких об'єктів. Режим глобального затвору (англ. global shutter), на противагу описаному вище режиму рухомого затвору, передбачає зчитування всього кадру як цілого в єдиний момент часу. ПЗЗ-сенсори в цьому аспекті є альтернативою КМОН-сенсорам, оскільки вони зазвичай використовують саме тип затвору global shutter, завдяки чому знімки відображають цілісну візуальну сцену в єдиний момент часу і не потерпають від цифрових артефактів руху.

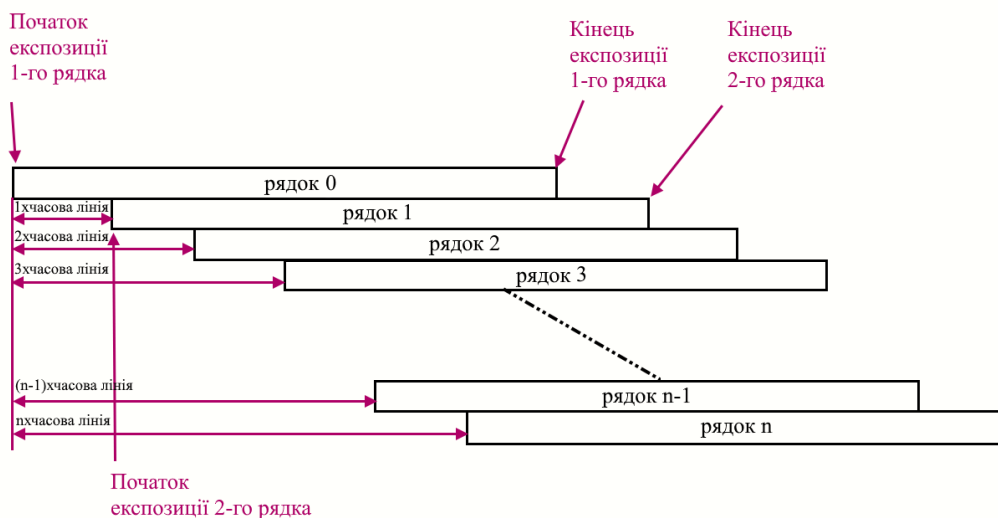


Рисунок 1 – Формування затримки у часі між кожним зчитуванням рядка пікселів матриці КМОН у режимі зчитування з рухомих затвором (англ. rolling shutter)

Поки що пристрої із зарядовим зв'язком все ще досягають вищої якості, створюють зображення з меншим рівнем шуму та пропонують вищу чутливість. Їхній виробничий процес більш зрілий і досконалий; вони мають вищу роздільну здатність. Тим не менш, КМОН сенсори також мають свої переваги: КМОН матриці традиційно споживають менше електроенергії, вони менш дорогі у виробництві, а ефект розмивання поступово усувається. КМОН сенсорю зображення властива висока чутливість в ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Активний тип кожного КМОН фоточутливого елемента зчитування зображення (active pixel sensor, APS) включає вбудований генератор синхронізації, генератор зміщення, підсилювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Для захоплення зображення кожен піксель ПЗЗ матриці включає два основні компоненти: світлочутливу область, відому як фотоактивну область, і область передачі, відому як регістр зсуву. Зображення захоплюється у фотоактивній області масивом конденсаторів. Кожен конденсатор у масиві накопичує електричний заряд залежно від інтенсивності світла, отриманого від відповідної області зображення. Камери з лінійним скануванням, які знімають один «шматочок» зображення рядка матриці, використовують одновимірний масив, тоді як відеокамери та фотокамери, які знімають повні зображення, використовують двовимірний 2D масив. Після того як конденсатори ПЗЗ матриці зберуть заряди, що відповідають сигналу зображення на пікселі, керуюча схема ініціює процес передачі заряду від кожного конденсатора до сусіднього, реалізуючи тим самим регістр зсуву в дії. Останній конденсатор в масиві передає заряд до підсилювача для перетворення в сигнал аналогової напруги і далі на вхід АЦП. Цей процес повторюється, дозволяючи схемі керування перетворювати весь вміст напівпровідникового масиву сенсора в послідовність напруг. Цифрові пристрої працюють шляхом вибірки цих напруг, перетворених у цифрову форму, та зберігають у своїй пам'яті. З іншого боку, аналогові пристрої обробляють напруги в формі аналогового сигналу (наприклад, пропускаючи через фільтр низьких частот) і далі обробляють або передають їх.

Більшість камер на користувачьому ринку використовують саме метод «rolling shutter». Для матриці зі звичайним масивом фільтрів червоного, двох зелених та синього кольорів кожного пікселя (Red, Green + Green, Blue; RGGB) світло ближнього інфрачервоного діапазону (Near InfraRed; NIR) при слабкому освітленні у видимому діапазоні часто погіршує якість повнокольорового зображення, тому в режимі денної зйомки зазвичай використовується загальний для матриці блокуючий фільтр на довгохвильову частину спектру. І навпаки, навіть якщо вікно матриці не блокує інформацію діапазону NIR, неможливо отримати інформацію в інфрачервоній частині спектру з традиційної матриці RGGB. Для того, щоб отримати інформацію як у видимому, так і в ближньому інфрачервоному діапазонах з однієї матриці, потрібна додаткова функціональність її сенсора з чотирма спектральними складовими: три складові RGB та одна NIR. Однак, оскільки існують перехресні перешкоди між кожним каналом, тому знадобляться додаткові алгоритми поділу спектральних діапазонів, щоб одночасно отримати інформацію про NIR, червоний, зелений і синій з одного зображення [2, 3].

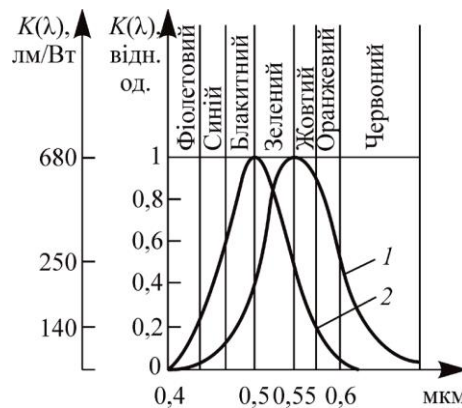


Рисунок 2 – Спектральна характеристика чутливості людського ока для денного (1) та нічного (2) зору [29]

З розвитком традиційної технології отримання кольорового зображення методом лінійного сканування матриці з кольорами RGGB з'являються альтернативні пропозиції з наступними чотирма спектральними діапазонами: червоним, зеленим, синім і ближнім інфрачервоним (RGB-NIR). В наукових літературних джерелах повідомляється про дослідження і розробки в цьому напрямку; дані RGB-NIR вводяться безпосередньо в алгоритми обробки і покращення зображення для обчислення 4D-даних; у цих випадках включається надлишкова інформація, а висока кореляція між діапазонами призводить до неможливості повністю використовувати характеристики даних RGB-NIR. Для досягнення результату дослідниками пропонується двоканальний алгоритм згорткової нейронної мережі (Convolution Neural Network, CNN), який враховує сильну кореляцію між смугами R, G і B і слабшу кореляцію між NIR і трьома смугами R, G, і B. Спочатку характеристики діапазонів RGB і NIR обчислюються в двох різних мережах CNN, а потім об'єднання функцій виконується на наступному рівні. Завдяки поєднанню двох нейронних мереж RGB-CNN і NIR-CNN повною мірою використовуються відповідні характеристики даних RGB-NIR.

Двома основними перешкодами для повнофункціонального використання комерційно доступних споживчих відеокамер у програмах стробоскопічного підсвічування є наступні фактори:

- відсутність апаратних засобів для синхронізації процесів фіксації кадру, що може призводити до помилкового градієнту освітленості зображення по площі при використанні зовнішніх стробованих підсвічувачів;

- використання режиму «рухомого» затвору при фіксації зображення (режим «scrolling shutter»), що передбачає часовий зсув між фіксацією окремих елементів кадру (окремі лінії сканування – рядки - в кадрі реєструються з деяким часовим зсувом в межах інтервалу експозиції) і може призводити до динамічних спотворень зображення у результуючому відеосигналі.

Використання ПЗЗ все ще поширене на сьогоднішній день через його високу якість зображення та низький рівень шуму зчитування. Обидві технології наразі продовжують розвиватися. Поки що сенсори ПЗЗ все ще мають вищу якість зображення та менший рівень шуму, тоді як КМОН стабільно покращують характеристики з точки зору енергоспоживання та усунення ефектів небажаного розмазування зображень рухомих об'єктів. Завдяки можливості вибору режиму глобального затвора для КМОН матриць, вони продовжують наздоганяти матриці ПЗЗ за комплексом характеристик. Однак, за умови усунення артефактів спотворення динамічного кадру, пов'язаних із ефектом рухомого затвора (rolling shutter) та з використанням КМОН сенсорів з режимом глобального затвора (global shutter), прогнозується зростання їх впровадження в комерційний сектор ринку. Технологія ПЗЗ має застосування в дослідженнях та випадках критичного контролю, де висока якість зображення та довший час експозиції є основною вимогою і обґрунтованою нормою. Ключова перевага ПЗЗ тут — менший темновий струм. Паралельно зростає попит на технологію КМОН у таких сферах масового застосування, як автоматизований контроль, 3D-сканування, управління трафіком. Ключовою перевагою КМОН є менше енергоспоживання та загальна вартість.

Методи оцінки якості зображення. Серед методів оцінки якості зображень виділяють групи, що передбачають суб'єктивні та об'єктивні підходи:

- методи, які враховують особливості сприйняття зображення людиною;
- методи, що враховують кількісно вимірні особливості зображення (контрастність, різкість, відношення сигнал-шум).

Методи першої групи більше орієнтовані на суб'єктивні результати оцінки якості зображення; ймовірно, вони більш наближені до умов використання зображення оператором, і в цьому їх цінність. Однак вони складні в реалізації, потребують значних організаційних зусиль та обчислювальних потужностей. Методи другої групи простіші в організаційній складовій реалізації, однак результати оцінювання якості за цими методами не завжди корелюють з суб'єктивними. Для виділення із множини об'єктивних методів вимірювання якості зображень потрібного набору, який можна надалі застосувати у власних експериментальних дослідженнях, варто застосувати низку класифікаційних критеріїв: обчислювальна складність, відповідність суб'єктивним оцінкам, необхідність використання еталонного зображення, доступна апаратна і програмна реалізації, тощо.

Експериментальна частина дослідження. З метою проведення експериментальних досліджень в роботі обрано сучасну роботизовану (поворотну варіофокальну) камеру моделі Reolink E1 Outdoor [30] (вбудовані функції панорамування, нахилу та «зуму» - Pan, Tilt, Zoom, PZT) з можливістю альтернативного живлення або від джерела постійного струму 12 В, 1 А, або через мережевий кабель Ethernet в стандарті IEEE 802.3af, 48 V Active (Power on Ethernet, PoE). Вона оснащена якісним сенсором зображення - КМОН матрицею (CMOS Sensors) з роздільною здатністю 3840 x 2160 елементів зображення – 8 мегапікселів при частоті кадрів 25 кадрів за секунду та об'єктивом із 3-кратним оптичним масштабуванням («зумом»), що забезпечує можливість спостереження дрібних об'єктів та високоякісне зображення на значній відстані. Камера оснащена варіофокальним моторизованим об'єктивом з фокусною відстанню $f = 2.8 \div 8$ mm (zoom module), вбудованим прожектором нічного інфрачервоного підсвічування на відстань до 12 м (загалом 12 світлодіодів на довжині хвилі 850 нм загальною потужністю 2,7 Вт), прожектором, що забезпечує режим кольорового нічного бачення (Spotlights 4 pcs/2.7W/6500K/180Lumens) з кольоровою температурою 6500 К та яскравістю 180 Лм. Камера Reolink E1 Outdoor PoE розроблена для внутрішнього і зовнішнього використання, включає передові функції детального аналізу зображення у науковому контексті, забезпечує поле зору по горизонталі в межах $94^\circ - 50^\circ$ і по вертикалі в межах $53^\circ - 30^\circ$. Функціональність камери включає автоматичне перемикання з режиму фіксації кольорового зображення в режим нічної зйомки, що передбачає використання ІЧ фільтру для денного режиму (IR-cut filter with auto-switching). Інформаційний інтерфейс камери – Ethernet розетка RJ45, 10M/100Mbps; програмне забезпечення від виробника забезпечує підтримку наступних протоколів і стандартів: HTTPS, SSL, TCP/IP, UDP, HTTP, IPv4, UPnP, RTSP, RTMP, ONVIF, SMTP, NTP, DHCP, DNS, DDNS, FTP, P2P та надає можливість автоматичного стеження за об'єктом, посилене функцією розумного виявлення руху людей чи транспортних засобів із зменшеною ймовірністю хибного спрацювання.



Рисунок 3 – Камера Reolink E1 Outdoor PoE: 1 – сенсор денного світла; 2 – світлодіоди прожектора кольорового нічного бачення; 3 – об'єктив; 4 - світлодіоди прожектора інфрачервоного нічного підсвічування; 5 – індикатор статусу камери [30]

Додатково камера також вона має двохсторонній аудіозв'язок та сирену. Для зберігання даних передбачено слот для використання карти microSD ємністю до 256 ГБ. Вона використовує режим PoE для спрощення установки та управління живленням, керується через додаток чи клієнт Reolink, сумісна з IoT-екосистемами та асистентами, такими як Google Assistant і Alexa, що підкреслює її адаптивність у системах розумного будинку. Камера Reolink E1 Outdoor PoE може використовуватися автономно в режимі «точка-точка» або в складі систем IP відеоспостереження, підключатися до мережевих (NVR) і гібридних (XVR) відеореєстраторів за допомогою локальної мережі. Камера забезпечує віддалений візуальний контроль, транслює відеопотік на смартфон користувача, а також зберігає записи в архів на SD-карту. Для управління камерою за допомогою смартфона використовується застосунок ReolinkLife, доступний для безкоштовного скачування з Play Market і Apple Store.

Синтез зовнішнього підсвічуючого вузла та методика його досліджень. Наявні інтерфейси камери Reolink E1 і технічна документація не надає користувачеві апаратні чи програмні можливості синхронізації режиму фіксації кадру із зовнішнім підсвічуванням [30]. Електричний режим живлення матриці ІЧ світлодіодів вбудованого нічного підсвічування – постійний і не передбачає можливостей для користувача використання стробованого живлення і управління режимами. Це стимулювало авторів до розробки додаткового зовнішнього підсвічуючого вузла, який в рамках цієї роботи не мав можливості синхронізації з режимом рухомого затвора камери. Для забезпечення зовнішнього підсвічування ближнім інфрачервоним випромінюванням в режимі регульованого стробування в роботі використано платформу для розробки віртуальних приладів NI ELVIS II [31, 32], розроблено драйвер світлодіодних підсвічувачів, що апаратно та програмно керується за амплітудою, зсувом, частотою повторювання імпульсів підсвічування та їх скважністю. Режими зовнішнього підсвічування реалізовано і досліджено з використанням комерційно доступних світлодіодів ближнього інфрачервоного діапазону з максимумом випромінювання відповідно на довжинах хвиль 850 нм та 940 нм і спектральною шириною 40 нм на піввисоті інтенсивності: OSRAM, модель SFH 4556 та Everlight, модель IR928-6C-F. Спектральні та енергетичні характеристики випромінювачів погоджені з приймачем матриці камери з оглядом на можливість наступної конструктивної та експлуатаційної гнучкості в аспектах розробки багатоелементного підсвічувача з можливістю вибору електричних режимів його живлення. У якості випромінювачів використовуються високопотужні світлодіоди. Світлодіоди NIR в лабораторних дослідженнях розміщено на робочій відстані 1,5 м ÷ 2 м від мішені для її достатньо рівномірного освітлення. 2.8 ÷ 8 - міліметровий компактний варіофокальний об'єктив камери має належну пропускну здатність у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах і формує зображення мішені на матриці. Фото експериментальної установки в лабораторних умовах наведено на рис. 4.



Рисунок 4 – Постановка лабораторного експерименту: 1 – мішені зображення відповідно до стандарту USAF 1951 (Standard Layout Chart); 2 – платформа NI ELVIS II для розробки віртуальних приладів з драйвером освітлювачів, зібраним на макетній платі платформи; 3 – камера Reolink E1 Outdoor PoE на регульованому штативі з додатковими зовнішніми підсвічувачами, змонтованими з фронтального боку камери; 4 – мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200 для бездротового зв'язку з камерою; 5 – персональний комп'ютер з програмним забезпеченням LabVIEW.

Основні результати дослідження та їх обробка. Наведемо окремі результати обробки зображень, отриманих в експериментальній частині роботи для змінної скважності підсвічуючого стробованого сигналу. Гістограми отримано в результаті використання розробленого в роботі власного програмного середовища для об'єктивного аналізу.

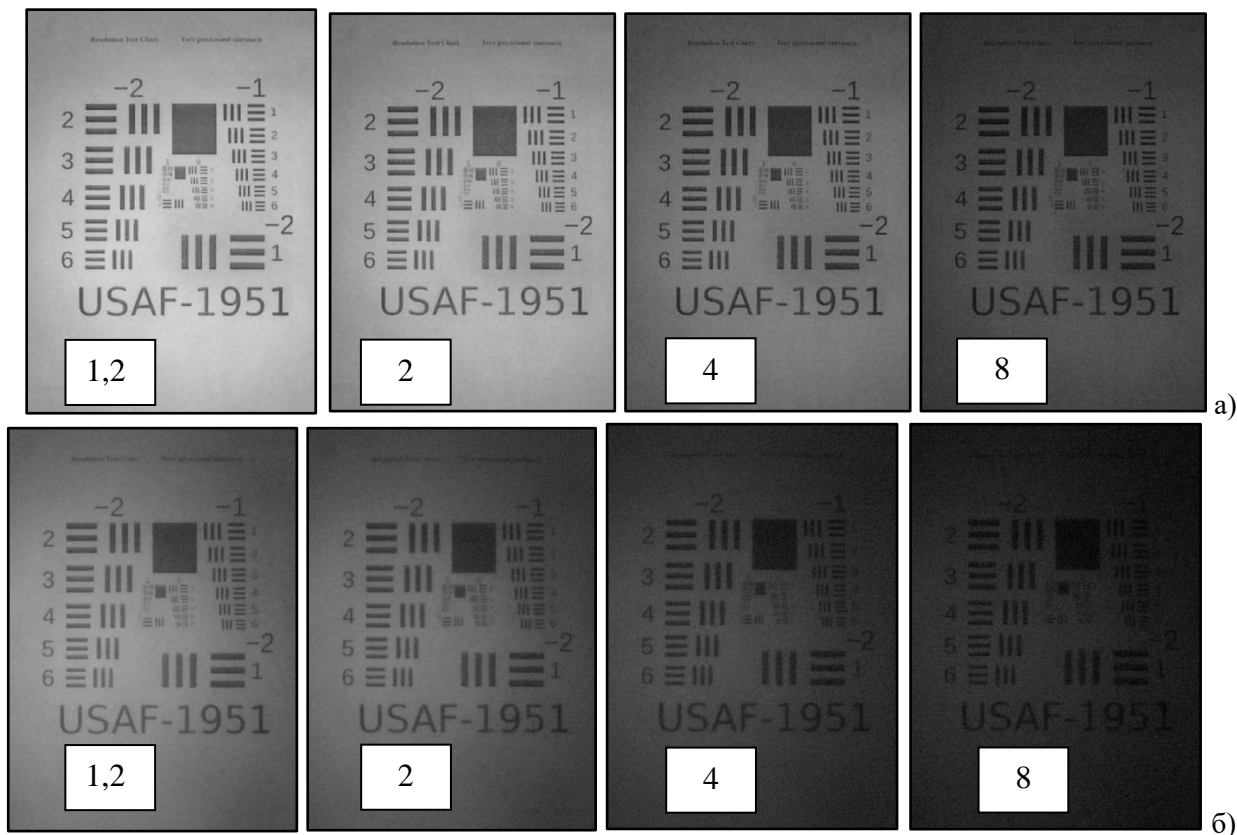


Рисунок 5 – Зображення тестової мішені за скважності імпульсу від 1,2 до 8 з використанням зовнішнього підсвічування на довжині хвилі: а) – 850 нм, б) – 940 нм.

Програмний аналіз зображення реалізується за допомогою алгоритму, що передбачає обчислення параметрів та візуалізацію результатів. Алгоритм реалізований за допомогою мови програмування Python у програмному середовищі Spyder (anaconda3) наступним чином: імпорт бібліотек `matplotlib`, `numpy` і `skimage` для обробки зображень і візуалізації результатів; визначення функцій для аналізу зображень («`calculate_brightness`» – обчислює середнє значення яскравості зображення, «`calculate_contrast`» – обчислює контраст зображення як різницю між максимальним і мінімальним значеннями інтенсивності пікселів; «`calculate_sharpness`» – використовує оператор Лапласа для обчислення різкості зображення; «`calculate_noise`» – обчислює стандартне відхилення значень пікселів зображення як міру шуму); задання шляхів до файлів зображень; аналіз зображень (завантаження кожного зображення за його шляхом; перетворення зображення в градацію сірого для обробки RGB-форматних файлів; обчислення параметрів; збереження результатів у список); візуалізація результатів (для кожного з чотирьох параметрів створюється гістограма, що показує значення в залежності від змінного параметра; гістограми візуалізуються з відповідними мітками та кольорами). Горизонтальні та вертикальні елементи тестової мішені використовуються для одночасної оцінки горизонтальної та вертикальної роздільної здатності на скінченних просторових частотах. Кожен елемент мішені має унікальні ширину та інтервали і позначений числом від 1 до 6. Ці елементи організовані у групи з власними ідентифікаційними номерами; номери варіюються від -2 до 7 і використовуються для визначення просторової частоти. Роздільна здатність визначається за допомогою пар ліній, що включають одну чорну лінію і один проміжок. Якісно, роздільна здатність системи візуалізації визначається як комбінація групи та елементів, яка розташована безпосередньо перед тим, як чорні та білі смуги починають розмиватися.

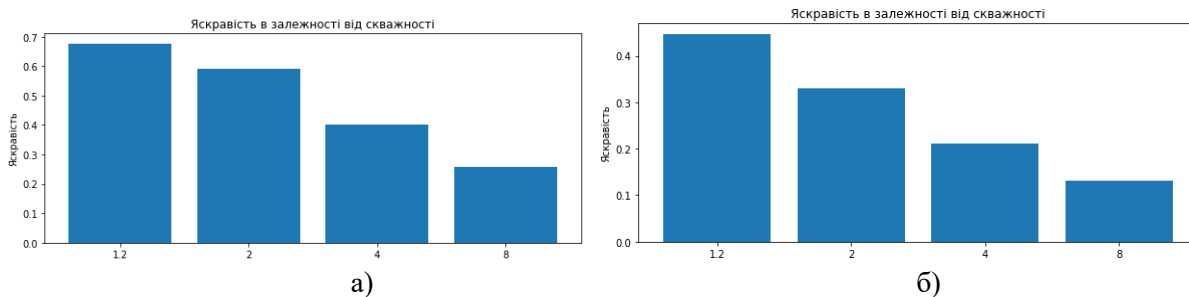


Рисунок 6 – Залежність яскравості від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

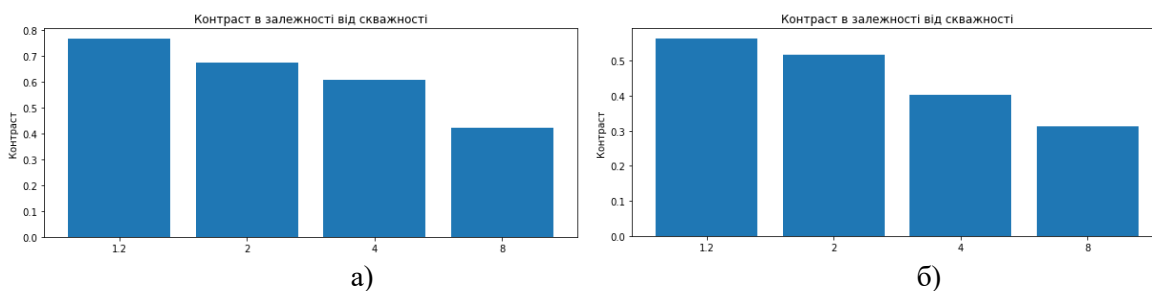


Рисунок 7 – Залежність контрасту від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

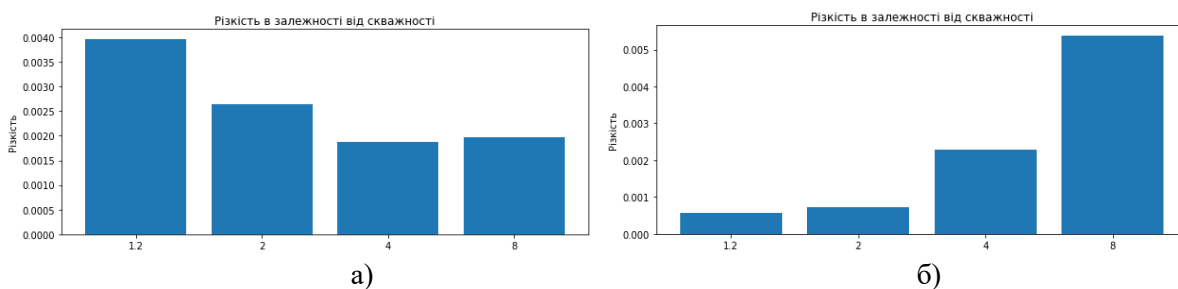


Рисунок 8 – Залежність різкості від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Отримані в роботі результати показали, що режим додаткового стробованого підсвічування в ближньому інфрачервоному діапазоні має значні резерви в сенсі оптимізації енергоспоживання автономного джерела живлення системи відеоспостереження без суттєвої втрати якості отриманого зображення і функціональності камери. Встановлені кореляції параметрів зображення мають суттєве значення для вибору оптимальних режимів підсвічування з точки зору оптимізації енергоспоживання для комплектів з автономними джерелами живлення в залежності від конкретних застосувань, зокрема для мобільного комплексу відеоспостереження. Подальші дослідження варто проводити в режимі синхронізації підсвічування з фіксацією кадру в режимі рухомого затвора.

інформаційні джерела

1. Huang, R.; Yamazato, T. A Review on Image Sensor Communication and Its Applications to Vehicles. *Photonics* 2023, 10, 617. <https://doi.org/10.3390/photonics10060617>
2. Yuxiao Cheng, Runzhao Yang, Zhihong Zhang, Jinli Suo, and Qionghai Dai "A Dual Sensor Computational Camera for High Quality Dark Videography". April 2022 https://www.researchgate.net/publication/359890863_A_Dual_Sensor_Computational_Camera_for_High_Quality_Dark_Videography. Published version: A mutually boosting dual sensor computational camera for high quality dark videography May 2023, DOI: 10.1016/j.inffus. 2023.01.013
3. J. Jiang, X. Feng, F. Liu, Y. Xu and H. Huang, "Multi-Spectral RGB-NIR Image Classification Using Double-Channel CNN," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20607-20613, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896128.

4. Seunghoon Jee and Moon Gi Kang «Sensitivity Improvement of Extremely Low Light Scenes with RGB-NIR Multispectral Filter Array Sensor» *Sensors* 2019, 19, 1256; doi:10.3390/s19051256
5. Zhuo, S., Zhang, X., Miao, X., Sim, T. (2010). Enhancing low light images using near infrared flash images. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP* : 2537-2540. ScholarBank@NUS Repository. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2010.5652900>
6. Z. Chen, X. Wang, and R. Liang, "RGB-NIR multispectral camera," *Opt. Express*, vol. 22, no. 5, p. 4985-4994, 2014.
7. Yadid-Pecht, Orly and Ralph Etienne-Cummings "CMOS Imagers: From Phototransduction To Image Processing" (2013), 251 p. eBook ISBN: 1-4020-7962-1.
8. Sukhavasi, S.B.; Elleithy, K.; Abuzneid, S.; Elleithy, A. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. *Sensors* 2021, 21, 488. <https://doi.org/10.3390/s21020488>
9. Bigas, M.; Cabruja, E.; Forest, J.; Salvi, J. Review of CMOS image sensors. *Microelectron. J.* 2006. 37. 433–451.
10. Sukhavasi, S.B.; Elleithy, K.; Abuzneid, S.; Elleithy, A. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. *Sensors* 2021. 21. 488. <https://doi.org/10.3390/s21020488>
11. Ohta, J. *Smart CMOS Image Sensors and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020. <https://doi.org/10.1201/9781315156255>
12. HAMAMATSU Image sensors for scientific measurements and industrial equipment. CCD/CMOS image sensors. Document KMPD0002E 29 Jul. 2023 DN
13. Technical note. Si Photodiodes / Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division // Cat. No KSPD9001 E03 Oct. 2023 DN. Режим доступу URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf (дата звернення: 05.12.2023)
14. Чорній Р.І. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕКОДУВАННЯ СИГНАЛУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. Деклараційний Патент України на винахід № 38407. Дата публікації 15.05.2001, Бюл. № 4, 2001 р.
15. Домашенко С.О., Лиховид А.Ю., Дмитриченко А.І. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПІДСВІЧУВАННЯ. Патент України на корисну модель № 26082, Дата публікації 10.09.2007, Бюл. № 14, 2007 р.
16. Рудік В.М., Слижук В.М., Зачек О.І. ПРИСТРІЙ ІНФРАЧЕРВОНОГО ПІДСВІЧЕННЯ ДЛЯ ПРИЛАДІВ БАЧЕННЯ В ТЕМРЯВІ ПАП-1. Патент України на корисну модель № 19227, Дата публікації 15.12.2006, Бюл. № 12, 2006 р.
17. Рудік В.М., Фірман В.М., Слижук В.М., Зачек О.І., Рудий Т.В. ПРИСТРІЙ ІНФРАЧЕРВОНОГО ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДІВ БАЧЕННЯ В ТЕМРЯВІ ПАП-2. Патент України на корисну модель № 31121, Дата публікації 25.03.2008, Бюл. № 6, 2008 рік.
18. Білинський Й.Й. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптико-електронних методів і засобів на їх основі [Текст] / Й. Й. Білинський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 5. С. 9-15.
19. Охрімчук О.Б. «ОПТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ», "ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ". Луцьк, 2023. Випуск № 22, с. 107–113. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-16
20. Осадца Я.М., Ріпецький Р.Й. «МАТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СВІТЛА З ЦИФРОВИМ ПРЕДСТАВЛЕННЯМ СИГНАЛУ». СВІЛОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, №4, 2009, С. 4–8.
21. Чирук, В. М. Еволюція датчиків зображення: КМОН-ФД і ПЗЗ-матриці / Чирук В. М., Шмирьова Л. М. // Перспективні напрямки сучасної електроніки: матеріали XIII науково-практичної конференції (4 квітня 2019 р., м. Київ) / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 176-181. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37888>
22. R.S. Belliveau, "Image projection lighting devices with visible and infrared imaging", United States Patent US 2008/0165533 A1, Jul. 10, 2008.
23. US Patent Pub. No.: US 2008/0165533 A1. IMAGE PROJECTION LIGHTING DEVICES WITH VISIBLE AND INFRARED IMAGING, Pub. Date: Jul. 10, 2008.
24. S. Lin, J. Chi, S. Chou, C. Tsai, "Quantum-Dot Infrared Photodetector", United States Patent US 2006/0138396 A1, Jun. 29, 2006.
25. E.H. Sargent, J.J. Young Lee, E. Mandelli, J. Park, "Multi - terminal optoelectronic devices for light detection", United States Patent US 10,685,999 B2, Jun. 16, 2020.

26. EXIR and IR illumination for the video monitoring system. 5 differences, Video Surveillance Industry, Faceter Blog, July 29, 2021. URL: <https://faceter.cam/en/blog/exir-and-ir-illumination-for-the-video-monitoring-system-5-differences/> (дата звернення: 23.10.2023).
27. A compact multispectral image capture unit for deployment on drones. Conference May 2016: 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). DOI: 10.1109/I2MTC.2016.7520445
28. Zhenyue Chen, Xia Wang, Rongguang Liang "RGB-NIR multispectral camera". March 2014, Optics Express 22(5): 4985-94. DOI: 10.1364/OE.22.004985
29. Борисов О.В. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. 484 с.
30. The TechGeeks. E1-Outdoor-PoE Reolink 4K 8MP PTZ PoE. Режим доступу URL: <https://thetechgeeks.com/products/e1-outdoor-poe-reolink-4k-8mp-ptz-poe-camera-with-auto-tracking-and-smart-detection> (дата звернення: 26.11.2023).
31. OSRAM SFH 4715S. Datasheet / ams-Osram AG // Premstaetten, Austria. Режим доступу URL: <https://look.ams-osram.com/m/1ce4473eb47f235a/original/SFH-4715S.pdf> (дата звернення: 25.10.2023)
32. OSRAM SFH 4725S. Datasheet / ams-Osram AG // Premstaetten, Austria. Режим доступу URL: <https://look.ams-osram.com/m/576da17be1796a90/original/SFH-4725S.pdf> (дата звернення: 25.10.2023)
33. Cudy. AC1200 Wi-Fi Router. Режим доступу URL: <http://www.cudytech.com/productinfo/2069184.html> (дата звернення: 26.11.2023).
34. National Instruments. NI ELVIS II. Режим доступу URL: <https://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-ii.html> (дата звернення: 26.11.2023).
35. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS II Series) User Manual / National Instruments Corporation // Austin, Texas. June 2011 374629C-01. Режим доступу URL: https://electrical.engineering.unt.edu/sites/default/files/NI_ELVIS_II.pdf (дата звернення: 02.12.2023).

Berest Vitalii, Borysov Oleksandr, Lupyna Borys

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

ACTIVE INFRARED ILLUMINATION FOR IMPROVED OPTICAL IMAGING IN LOW LIGHT CONDITIONS

The effect of object illumination modes by a near-infrared radiation source on the optical characteristics of images obtained in low level or complete absence of illumination conditions of the observation area was investigated. A Reolink E1 Outdoor PoE robotic video camera, equipped with a silicon CMOS matrix with a resolution of 8 MP and built-in illuminating spotlights in the visible and near-infrared ranges, was used for image acquisition and analysis. Images were fixed under specific object illumination conditions by an additional external source, taking into account the spectral characteristics of the matrix sensitivity for a number of emitters optical and electrical characteristics: power parameters, illuminators at different wavelengths. LEDs with a maximum intensity at a wavelength of 850 nm (OSRAM, model SFH 4556) and 940 nm (Everlight, model IR928-6C-F) were used as additional external illuminators of the experimental part of the work. To implement a electric lighting modes number, the NI ELVIS II virtual tools development platform was used in experimental works; a proprietary LED driver was developed based on an operational amplifier and a transistor cascade with adjustable pulse illumination parameters: amplitude, frequency, duty cycle. An objective assessment of images quality for the test target Standard Layout Chart of the USAF 1951 in terms of brightness, contrast, sharpness, and noise was performed using the software package developed in the work. The obtained results showed that the mode of strobed additional illumination in the near-infrared range has significant reserves in the sense of optimizing the energy consumption of the autonomous power source of the video surveillance system without significant loss of the received image quality and the functionality of the camera. The established correlations of the image parameters are essential for the selection of optimal illumination modes from the point of view of optimizing energy consumption for sets with autonomous power sources depending on specific applications, in particular for a mobile video surveillance set.

Keywords: active infrared illumination, semiconductor image sensors, video surveillance camera.

УДК 616.073, 616.43

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-04

Витвицька Л.А.¹, Чуйко М.М.¹, Біліщук В.Б.¹, Витвицький З.Я.², Лаврук Х.З.³¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ²Івано-Франківський національний медичний університет, м. Івано-Франківськ³Лікувально-діагностичний центр «Клініка святого Луки», м. Івано-Франківськ

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ КРОВ'Ю БІОМАТЕРАЛІВ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ЙОГО КОНТРОЛЮ

Обґрунтовано необхідність здійснення моделювання процесу змочування кров'ю біоматеріалів, з яких виготовляються судинні трансплантати, стенти, клапани, як основної умови визначення реакції крові людини на чужорідні матеріали. Індивідуальність людського організму зумовлює необхідність проведення контролю у динаміці, тобто експрес-аналізу процесу змочування кров'ю для уникнення негативних наслідків. Встановлено взаємозв'язок пружних властивостей штучної судини або судини, в якій знаходиться стент, і ступеня змочуваності кров'ю внутрішньої поверхні судини чи стенту. Встановлено доцільність здійснювати контроль процесу змочування кров'ю ультразвуковим методом. Проаналізовано різні методи дослідження пружних властивостей судин на основі моделювання процесу контролю за допомогою ультразвукових коливань, отриманих на основі компресії (здавлювання) і деформування шляхом зсуву шарів тіла, через які проходять ультразвукові коливання. Обґрунтовано доцільність використання зсувної хвилі. При цьому необхідно не тільки визначати амплітуду відбитої від пружної поверхні судини зсувної хвилі, але й визначати її швидкість, тобто кількісні показники пружності.

Ключові слова: моделювання процесу кровообігу, змочування штучних судин і стентів, ультразвукові коливання, пружні властивості судин, компресійна еластографія, зсувна хвиля

Вступ На даний час для діагностики та лікування людського організму широко використовуються різноманітні біоматеріали, які контактують з кров'ю. Є пристрої, які контактують короткотривалий час, наприклад, катетери, інші взаємодіють тривало, наприклад, при діалізі, а деякі підлягають впливу крові дуже тривалий час, навіть пожиттєво – штучні судини (судинні трансплантати), стенти, клапани [1]. Всі біоматеріали, з яких виготовлені ці пристрої і які контактують з кров'ю, є для неї чужорідними і можуть викликати негативні реакції, такі як відкладення білків, тромбоцитів, лейкоцитів, міграція різного типу клітин. Це, у свою чергу, впливає на інші елементи у складному індивідуальному мікросередовищі організму кожної людини, оскільки організми помітно відрізняються один від одного як за хімічним складом крові, так і за реакцією крові на чужорідні матеріали. Безпосереднє дослідження на багатьох моделях тварин не є достатнім для прогнозування реальних характеристик пристроїв у пацієнтів. Доступні лише обмежені порівняльні дані для людей і порівняно небагато матеріалів пройшли клінічну оцінку. Дослідження постійних імплантатів, вилучених при розтині, не цілком можуть дозволити встановити зв'язок із прижиттєвими динамічними особливостями серцево-судинної системи [2]. Особливо важливим є контроль змочуваності біоматеріалів кров'ю. Тому необхідно аналізувати взаємодію крові з біоматеріалами на основі моделювання процесів змочування та розтікання крові поверхнею біоматеріалу з врахуванням поверхневих властивостей усіх контактуючих фаз [3]. Розроблення моделі дає можливість проаналізувати та обґрунтувати вибір методу контролю процесу змочування кров'ю біоматеріалів та визначити основні показники, за якими кількісно аналізується взаємодія крові і чужорідного тіла [4]. Також доцільно обґрунтувати методіку контролю на основі вибраного методу для найбільш оптимального проведення в експресному режимі.

Метою даної роботи є розроблення методу експрес-контролю змочуваності кров'ю штучних судин та імплантатів на основі моделювання процесу їх змочування при русі крові.

Основна частина Моделювання руху крові по судинах доцільно розглянути на основі встановлення взаємозв'язку між рухом крові по судинах і властивостями біоматеріалів, з яких виготовлені чужорідні тіла, котрі омиваються кров'ю. Франком ще у 1899 р була створена модель кровообігу, яка представляє собою механічну систему у вигляді пульсуючого насоса з

системою трубок [5]. Артеріальна частина кровообігу представляється еластичним резервуаром, а капілярно-венозна – жорсткою трубкою.

Процес, коли кров при скороченні серцевого м'язу виходить в артерію із об'ємною швидкістю Q_c під тиском p (систоличний тиск) можна змодельовати як подачу крові під тиском p в резервуар, для якого коефіцієнт еластичності C не рівний нулю. Також приймається, що модуль пружності E стінок резервуара не залежить від ступеня їх розтягу, тому їх опір R рівний нулю. Отже, цей період кровообігу можна описати рівнянням:

$$Q_c = C \frac{dp}{dt} + \frac{p}{R} \quad (1)$$

Процес руху крові по венах, тобто період діастолі, коли приток крові від серця закінчується, стінки артерій стискаються і кров виштовхується у периферичні судини під діастолічним тиском, можна подати у вигляді розповсюдження потоку крові із об'ємною швидкістю Q_0 у жорсткій трубці, для якої опір R відмінний від нуля, а коефіцієнт еластичності стінок судин рівний нулю. У цьому випадку рівняння матиме вигляд:

$$0 = C dp + \frac{p}{R} dt \quad (2)$$

Таким чином, залежність зміни об'ємної швидкості течії крові у периферичних судинах для фази систоли має вигляд :

$$Q = Q_c \cdot e^{-\frac{t}{CR}}, \quad (3)$$

де Q_c – об'ємна швидкість течії крові з пружного резервуару наприкінці систоли (на початку діастолі). Рівняння (3) встановлює залежність швидкості течії крові від еластичності судин та їх пружності.

Отже, дане рівняння, яке моделює гідродинамічні процеси кровообігу людини, обґрунтовує можливість визначення впливу чужорідного тіла на перебіг процесу кровообігу на основі встановлення зміни пружних властивостей штучної судини або судини, у якій знаходиться стент [6].

Для оцінки пружних властивостей найбільш доцільно використовувати ультразвуковий неінвазивний метод. Цей метод має назву «ультразвукова еластографія». На даний час існує два види ультразвукової еластографії: компресійна та зсувно-хвильова. При використанні компресійного виду стан досліджуваної тканини визначається за зсувом і деформацією структури при натисканні (компресії). Відмінність ступеня деформації тканин визначається неоднаковою їх еластичністю. Внаслідок здавлювання тканин, в залежності від їх пружності більш еластичні (м'які) тканини деформуються в більшій мірі, жорсткі (щільні) - в меншій. Причому, більш важливим є не абсолютні значення деформацій різних тканин, а їх порівняння, тобто встановлення, наскільки одна тканина більш пружна, ніж інша, що характеризується відношенням деформації. На даний час цей вид еластографії використовується з метою виявлення пухлинної патології при дослідженні поверхнево розташованих органів, (молочної та щитоподібної залози). Дослідження основане на порівнянні деформацій патологічного вогнища і навколишніх тканин. Лінійним датчиком з певною силою здійснюють тиск на шкіру досліджуваної області, внаслідок чого виникає деформація тканин. При натисканні більш пружний, твердий об'єкт, наприклад, ракова пухлина, зменшується в об'ємі менше, ніж оточуюча її менш пружна, м'яка тканина, зате сильніше зсувається "убік", як би "вислизаючи" з-під датчика, що давить на тканину.

Пружні властивості середовищ визначаються силами взаємодії між молекулами, а не клітинною структурою тканини. М'які тканини за складом відрізняються значно менше, ніж за структурою: вони містять до 80% води, одні і ті ж білки та інші органічні і низькомолекулярні речовини. Тому модуль всебічного стискання і швидкість ультразвуку для всіх м'яких тканин є наближено однакові, настільки ж малі і межі зміни акустичного імпедансу. Судини теж відносяться до м'яких тканин, тому при визначенні ступеня їх змочування кров'ю з використанням компресійної еластографії різниця швидкості ультразвуку при різній змочуваності судини кров'ю буде незначною.

Однак, діапазон змін структурних особливостей тканин, тобто анізотропії, ступеня неоднорідності є набагато ширшим. Зсувні властивості тканин, які визначаються за модулем зсувної пружності або за модулем Юнга відрізняються в різних тканинах не на одиниці, а на порядки відсотків. Так, в залежності від швидкості потоку крові у судині модуль Юнга

змінюється в межах двох-чотирьох порядків. Тому виник напрямок, оснований на використанні зсувних хвиль для оцінки стану органів і тканин, що отримав назву Shear Wave Elasticity Imaging (SWEI) або еластографія на зсувних хвилях, яка не вимагає компресії тканин датчиком [6]. Внаслідок пружної реакції середовища на об'ємну і зсувну деформацію виникають зворотні сили, які прагнуть повернути тіло в початковий стан. За інерцією тіло проходить положення рівноваги і деформується в іншу сторону. Подібним чином виникають і коливання об'єму, і коливання форми, які поширюються в середовищі у вигляді хвиль. Тим самим досягається візуалізація більш високої точності і більш високої якості. На даний час визначення зсувних характеристик використовується, в основному, для виявлення пухлин, але зсувну еластографію доцільно застосовуватися для діагностики стану судин.

Хвиля коливань об'єму у вигляді чергування зон стискання і розрідження середовища – це поздовжня ультразвукова хвиля, при якій коливання частинок відбуваються в тому ж напрямку, що і поширення хвилі. Швидкість їх поширення виражається через модулі поздовжньої K , зсувної μ пружностей і щільність ρ середовища таким чином:

$$C_{US} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (4)$$

Хвиля коливань форми при постійному об'ємі, або зсувна хвиля – це поперечна хвиля, при якій частинки середовища коливаються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Зсувна хвиля рухається з абсолютно іншою швидкістю, і визначається відношенням модуля зсувної пружності μ і щільності середовища ρ :

$$C_{US} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5)$$

Як показали вимірювання, зсувний модуль пружності м'яких тканин малий у порівнянні з модулем всебічного стискання, тобто зсувна хвиля є "повільною". Дійсно, швидкість ультразвуку в тканинах наближено така ж, як у воді, тобто $C_{US} = 1500 \frac{M}{c}$.

Таким чином, вимірюючи швидкість поширення повільної зсувної хвилі в заданій області тканини, можна виміряти модуль зсувної пружності μ і модуль Юнга E . Ці величини визначаються таким чином:

$$\mu = 1\rho \cdot C_{US}^2, \quad (6)$$

$$E = 3\rho \cdot C_{US}^2. \quad (7)$$

Оскільки щільність ρ м'яких тканин організму практично однакова ($\approx 1,05$ кг/м³), обидві формули пружності прямо пропорційні квадрату швидкості зсувної хвилі. Отже, чим вища її швидкість, тим вища пружність.

Але як виміряти швидкість поширення зсувної хвилі на певній глибині? Здається на перший погляд, що можна помістити на поверхню тіла пацієнта випромінювач зсувних хвиль, як поміщається випромінювач ультразвуку при стандартному ультразвуковому дослідженні і всередину організму буде поширюватися хвиля. Але зсувна хвиля в основному побіжить поверхню тіла, і дуже швидко затухає в м'яких тканинах, не досягаючи судини, яку необхідно дослідити. Тому доцільно використовувати радіаційний тиск, створюваний інтенсивним ультразвуком. [7]. Радіаційний тиск ультразвукової хвилі можна підібрати так, щоб він був максимальним в заданій точці фокуса F . У цій точці створюється джерело зсувних хвиль, що йдуть від неї в перпендикулярних напрямках. Для фокусування на потрібній глибині L , тобто у місці, де необхідно генерувати зсувні хвилі, здійснюється шляхом зміни параметрів ультразвукового імпульса. Зсувні хвилі будуть розходитися в області фокуса в боку від осі ультразвукової хвилі (рис. 1). Ця технологія створення зсувних хвиль, що використовує радіаційний тиск сильно сфокусованого ультразвукового імпульсу, отримала назву ARFI - Acoustic Radiation Force Impulse [8].

Далі шляхом звичайного ультразвукового сканування відстежується просування зсувної хвилі в сторони від точки фокуса, визначається її швидкість, за формулами (4), (5) перераховується в модулі пружності і відображається на екрані в кілопаскалях.

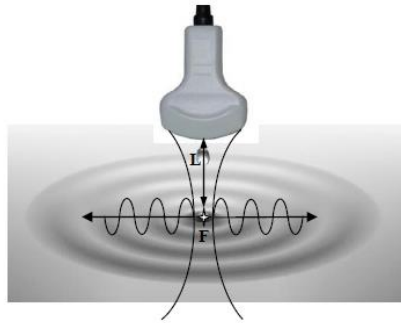


Рисунок 1 – Створення зсувної хвилі в фокусі F на певній глибині L за допомогою радіаційного тиску сфокусованого ультразвукового імпульсу

Для того, щоб отримати зсувні хвилі на інших глибинах, зміщується зона фокуса на певну віддал від датчика і вже в цій зоні створюється новим потужним ультразвуковим імпульсом тиск, необхідний для отримання зсувних хвиль і вимірювання їх характеристик. Якщо створювати зсувні хвилі на різній глибині з певною часовою затримкою одна за одною створюються сфокусовані точки максимального тиску, в результаті чого зсувні хвилі формують фронт у вигляді так званого конуса Маха (рис. 2). Рух цього фронту відстежується за допомогою спеціального ультразвукового сканування, при цьому ділянки з різною швидкістю зсувних хвиль кодуються різними відтінками сірого кольору або різними кольорами за шкалою з певною кількістю кольірних комірок, що дає можливість візуально виявляти зони з різною еластичністю.

Так, шляхом отримання зсувних хвиль і обчислення їх швидкостей у всьому діапазоні досліджуваних глибин з подальшим кольорним картуванням можна створювати двомірне кольорове зображення пружності, що і є кольорною еластограмою зсувної хвилі. Колірну еластограму можна переглядати в режимі реального часу окремо, а можна накласти на сірошкальне зображення або зіставити поруч з ним в двох паралельних вікнах.

Після вивчення кольірних еластограм проводиться еластометрія за допомогою одного або кількох пробних об'ємів з міліметровою роздільною здатністю. Можна замірювати пружність судини однієї конкретної ділянки і порівнювати її з показником іншої ділянки. Цифрові дані можуть бути представлені у вигляді показників швидкості зсувних хвиль (в м/с) або пружності тканини (кПа). Можливість отримання абсолютних цифрових значень пружності судини в експресному режимі є великою перевагою еластографії зсувної хвилі.

Оскільки кровоносні судини за структурою стінок відносяться до м'язевих тканин, то для їх діагностики теж доцільно використовувати зсувну хвилю.

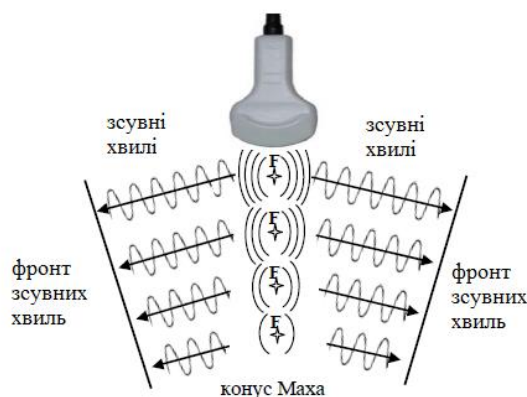


Рисунок 2 – Формування фронту зсувних хвиль (конус Маха) за допомогою сфокусованих точок (F1-F4) максимального тиску, послідовно створюваних на різній глибині з певною часовою затримкою

Висновки. Доцільність проведення моделювання процесу руху крові по судинах зумовлена необхідністю контролю процесу змочування внутрішніх поверхонь штучних судин при діалізі, а також при обтіканні імплантів всередині судин. Також встановлена необхідність проведення експрес-аналізу в динамічному режимі безпосередньо під час діалізу чи при імплантації не тільки за результатами аналізу складу крові, але у першу чергу за швидкістю руху крові і за ступенем змочування нею поверхні штучного біоматеріалу. Обґрунтовано доцільність проведення експрес-контролю змочуваності кров'ю штучних біоматеріалів на основі визначення зміни пружності судин. Цю зміну доцільно визначати з використанням ультразвукових зсувних хвиль, візуалізуючи їх, тобто проводити еластографію та вимірюючи кількісні показники пружності, тобто використовувати еластометрію.

Інформаційні джерела

1. Корнацький В. М., Сілантьєва О. В. Серцево-судинні захворювання і шкідливі екологічні чинники // Український кардіологічний журнал. 2013, № 3, С. 109 – 116
2. Григор'єва Л. І., Томілін Ю. А. Біомеханічні основи системи кровообігу людини . К: Либідь, 2009, 120 с.
3. Абдулаєв Р. Я. Сисун Л. А. Доплерографія судин головного мозку : методичні аспекти і нормальна анатомія // Український радіологічний журнал. 2010, №1, С. 48 –54.
4. Xu T. Bashford G. R Optimal thresholds of Feature Tracking for blood velocity and tissue motion estimation // IEEE Trans. Ultrason. Ferr., 2009, V. 56, № 12, P. 2624-2629.
5. Sarvazyan A. P. Rudenko O. V., Swanson S. D., Folwkes J. B., Emelianov S. Y. Shear Wave Elasticity Imaging – a New Ultrasonic Technology of Medical Diagnostics // Ultrasound in Medicine and Biology. 1998, V. 24, № 9, P. 1419 – 1436.
6. Cui S. Liu D. C. Noise reduction for ultrasonic elastography using transmit-side frequency compounding: A preliminary study // IEEE Trans. Ultrason. Ferr. 2011, V.58, № 3, P. 509-516.
7. Gallot T., Catheline S., Roux P., Brum J., Benech N., Negreira C. Passive elastography: Shear wave tomography from physiological-noise correlation in soft tissues // IEEE Trans. Ultrason. Ferr. 2019, V.58, № 6, P. 1122-1126.

Vytvytska L.A.¹, Chuyko M.M.¹, Bilishchuk V.B.¹, Vytvytskyi Z. Ya.², Lavruk H.Z.³

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankivsk

²National Medical University, Ivano-Frankivsk

³Treatment and diagnostic center "St. Luke's Clinic", Ivano-Frankivsk

FEATURES OF THE SIMULATION OF THE PROCESS OF BLOOD WETTING OF BIOMATERIALS AND JUSTIFICATION OF THE METHOD OF ITS CONTROL

The necessity of modeling the process of blood wetting of biomaterials, from which vascular grafts, stents, and valves are made, is substantiated, as the main condition for determining the reaction of human blood to foreign materials. The individuality of the human body necessitates dynamic control, i.e. express analysis of the process of wetting with blood to avoid negative consequences. The relationship between the elastic properties of an artificial vessel or a vessel in which a stent is located and the degree of wetting of the inner surface of the vessel or stent with blood has been established. The feasibility of monitoring the process of wetting with blood using the ultrasonic method has been established. Different methods of studying the elastic properties of vessels have been analyzed based on the simulation of the control process using ultrasonic vibrations, obtained on the basis of compression (squeezing) and deformation by shifting the layers of the body through which the ultrasonic vibrations pass. The expediency of using a shear wave is substantiated. At the same time, it is necessary not only to determine the amplitude of the shear wave reflected from the elastic surface of the vessel, but also to determine its speed, that is, quantitative indicators of elasticity

Key words: simulation of the blood circulation process, wetting of artificial vessels and stents, ultrasonic oscillations, elastic properties of vessels, compression elastography, shear wave.

УДК 621.9.08

Денисюк В.Ю.

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-05

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУЮВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЛАДІВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ

В статті описано основні умови вибору схеми контролю в процесі обробки для забезпечення високої точності вимірювання. Встановлено, що даний час у приладах активного контролю для шліфувальних верстатів найбільше поширення отримав індуктивний принцип перетворення розміру в покази шкального або цифрового індикатора. Описано основні метрологічні характеристики приладу активного контролю, функціональний зв'язок приладу з верстатом, їх компонування та обмін сигналами між верстатом та приладом. Також описано способи контакту вимірювальних наконечників приладів активного контролю з оброблюваною деталлю для визначення точності та надійності вимірювання.

Ключові слова: вимірювання, прилад активного контролю, точність, похибка, оброблення, система, верстат, сигнал, наконечник.

Постановка проблеми. Прилад автоматичного контролю розмірів деталей та інструменту на металорізальних верстатах є органічною та необхідною складовою системи верстат-прилад. Тому при конструюванні приладу та верстата необхідно забезпечити правильний функціональний зв'язок, компонування та обмін сигналами (командами) між верстатом та приладом. Кінцева мета металообробки – отримання деталей заданої точності за розміром, за відхиленнями форми та шорсткості поверхні із заданою продуктивністю. Щоб вирішити це завдання, необхідно правильно вибрати всі елементи конструкції верстата та приладу активного контролю, підібрати цикл та режими обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Точність деталей забезпечується верстатом та технологією обробки, а роль приладу зводиться до автоматизації процесу обробки шляхом видачі в систему керування верстата інформації про величину безперервно змінного припуску деталі або заготовки, інформації про швидкість знімання припуску та інші параметри циклу. Ця інформація використовується для зміни режимів різання і видачі команди закінчення обробки, тобто забезпечує зворотний зв'язок за оброблюваним розміром. Основна вимога до приладів активного контролю полягає в тому, щоб дискретна або безперервна інформація про розмір оброблюваної деталі, що надходить від приладу до системи управління верстата, з мікронною точністю відповідала розміру деталі у контрольованому перерізі. Причому ця інформація не повинна відставати за часом від швидкості знімання припуску [1, 2, 3].

У більшості випадків вимірювання при активному контролі на шліфувальних верстатах проводяться відносним способом шляхом налаштування приладу за атестованим зразком [4].

Мета роботи полягає у підвищенні точності обробки деталей при автоматичному розмірному контролі за рахунок принципів вибору приладів та їх вузлів, а також вимог до верстата та технології обробки.

Викладення основного матеріалу. Основна умова при виборі схеми контролю в процесі обробки – забезпечення високої точності вимірювання. При активному контролі застосовують такі способи та схеми вимірювання:

- пряме вимірювання;
- непряме вимірювання;
- двоконтактне вимірювання;
- одноконтактне вимірювання;
- триконтактне вимірювання;
- координатне вимірювання.

При обробці деталей на круглошліфувальних та внутрішньошліфувальних верстатах з приладами активного контролю найкращий результат отримують при прямому вимірюванні безпосередньо того розміру, значення якого необхідно забезпечити (рис. 1, а). У більшості випадків для отримання заданого значення діаметра D використовують двоконтактне вимірювання.

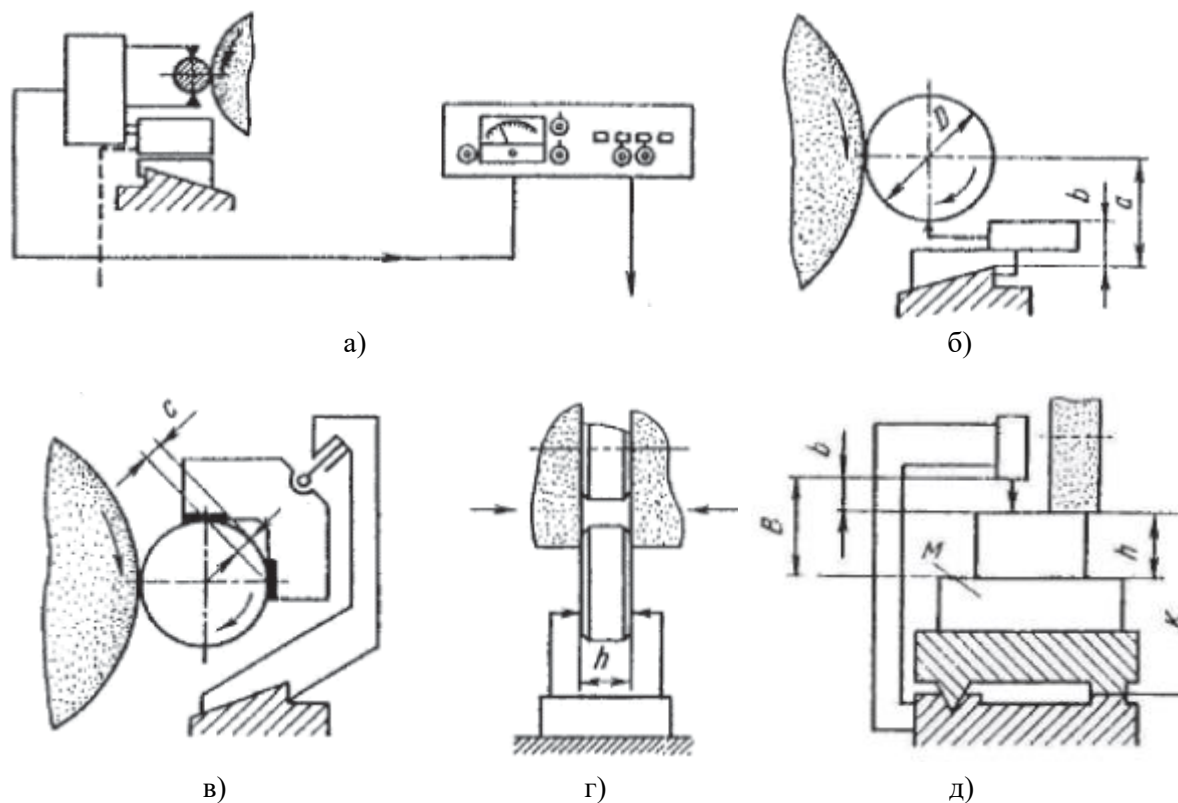


Рисунок 1 – Схеми вимірювання при шліфуванні з приладами активного контролю

В одноконтактній схемі (рис. 1, б) вимірюється відстань b від місця закріплення вимірювального оснащення до оброблюваної поверхні валу. При цьому вимірювання діаметра D з потрібною точністю забезпечується тільки у тому випадку, якщо відстань від місця закріплення пристрою до бази (осі центрів) зберігається постійною в період між підналаштуваннями приладу. Одноконтактну схему вимірювання на круглошліфувальних верстатах застосовують головним чином при осьовій орієнтації (позиціонуванні) оброблюваної деталі відносно торця шліфувального круга.

У схемі контролю за допомогою сідлоподібного пристрою (рис. 1, в) непостійність бази не впливає на результат вимірювання. Однак, оскільки у цьому випадку здійснюється непряме визначення діаметра шляхом вимірювання величини з практично постійною (у момент закінчення обробки) хордою, то на результат вимірювання впливає некруглість поперечного перерізу оброблюваної деталі.

Таким чином, найвищу точність вимірювання діаметра можна забезпечити лише застосуванням двоконтактної схеми прямого вимірювання. Аналогічним чином вибирають схему вимірювання при зовнішньому безцентровому і внутрішньому шліфуванні, хонінгуванні тощо.

При плоскому шліфуванні в основному визначається значення h висоти (або товщини) деталі, але найкраще безпосереднє вимірювання цього значення (рис. 1, г). Однак останнє можливе лише у тих випадках, коли обидва торці деталі відкриті. У більшості випадків плоске шліфування виконується під час базування оброблюваної деталі на магнітній плиті верстата. При цьому відкритим для вимірювання залишається тільки один торець, і прилад може вимірювати тільки відстань від цього торця до станини верстата (рис. 1, д). У цьому випадку на точність вимірювання впливають непостійність зазору напрямних стола верстата, температурні та силові деформації кронштейна приладу, стола верстата та магнітної плити M .

Підвищення точності в даному випадку можна досягнути за рахунок додаткового вимірювання положення базуючої площини магнітної плити (рис. 1, д), де висота h деталі відповідає різниці відстаней B і b від вимірювального пристрою до поверхні магнітної плити і оброблюваної поверхні деталі (рис. 2).

Якщо ж важко розмістити контактні наконечники та компоувати прилад таким чином, щоб вимірювати безпосередньо оброблюваний розмір, наприклад, при контролі великих розмірів, то визначають його непрямим способом, наприклад, методом обкатування.

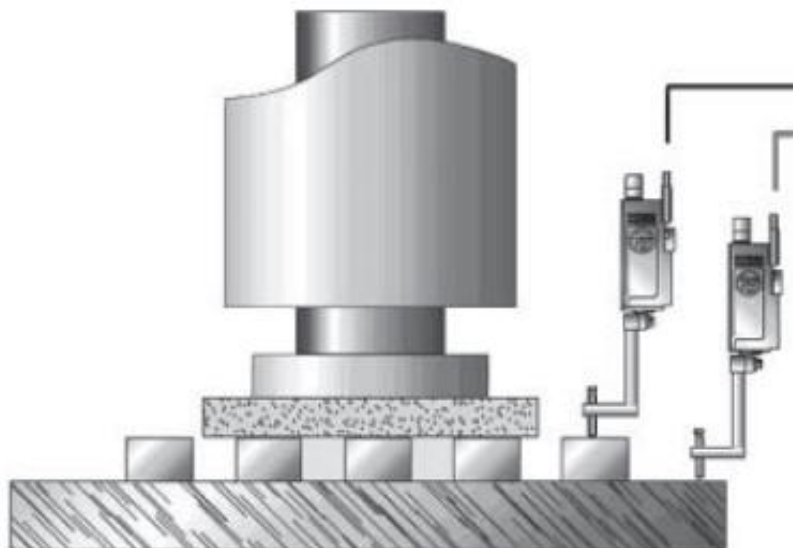


Рисунок 2 – Схема вимірювання при плоскому шліфуванні

В даний час у приладах активного контролю для шліфувальних верстатів найбільше поширення отримав індуктивний принцип перетворення розміру в покази шкального або цифрового індикатора.

Індуктивні прилади, що випускаються мають кілька конструктивних модифікацій, призначених для різного вимірювального оснащення. Застосовують лише диференціальні індуктивні перетворювачі – трансформаторні та напівмостові [1].

Пневматичний принцип перетворення застосовують рідко: лише при хонінгуванні та в підналагоджувачах для контролю діаметрів отворів малого діаметра після обробки. Однак і в цих випадках вимоги до швидкодії приладу змушують застосовувати пневматику у поєднанні з електронікою. Такий прилад зазвичай складається з пневматичної системи з пневматичною пробкою, пневмоіндуктивного або пневмотензометричного перетворювача та мікропроцесорного електронного блоку з цифровим відліком. На одноцільових та багатоцільових верстатах з лезовим інструментом, оснащених системою ЧПК, застосовують лінійні та кутові енкодери та датчики торкання, які служать для позиціонування та вимірювання інструменту та вимірювання розмірів заготовок, оброблюваних та оброблених деталей [5].

Засоби контролю з механічним перетворювачем у вигляді жорстких калібрів застосовують при хонінгуванні отворів. Обмежена точність, труднощі отримання декількох команд, неможливість регулювання розміру та гнучкого управління циклом обробки, відсутність спостереження за ходом обробки за шкалою та швидке зношення калібрів роблять цей метод неперспективним. Застосування його можливе тільки в спеціальних випадках, наприклад, при хонінгуванні, коли весь припуск знімається на одному режимі при дуже малих подачах.

При круглому шліфуванні на універсальних верстатах особливо часто у ремонтному виробництві застосовують механічні триконтактні навісні індикаторні скоби.

Оптоелектронні лінійні енкодери застосовують у приладах активного контролю з великими діапазонами вимірювань на шліфувальних верстатах з ЧПК та при контролі великих діаметрів на вальцешліфувальних верстатах. Головним чином їх застосовують для вимірювання переміщень та позиціонування вузлів на верстатах з лезовим інструментом спільно з датчиками торкання [5].

Діапазон вимірювання приладу активного контролю визначається припуском на обробку. При шліфуванні припуск зазвичай не перевищує 0,5-1,0 мм, тому діапазон вимірювання у більшості приладів, що випускаються, вибирається від -100 до $+500$ або від -100 до $+1000$ мкм. Діапазон вимірювання вимірювального оснащення та індуктивного перетворювача зазвичай не перевищує 1,0 мм. Тим не менш шкальний або цифровий блок керування калібрується зазвичай у діапазоні від -100 до $+500$ мкм або трохи більше з урахуванням необхідності налаштування приладу [4].

Межа вимірювання приладу значно більша, ніж діапазон вимірювання за шкалою. Межа вимірювання – величина, яку можна перебудувати вимірювальне оснащення (скоби, одноконтактні головки). Вимірювальне оснащення забезпечене змінними або перенастроюваними державками і наконечниками, які дозволяють вимірювати вироби різних розмірів. Наприклад, двоконтактні скоби для вимірювання зовнішніх діаметрів на круглошліфувальних верстатах дозволяють вимірювати діаметри в діапазоні від 2,5 до 80 мм. Аналогічно будується все вимірювальне оснащення приладів активного контролю.

Ціна поділки шкали або дискретність цифрової індикації – це зміна вимірюваної величини, що відповідає переміщенню вказівника на одну поділку шкали або кроку дискретності цифрової індикації. В аналогових приладах із шкальним індикатором часто є дві шкали: груба з ціною поділки 10 мкм та точна з ціною поділки 1,0 мкм. У деяких випадках, наприклад, у приладах для спряженого шліфування ціна поділки шкали становить 0,5 мкм.

У приладах із цифровою індикацією крок дискретності становить 0,1 мкм. Зрідка для більш грубих приладів вибирається крок дискретності 0,5 або 1,0 мкм. Діапазон показів цифрового пристрою автоматично виходить рівним $\pm 999,9$ мкм. Хоча для спостереження за перебігом обробки з дискретністю 0,1 мкм такий діапазон явно надмірний, а іноді і незручний, але він корисний, тому що дозволяє дуже точно налаштувати прилад за зразковою деталлю (на нуль) та встановити рівні спрацювання керуючих команд. Прилади з такою індикацією добре лінеарізуються при калібруванні.

Важлива метрологічна характеристика будь-якого вимірювального приладу – його чутливість (або роздільна здатність) – відношення переміщення покажчика шкали або зміна дискрети цифрового індикатора до вимірюваної величини, що викликала її зміну. Чутливість приладу активного контролю є безрозмірною величиною та рівноцінна передатному відношенню. Значення передавального відношення можуть становити 1000, 5000 та 10000. Це значення передавального відношення вибирається залежно від призначення приладу. Реальна чутливість приладу може бути істотно вищою і визначається величиною мінімального переміщення, яке може відчувати вимірювальне оснащення та індуктивний перетворювач і видати відповідний вихідний сигнал.

Прилад активного контролю для шліфувальних верстатів складається з трьох перетворюючих вимірювану величину елементів – механічного вимірювального оснащення (скоба, головка), індуктивного (або іншого) перетворювача та електронного блоку. Передатне відношення вимірювального оснащення намагаються обирати 1:1. Але іноді з конструктивних міркувань роблять менше 1:2 чи 1:3. У індуктивного перетворювача вибирається найбільш чутлива ділянка робочої характеристики, як правило, поблизу електричного нуля. За допомогою підсилювачів електронного блоку встановлюють задану ціну поділки чи дискретність цифрової індикації.

При установці приладу активного контролю на верстат необхідно забезпечити правильну, зручну та безпечну роботу приладу на верстаті, послідовність рухів вузлів приладу та верстата, забезпечити обмін цикловими командами приладу та верстата з метою зміни режимів різання та закінчення обробки, коли розмір деталі досягне заданого рівня.

За допомогою гідравлічної системи шліфувального верстата здійснюється переміщення вимірювального оснащення приладу: введення в положення вимірювання та відведення для встановлення та знімання оброблюваної деталі, а іноді і арретування вимірювальних важелів та контактних наконечників приладу. Часто арретування вимірювальних важелів приладів активного контролю здійснюють від пневматичної системи верстата чи заводської мережі.

Зв'язок приладу з верстатом для керування режимами обробки здійснюється за допомогою електричних команд (інтерфейсу), якими прилад та верстат обмінюються протягом циклу обробки. Використовують кілька видів обміну:

- найчастіше прилади видають на верстат і отримують від верстата релейні команди замикання або розмикання контактів електромагнітних реле. Розривна потужність контактів реле, що застосовуються в приладах, досягає 500 ВА при напрузі 110 або 220 В змінного струму. Такими потужними контактами можна включати безпосередньо силові електромагнітні пристрої (пускатчі, електромагніти) верстата;

- використовують команди у вигляді потенціального вихідного сигналу 24 В постійного струму, який включає малопотужні електромагнітні реле верстата. У вхідних та вихідних ланцюгах приладу застосовують так звані оптоелектронні розв'язки (оптрони), які захищають прилад від мережевих перешкод;

– при встановленні приладів на верстаті з ЧПК вихідна інформація видається у систему управління верстата у вигляді аналогового сигналу постійного струму. Аналоговий вихід індуктивних приладів має лінійну характеристику в діапазоні від -2 до $+10$ В з чутливістю $10-20$ мВ/мкм;

– на верстатах з ЧПК прилади можуть видавати кодові сигнали у вигляді інтерфейсу RS 232 згідно з протоколом обміну.

Крім керуючого інтерфейсу на зміну циклу подачі абразивного круга та його відведення при досягненні заданого розміру сучасні мікропроцесорні прилади видають у систему ЧПК верстата додаткову інформацію у цифровому вигляді про припуск, що залишився, швидкість знімання припуску, відхилення форми контрольованої поверхні та інформацію, необхідну для адаптивного керування.

Спосіб контакту вимірювальних наконечників приладу активного контролю з оброблюваною деталлю має принципове значення, оскільки визначає точність та надійність вимірювання. При контролі розміру у процесі обробки на шліфувальних верстатах вимірювана поверхня швидко переміщається під вимірювальними наконечниками, нагрівається в процесі різання та обливається змащувально-охолоджувальною рідиною, що зумовлює вимоги, що пред'являються способу контакту вимірювального оснащення з контрольованою деталлю. При активному контролі застосовують безконтактне, але частіше контактне вимірювальне оснащення.

Безконтактне оснащення має переваги перед контактним при контролі рухомої поверхні, але воно рідко застосовується для активного контролю. Безконтактне оснащення значно простіше контактного, не має рухомих елементів, не зношується і не залишає сліду на контрольованій поверхні.

Мале поширення безконтактного пневматичного оснащення пояснюється конструктивними міркуваннями. Безконтактне пневматичне оснащення застосовують при хонінгуванні, де сопла жорстко встановлені в хонінгувальній головці і не вимагають налаштування, а також для точних вимірювань у вигляді неперенастроєваних пристроїв (головним чином пневматичних калібр-пробок), виконаних для контролю одного розміру.

Точність безконтактного пневматичного оснащення залежить від шорсткості контрольованої поверхні, оскільки нею обумовлена поява похибки δ_{Ra} на кожне сопло:

$$\delta_{Ra} = 0,5Ra. \quad (1)$$

Тому безконтактне пневматичне вимірювання практично здійснюють при шорсткості поверхні трохи більше $Ra < 1,6$ мкм.

Систематична складова похибки визначається різницею між шорсткістю поверхні деталі, за якою налаштовують прилад, та шорсткістю оброблюваних деталей. Наявність випадкової складової обумовлено різницею шорсткостей деталей, що обробляються.

В даний час почали з'являтися безконтактні лазерні прилади. Поки що такі прилади застосовують для вимірювання інструменту на верстаті та попереднього налаштування інструменту поза верстатом [5].

Контактні вимірювальні пристрої для контролю в процесі обробки на шліфувальних верстатах оснащують лінійними та сферичними контактними наконечниками. З метрологічної точки зору слід віддавати перевагу сферичним наконечникам невеликого радіусу (1-2 мм). Однак при виборі форми наконечників необхідно враховувати можливу нестабільність їхнього положення відносно контрольованої поверхні та її форму. При контролі циліндричних деталей на круглошліфувальних верстатах використовують сферичні, циліндричні та ножеподібні наконечники з лінійним контактом, при контролі отворів на внутрішньошліфувальних верстатах застосовують сферичні наконечники малого радіусу, при плоскому шліфуванні використовують сферичні наконечники великого радіусу та наконечники у формі ролика з лінійним контактом.

Матеріалом для наконечників є твердий сплав і штучні або природні алмази з шорсткістю робочої поверхні $Ra = 0,1-0,2$ мкм. Твердий сплав застосовують у вигляді циліндрів малого діаметра. У більшості випадків застосовують штучні алмази, впаяні у спеціальні оправки. Природні алмази (крихту) застосовують для наконечників невеликих розмірів, наприклад, при контролі отворів малого діаметра.

Висновки. Управляючі прилади активного контролю забезпечують підвищення точності та продуктивності технології виготовлення виробів у машино- та приладобудуванні. Впровадження сучасних систем контролю та управління в металообробне обладнання дозволяє

виробляти деталі з високою точністю, адаптивно пристосовуватися до зовнішніх впливів, що змінюються. Для забезпечення високої точності обробки в сучасне металообробне обладнання впроваджують засоби автоматичного контролю розмірів, позиціонування, а також оснащують різними інтелектуальними датчиками, енкодерами лінійного та кутового переміщення механізмів верстата. Прилади контролю розмірів деталей забезпечують безперервний моніторинг роботи металообробного обладнання, і отримувана інформація використовується для зміни режиму подачі інструменту і припинення роботи при досягненні заданої позиції.

Інформаційні джерела

1. Марчук В. І, Михалевич В. Т. Автоматизоване управління точністю оброблення деталей: монографія. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2013. 184 с.
2. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Аналіз похибок обробки деталей при автоматичному розмірному контролі. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2023. Вип. 22. С. 31–37.
3. Денисюк В. Ю. Визначення похибок обробки деталей при використанні засобів активного контролю. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023)»: зб. тез доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р. Чернігів, 2023. Т. 1. С. 115–116.
4. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. 2020. Вип. 16. С. 38–47.
5. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Методика проєктування високоточних оптико-електронних приладів для безконтактного автоматичного вимірювання лінійних переміщень. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2023. Вип. 23. С. 22–28.

V. Denysiuk

Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF THE FEATURES OF DESIGN AND METROLOGICAL PROVISION OF ACTIVE CONTROL DEVICES

The article describes the main conditions for choosing a control scheme in the processing process to ensure high measurement accuracy. It has been established that currently in active control devices for grinding machines, the inductive principle of converting size into scale or digital indicator readings is the most widely used. The main metrological characteristics of the active control device, the functional connection of the device with the machine, their layout and the exchange of signals between the machine and the device are described. Methods of contact of the measuring tips of the active control devices with the processed part to determine the accuracy and reliability of the measurement are also described.

Key words: measurement, active control device, accuracy, error, processing, system, machine, signal, tip.

УДК 621.867.4

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-06

Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено розроблену на основі отриманих патентів України та виготовлену конструкцію експериментальної установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів. Дослідний зразок гвинтового конвеєра з обертовим кожухом надає можливість зміни кута нахилу конвеєра з відповідними модифікаціями бункера, частоти та напрямку обертання гвинтового робочого органу та кожуха, а також дозволяє забезпечити швидку зміну гвинтових робочих органів різних конструкцій: звичайних, із змінним діаметром вала у зоні завантаження, із змінним кроком витків, гофрованих, з прорізами, з лопатями. Забезпечено можливість керування гвинтового конвеєра та збору експериментальних даних за допомогою ПК, частотних перетворювачів Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite. Використання експериментальної установки дозволяє досліджувати: продуктивність гвинтового конвеєра при змішуванні сипких матеріалів, потужності приводів та крутні моменти на валах електродвигунів, величину моменту тертя, що виникає між кожухом та сипким матеріалом, коефіцієнт неоднорідності змішування сипких матеріалів.

Ключові слова: гвинтовий конвеєр, змішування, гвинтовий робочий орган, кожух, сипкий матеріал, експериментальна установка.

Постановка проблеми. Змішування сипких матеріалів є одним із найпоширеніших процесів харчової, хімічної, біохімічної промисловості, будівництва, аграрного виробництва тощо. Однією із тенденцій щодо підвищення економічної ефективності змішування сипких матеріалів є заміна окремих машин для змішування та переміщення таких матеріалів на гвинтові конвеєри-змішувачі, що одночасно забезпечують функції змішування, транспортування та розподілу сипких матеріалів [1-3].

Змішувачі на базі гвинтових конвеєрів порівняно із конструкціями альтернативних змішувачів неперервної дії характеризуються простотою конструкції, герметичністю, можливістю застосування в автоматизованих процесах, мають високу продуктивність а також можуть швидко перенастроюватись на різноманітні режими транспортування та змішування сипких матеріалів залежно від їх характеристик та необхідної якості змішування.

Одним із важливих завдань підвищення переваг гвинтових конвеєрів є забезпечення якісного об'ємного змішування компонентів та згладжування зміни їх концентрації внаслідок нерівномірного завантаження із бункера. Для підвищення параметрів цих показників порівняно із роботою типових тихохідних гвинтових конвеєрів, що поєднують операції транспортування та змішування виникає необхідність у модернізації конструкції гвинтових конвеєрів, зокрема зміною геометричних параметрів гвинтових робочих органів [4], додаванням обертового руху кожухові [5-8] та коливного руху шнекові [9].

Завданням модернізації гвинтових конвеєрів із додаванням нових елементів у їх конструкції та кінематиці є підвищення ефективності змішування сипких матеріалів за рахунок збільшення траєкторії переміщення частинок компонентів із зони завантаження до зони вивантаження без збільшення габаритних розмірів змішувачів.

Для визначення впливу модифікації гвинтових конвеєрів на траєкторію переміщення частинок окремих компонентів використано метод дискретних елементів [10-12], математичне моделювання [13-15] та експериментальні дослідження [16-17].

Ефективність процесу змішування гвинтовими конвеєрами залежить від їх конструктивних особливостей, зокрема від геометрії обмеженого об'єму, де проходить змішування, матеріалів робочих елементів, швидкості і часу змішування, властивостей сипких компонентів, що піддаються змішуванню, таких як розміри частинок, вологість, коефіцієнти тертя. Дослідження

впливу цих параметрів аналітичними методами є складними і не забезпечують достатньої точності, тому важливими є експериментальні дослідження із проектуванням і виготовленням установок гвинтових конвеєрів, зокрема із обертовими кожухами.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є розроблення та виготовлення конструкції експериментальної установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

Однією із сучасних тенденцій проектування гвинтових конвеєрів є створення можливості транспортування з одночасним поєднанням різноманітних технологічних операцій оброблення сипких матеріалів. Серед таких операцій як калібрування, подрібнення, очищення, сепарація важливе місце займають процеси змішування різних сипких матеріалів, тому створення, виготовлення та дослідження прогресивних конструкцій гвинтових конвеєрів для забезпечення вказаного процесу є актуальним завданням.

На основі попередньо виконаного літературно-патентного пошуку та модифікованого морфологічного аналізу здійснено синтез та одержано патенти України на корисні моделі на декілька конструкцій гвинтових конвеєрів з обертовими кожухами [18-22], що забезпечують одночасне транспортування та змішування сипких матеріалів. Для дослідження запропонованих конструкцій гвинтових конвеєрів спроектовано і виготовлено експериментальну установку.

Дослідний зразок гвинтового конвеєра з обертовим кожухом із можливістю зміни кута нахилу конвеєра, частоти та напрямку обертання гвинтового робочого органу та кожуха, зміни конструкції гвинтових робочих органів зображено на рисунках 1, 2, 3, 4 та 5.

Основним конструктивними елементами експериментального зразка гвинтового конвеєра (рис. 1, 2, 3, 4) є: базова рама 1, на якій нерухомо встановлено вісь 2. На вісі 2 розміщено два підшипникових вузли 3, що закріплені на рухомій рамі 4. Це дозволяє, обертаючи рухома раму 4 на підшипникових вузлах 3 відносно осі 2, змінювати кут нахилу робочих органів конвеєра відносно горизонту.

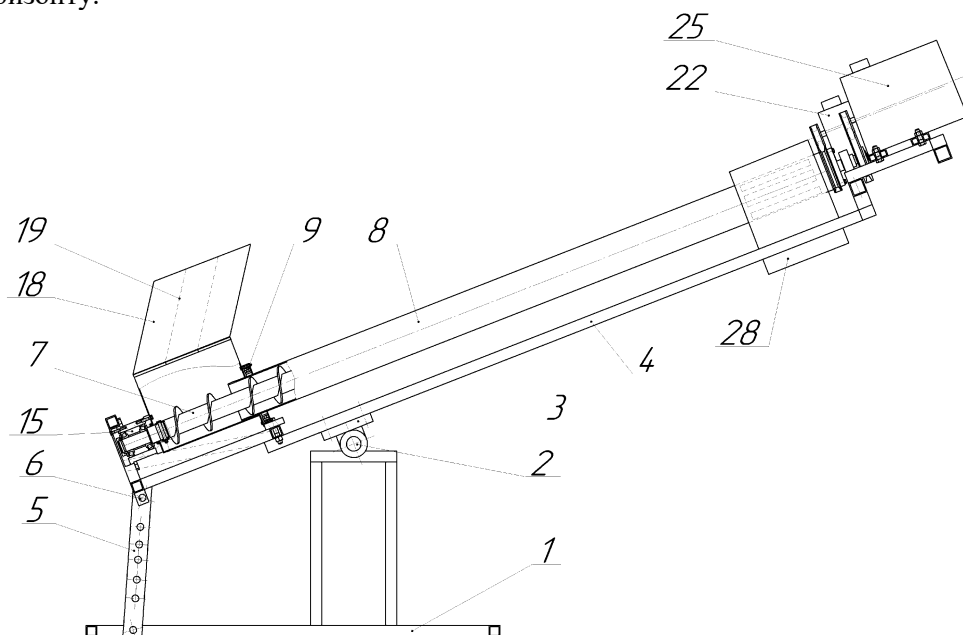


Рисунок 1– Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження процесу одночасного транспортування і змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром з обертовим кожухом

Фіксація кутового розміщення рухомої рами 4, що визначається план-матрицею проведення експериментальних досліджень, виконується за допомогою планки 5 та болтів 6, що встановлюються у отвори планки 5, рухомої рами 4 та базової рами 1.

Гвинтовий робочий орган 7 встановлено в середині обертового кожуха 8, що на двох підшипникових вузлах 9 та 10 розміщений на рухомій рамі 4. З верхньої та нижньої торцевої сторони гвинтового робочого органу за допомогою болтів 11 встановлено дві півосі 12 та 14. Це дозволяє швидко замінювати різні типи гвинтових робочих органів.

Нижня піввісь 12 встановлена у підшипниковому вузлі 15 із двома спареними конічними роликowymi підшипниками, що дозволяє протидіяти осьовим навантаженням на гвинтовий робочий орган. Підшипниковий вузол 15 жорстко приєднано до рухомої рами 4. Верхня піввісь 14 встановлена у підшипнику 16, що розміщений у шківі 17, який жорстко приєднано до обертового кожуха 8. Також можливий варіант розміщення верхньої піввісі 14 у підшипниковому вузлі, що приєднаний до рухомої рами 4.

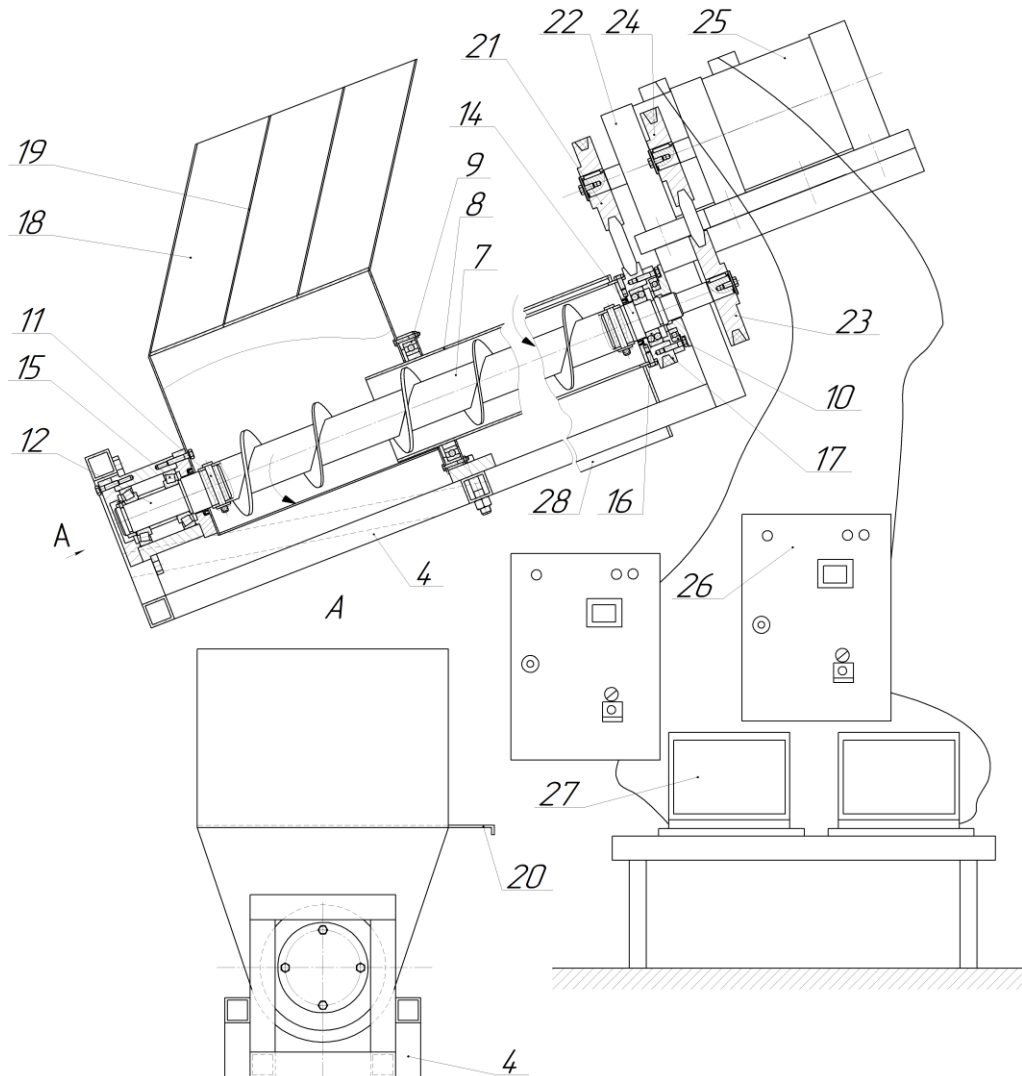


Рисунок 2 – Робочі органи експериментальної установки для дослідження процесу одночасного транспортування і змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром з обертовим кожухом

Для завантаження сипких матеріалів у конвеєр використано бункер 18 із радіусним дном, що жорстко закріплений на рухомій рамі 4. У бункері 18 встановлено перегородки 19, кількість яких та відстань між ними можна змінювати залежно від необхідної кількості різних сипких матеріалів, що піддаються одночасному транспортуванню та змішуванню. Для регулювання коефіцієнта завантаження конвеєра у бункері 18 також встановлені шибери 20, що дозволяють змінювати величину отворів пересипання матеріалів окремо для кожного з об'ємів між перегородками 19 бункера 18.

Для розвантаження конвеєра в межах патрубку 28 на обертовому кожусі 8 сформовано рівномірно розміщені по колу прямокутні пази.

Шків 17 обертового кожуха 8 через пасову передачу 21 приєднано до електродвигуна 22. На верхній піввісі 14 закріплено шків 23, що через пасову передачу 24 приєднано до електродвигуна 25.

До електродвигунів 24 та 25 за допомогою кабелів під'єднано два окремих перетворювачі 26 частоти струму (Altivar 71), що подається із мережі до електродвигунів. Керування роботою перетворювачів частоти струму, а відповідно і електродвигунами та конвеєром загалом здійснюється за допомогою двох ПК 27 з програмним забезпеченням PowerSuite.

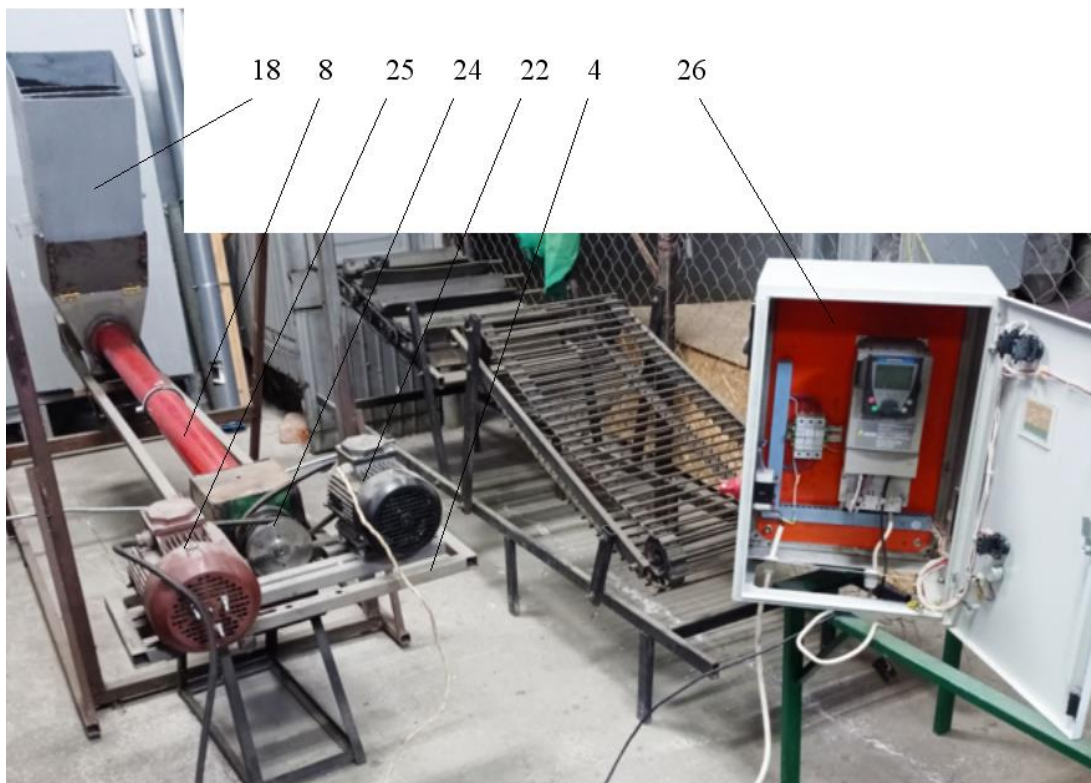


Рисунок 3 – Фото загального вигляду експериментальної установки

Застосування частотних перетворювачів 26 дозволяє плавно збільшувати та зменшувати частоти обертання кожуха 8 та гвинтового робочого органа 7 у широкому діапазоні, що забезпечує виконання досліджень відповідно до розробленої методики проведення експериментів.

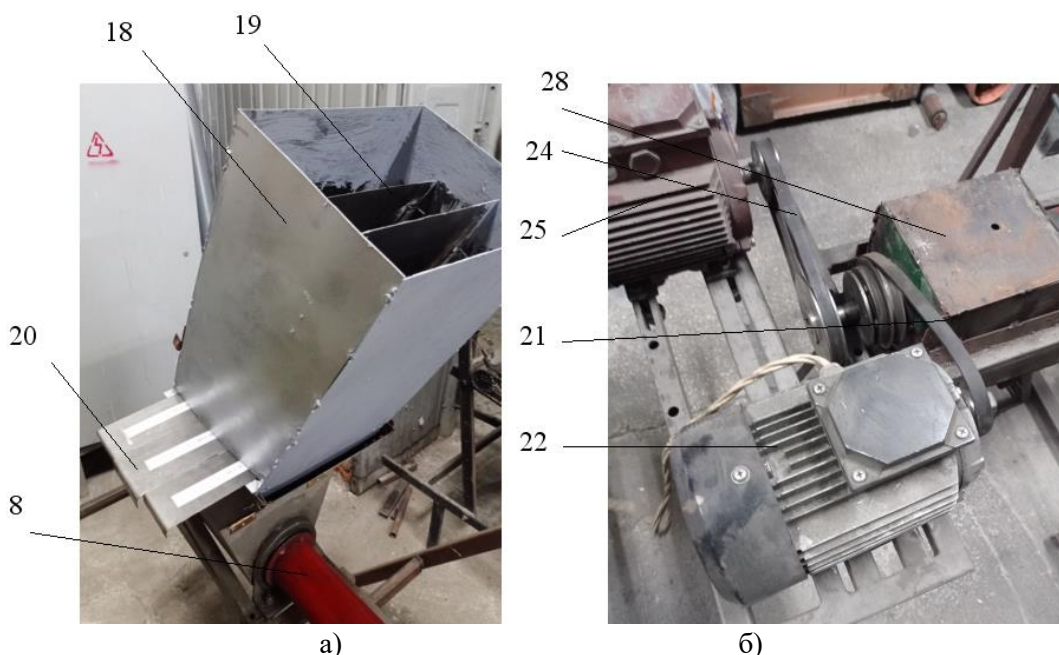


Рисунок 4 – Фото бункера а) та приводів б) експериментальної установки

Гвинтовий конвеєр працює у режимах транспортування вантажу із підвищеною продуктивністю при обертанні кожуха 8 проти напрямку обертання гвинтового робочого органу 7 та у режимі змішування сипких матеріалів із обертанням кожуха 8 у напрямку обертання гвинтового робочого органу 7.

Під час виконання експериментальних досліджень різні види сипкого матеріалу подавали між перегородками 19 бункера 18. При вмиканні електродвигунів 22 та 25 за допомогою гвинтового робочого органу 7 та обертового кожуха 8 відбувалось транспортування із одночасним змішуванням сипкого матеріалу вздовж кожуха 8 до парубка 28, звідки матеріал переміщувався у мірну тару. Керування режимами роботи двигунів 22 та 25 здійснювалось за допомогою ПК 26, частотних перетворювачів Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite. В результаті одержували інформацію у вигляді чисельних даних, представлених графіками зміни потужності, що витрачається для транспортування та змішування сипких матеріалів, та крутних моментів на валах двох електродвигунів.

Продуктивність транспортування та змішування сипкого матеріалу визначали методом зважування матеріалу, що піддавався транспортуванню і змішуванню за визначений проміжок часу.

При проведенні експериментальних досліджень можливе використання різноманітних гвинтових робочих органів: звичайних, із змінним діаметром вала у зоні завантаження, із змінним кроком витків, гофрованих, з прорізами, з лопатями.

Використання експериментальної установки (рис. 1–4) дозволяє досліджувати:

1. Продуктивність гвинтового конвеєра при одночасному транспортуванні та змішуванні сипких матеріалів із обертанням кожуха в напрямку обертання гвинтового робочого органу або при його нерухомому стані.

2. Потужності приводів та крутні моменти на валах електродвигунів для забезпечення обертання кожуха та шнека при одночасному транспортуванні та змішуванні сипких матеріалів.

3. Величину моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню.

4. Моменти пуску електродвигунів приводів обертання кожуха та гвинтового робочого органу для різних комбінацій їх роботи.

5. Коефіцієнт неоднорідності змішування сипких матеріалів при роботі гвинтового конвеєра із обертанням кожуха в напрямку обертання гвинтового робочого органу або при його нерухомому стані.

Частота обертання гвинтового робочого органу становить від 0 до 1400 об/хв, частота обертання кожуха - від 0 до 700 об/хв. Кут нахилу гвинтового конвеєра від 0 до 90 градусів з відповідними модифікаціями бункера.

Величину моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню та змішуванню гвинтовим конвеєром можливо визначати за схемою, представленою на рис. 5. При обертанні гвинтового робочого органу конвеєра динамометричним ключем 1 вимірювали крутний момент, що виникає на обертовому кожуху 2 за допомогою важеля 3 із розміщеними на ньому мірними вантажами 4. Замість мірних вантажів також можна використовувати динамометр.



Рисунок 5 – Фото процесу визначення величини моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню та змішуванню гвинтовим конвеєром

Висновок. Представлено розроблену на основі отриманих патентів України та виготовлену конструкцію експериментальної установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів. Дослідний зразок гвинтового конвеєра з обертовим кожухом надає можливість зміни кута нахилу конвеєра від 0 до 90 градусів з відповідними модифікаціями бункера, частоти та напрямку обертання гвинтового робочого органу від 0 до 1400 об/хв та кожуха - від 0 до 700 об/хв, а також дозволяє забезпечити швидку зміну гвинтових робочих органів різних конструкцій: звичайних, із змінним діаметром вала у зоні завантаження, із змінним кроком витків, гофрованих, з прорізами, з лопатями. Забезпечено можливість керування гвинтового конвеєра та збору експериментальних даних за допомогою ПК, частотних перетворювачів Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite. Використання експериментальної установки дозволяє досліджувати: продуктивність гвинтового конвеєра при змішуванні сипких матеріалів, потужності приводів та крутні моменти на валах електродвигунів, величину моменту тертя, що виникає між кожухом та сипким матеріалом, коефіцієнт неоднорідності змішування сипких матеріалів.

Інформаційні джерела

1. Hewko V.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskyi R.O. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. INMATEH: Agricultural engineering. Bucharest/Romania, 2015. Vol. 47. No. 3. P. 156-163.
2. Рогатинський Р.М., Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р. Синтез гвинтових транспортно-технологічних механізмів з транспортуючими кожухами. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Харків, 2016. Вип. 168. С. 149-155.
3. Рогатинський Р.М., Гевко Ів.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль, 2014. 280 с.
4. Дячун А.Є., Ляшук О.Л., Котик Р.М., Михайлюк В.П., Гандзій В.С. Дослідження кінематики сипкого матеріалу у гвинтовому конвеєрі-змішувачі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва. Харків, 2019. Вип. 198. С. 233-243.
5. Rogatynskyi R., Nevko I., Diachun A., Rogatynska O., Melnychuk A. The cargo movement model by the screw conveyor surfaces with the rotating casing. Scientific Journal of TNTU. Tern. : TNTU, 2018. Vol. 92. No 4. P. 34-41.
6. Rohatynskyi R., Gevko I., Diachun A., Lyashuk O., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. Acta Technologica Agriculturae. Nitra/Slovak, 2019. Vol. 4. P. 141-146.
7. Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Золотий Р.З., Шуст І.М. Техніко-економічне обґрунтування підвищення продуктивності транспортно-технологічних процесів за допомогою гвинтових конвеєрів з обертовими кожухами. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва. Харків, 2018. Вип. 190. С. 318-326.
8. Рогатинський Р.М., Дячун А.Є., Мельничук А.Л. Дослідження швидкостей зернового матеріалу у гвинтовому конвеєрі із обертовим кожухом графоаналітичним методом. Сільськогосподарські машини. Луцьк, 2017. №38. С. 125-132.
9. Дячун А.Є., Чвартацький Р.І., Мельничук С.Л., Маруніч О.П. Дослідження кінематики вантажу у середньошвидкісному гвинтовому конвеєрі-змішувачі із осьовим коливанням шнека. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця, 2017. №1(96). С. 181-186.
10. Jovanović A., Pezo L., Stanojlović S., Kosanić N., Lević L. Discrete element modelling of screw conveyor-mixers. Hemijska industrija. 2015. Vol. 69(1). P. 95-101.
11. Zhao R., Guo L., Gao W., Xiao X., Liu Y. Structure Optimization Design of Screw Conveyor based on EDEM. Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2200. 012002.
12. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer. Powder Technol. 2019. 352. P. 193-208.

13. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Луцьк, 2001. Вип. 8. С. 72-82.

14. Рогатинський Р., Гевко І., Рогатинська Л. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. Вісник ТНТУ. 2013. № 1 (69). С. 116–125.

15. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. Вісник ТНТУ. Тернопіль, 2011. № 1 (16). С. 69-77.

16. Senda S., Renanto, Roesyadi A., Sumaryono W., Bindar Y. The Power Consumption Performance of an Orbiting Screw Solid-Solid Mixer. ITB J. Eng. Sci. 2012. Vol. 44. No. 3. P. 287-302.

17. Pezo L.L., Pezo M., Terzic' A., Jovanovic' A.P., Loncar B., Govedarica D., Kojic' P. Experimental and Discrete Element Model Investigation of Limestone Aggregate Blending Process in Vertical Static and/or Conveyor Mixer for Application in the Concrete Mixture. Processes. 2021. 9. 1991.

18. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом: пат. 154547 Україна: МПК В65G 33/08 (2006.01). № u202301799; заявл. 18.04.2023; опубл. 22.11.2023, Бюл. №47. 4 с.

19. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом: пат. 154996 Україна: МПК В65G 33/08 (2006.01). № u202302289; заявл. 15.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. №2. 3 с.

20. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом: пат. 154380 Україна: МПК В65G 33/08 (2006.01). № u202302288; заявл. 15.05.2023; опубл. 09.11.2023, Бюл. №45. 4 с.

21. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом: пат. 154025 Україна: МПК В65G 33/08 (2006.01). № u202301805; заявл. 18.04.2023; опубл. 27.09.2023, Бюл. №39. 3 с.

22. Гвинтовий змішувач з обертовим кожухом: пат. 137347 Україна: МПК В65G 33/08 (2006.01). № u201905473; заявл. 21.05.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. №19. 3 с.

Diachun A.Y., Dmytriv O.R., Hevko B.R., Koval S.O., Tsapyk R.P.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

EXPERIMENTAL AUTOMATED EQUIPMENT OF THE SCREW CONVEYOR WITH THE ROTATING CASING FOR BULK MATERIALS MIXING

The article presents the design of the experimental equipment of the screw conveyor with the rotating casing developed on the basis of the received patents of Ukraine and manufactured for the study and selection of rational parameters of the simultaneous transportation and mixing of bulk materials. The experimental sample of the screw conveyor with the rotating casing provides the possibility of changing the conveyor inclination angle with the corresponding modifications of the hopper, the frequency and direction of the screw working body and the casing rotation, and also allows for quick change of the screw working bodies of various designs: conventional, with a variable diameter of the shaft in the loading area, with a variable pitch of flights, corrugated, with slots, with blades. The ability to control the screw conveyor and collect experimental data using the PC, Altivar 71 frequency converters, and PowerSuite software is provided. The use of an experimental equipment allows to study: the productivity of the screw conveyor when mixing bulk materials, the power of drives and torques on the electric motors shafts, the magnitude of the friction torque that occurs between the casing and the bulk material, the coefficient of inhomogeneity of the bulk materials mixing.

Keywords: screw conveyor, mixing, screw working body, casing, bulk material, experimental equipment.

УДК 685.34.05

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-07

Кармаліта А.К., Пундик С.І.

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

ВЗАЄМОДІЯ СТРУМЕНІВ ПОВІТРЯ З ПОВЕРХНЕЮ ПЛОСКОЇ ДЕТАЛІ В ПРОЦЕСІ ОРГАНІЗАЦІЇ СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

У статті визначено, що для успішного застосування промислових роботів в технологічних процесах легкої промисловості необхідно створити технічні системи для контролю положення об'єктів роботизації та їх правильної орієнтації. Визначено, що на відміну від приладобудівної, машинобудівної та деяких інших галузей промисловості, де орієнтування та контроль положення в основному виконується по геометричних ознаках об'єкта, в легкій промисловості потрібно виконувати додатковий вид контролю положення – по властивостях поверхонь. Тому актуальною є задача створення пристроїв для такого контролю. В статті описано результати дослідження способу контролю по властивостях поверхонь з допомогою стиснутого повітря, на який автори отримали патент на винахід. В результаті досліджень визначені сили взаємодії струменів повітря з поверхнями плоских деталей в процесі контролю їх положення. Описано результати досліджень характеристик поверхонь плоских деталей взуття, шорсткість яких є основним фактором, який впливає на процес контролю. Визначені напрямки подальших досліджень процесу контролю.

Ключові слова: струмені повітря, шорсткість поверхні, сопла, тиск, сила

Вступ. Промислові роботи займають все більшу частку в технічному оснащенні підприємств легкої промисловості. Більша частина з них це не адаптивні програмні роботи, які працюють по жорсткій програмі. Менша частина це адаптивні роботи, які мають сенсорні захвати. Якщо для програмних роботів необхідне обов'язкове впорядкування середовища об'єктів обробки то для адаптивних потрібні сенсорні захвати, які будуть розпізнавати положення тих же об'єктів. Як в першому так і в другому випадку необхідно створити технічні системи для контролю положення об'єктів роботизації так їх правильної орієнтації.

Постановка проблеми. На відміну від приладобудівної, машинобудівної та деяких інших галузей промисловості, де орієнтування та контроль положення в основному виконується по геометричних ознаках об'єкта, в легкій промисловості потрібно виконувати додатковий вид контролю положення – по властивостях поверхонь. Необхідність контролю положення плоских деталей взуття по асиметрії властивостей поверхонь в основному обумовлена двома причинами: 1. Наявністю різної фактури, шорсткості та ворсистості лицьової та виворітної сторін деталей. 2. Парністю деталей взуття, тобто наявністю дзеркальних лівої та правої деталей, що виключає заміну контролю за асиметрією властивостей поверхонь відомими способами контролю за геометричними ознаками. Відомі різні способи контролю положення плоских деталей взуття по властивостях поверхонь, в тому числі і механічні. Механічні способи контролю положення плоских деталей взуття по властивостях поверхонь засновані на використанні асиметрії їх фрикційних властивостей або величини нерівностей поверхонь. В окремому випадку в процесі контролю положення за допомогою пристроїв, що реалізують ці способи, можливо одночасне транспортування деталі на робочу позицію технологічного устаткування або на позицію переорієнтування [1]. Нами досліджується спосіб контролю положення плоских деталей взуття за допомогою струменів повітря, на який отримано патент на винахід [2]. І головною проблемою є вивчення процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталі з метою забезпечення надійного контролю.

Аналіз останніх досліджень. На рис. 1 зображена схема контролю положення плоских деталей взуття по асиметрії нерівностей і ворсистості поверхонь за допомогою струменів повітря [2]. На схемі представлено дві пневматичні камери 1, встановлені на платформі 2, що мають патрубки 3 для приєднання до системи подачі стисненого повітря. У стінці кожної камери, зверненої до протилежної камери (яку далі будемо називати несучою поверхнею камери), виконані рівномірно розподілені по всій її поверхні отвори (сопла) 4, осі яких розташовані під однаковим кутом до поверхні стінки. При цьому осі отворів однієї камери паралельні осям отворів іншої камери й суми площ отворів у стінках камер рівні між собою.

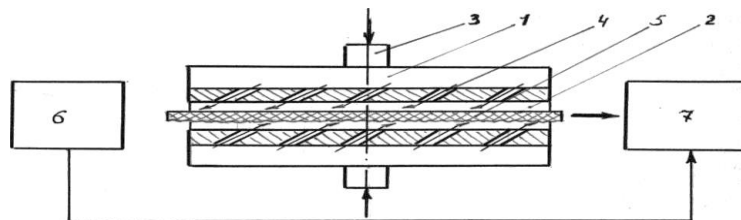


Рисунок 1 – Схема контролю положення плоских деталей взуття по асиметрії шорсткості поверхонь за допомогою струменів повітря

Усі зазначені вимоги для розташування й розмірів отворів необхідні для створення рівнозначних умов впливу струменів повітря на протилежні поверхні деталі 5.

Контроль здійснюється в такий спосіб. Підлягаюча контролю деталь 5 встановлюється своїм найменшим розміром (ребром) на платформі 2 між двома камерами 1. Стиснене повітря через патрубки 3 подається в камери й виходить звідти через отвори 4, діючи на поверхню деталі. В результаті деталь буде переміщатись в сторону дії більшої сили тиску струменів повітря і виштовхуватись на позицію обробки 6 чи переорієнтації 7.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу взаємодії струменів повітря з поверхнею плоскої деталі будемо розглядати деталь як нерухоме тіло, розміщене в потоці повітря, що набігає на нього. Потік повітря характеризується швидкістю V , яка може змінюватись від точки до точки при обтіканні тіла.

Як матеріальне середовище повітря наділене певною щільністю ρ , яка характеризує масу одиниці об'єму повітря (1,25 кг на кубометр). Кожна частка рухомого повітря має кінетичну енергію, щільність якої залежить від швидкості повітря в даній точці і дорівнює

$$q = \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

Кінетична енергія є мірою тиску, який створює потік на поставлену поперек нього перешкоду. Сила, що діє на плоску деталь, утворюється за рахунок того, що вона, пригальмовуючи повітряний потік, відбирає частину цієї енергії.

Розглянемо, які сили діють на сторони плоскої деталі в потоці повітря, яке виходить із сопел камер. При цьому зробимо два припущення:

1. При зустрічі струменя повітря, яке виходить із сопел, з поверхнею деталі воно розтікається по всій поверхні у всі сторони рівномірно.

2. Повітря, яке виходить із різних сопел, розглядаємо як суцільний потік, що діє на всю поверхню деталі.

Плоска деталь, поставлена вздовж повітряного потоку (рис. 2), створює виникнення сили опору навіть за мінімального поперечного перерізу деталі.

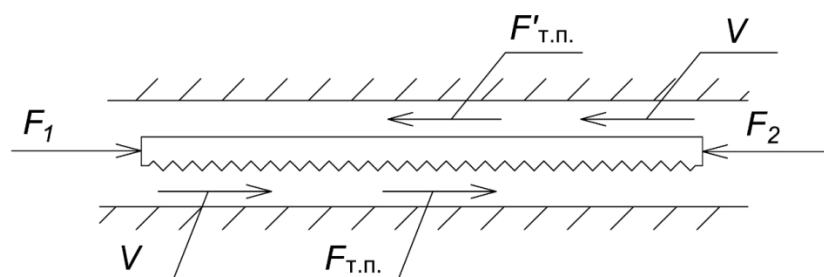


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на плоску деталь в потоці повітря:

F_1 і F_2 – сили переміщення деталі під дією протилежних потоків повітря; $F_{т.п.}$ і $F'_{т.п.}$ – сили тертя повітря об поверхні деталі; V – швидкість потоку повітря

Шар повітря, що прилягає до деталі, загальмовується через тертя об нерухому поверхню тим сильніше, чим більша площа деталі S . Кінетична енергія загальмованого струменя переходить у теплову енергію тертя, а інерція струменя передається деталі та тягне її у напрямку потоку із силою [3, 4]

$$F = CqS = \frac{c\rho V^2 S}{2} \quad (2)$$

Очевидно, результуюча сила, яка буде виштовхувати деталь з позиції контролю:

$$F = F_1 - F_2 \quad (3)$$

У формулі (2) C - так званий коефіцієнт аеродинамічної сили, який вказує, яка частка енергії потоку перетворюється на енергію, що рухає деталь. Цей коефіцієнт залежить від форми поверхні, її шорсткості і являється вичерпною характеристикою корисної роботи повітряного потоку. Таким чином, можна сказати, що дослідження зводиться до вивчення впливу різних чинників на величину C . І основним чинником є шорсткість поверхонь деталі.

Розглянемо характеристику поверхонь взуттєвих матеріалів, положення деталей з яких можна контролювати даним способом в процесі їх технологічної обробки.

У взуттєвому виробництві плоскі деталі взуття отримують з наступних матеріалів [5-7]: натуральних шкір, синтетичних матеріалів для низу взуття, текстильних матеріалів (тканин, трикотажних полотен, нетканих полотен, штучного хутра, дубльованих текстильних матеріалів), картону, м'якої штучної шкіри, колагенової синтетичної шкіри.

Лицьовий шар шкіряних матеріалів в межах однієї топографічної ділянки відрізняється від виворітного мікро і макроструктурою. Різні властивості поверхонь лицьового та виворітного шарів деталі мають усі шкіряні матеріали верху, крім замші, велюру та нубуку, більшість необроблених деталей низу, за винятком виготовлених зі шкір особливої прокатки.

Особливий інтерес становлять поверхні шкіряних матеріалів після їх обробки: шліфування, скуйовджування, тиснення, двоїння [5, 6].

На рис. 3, а показано фотографію розташування нерівностей на поверхні шкіряної деталі, на рис. 3, б – профіль поверхні.



а)



б)

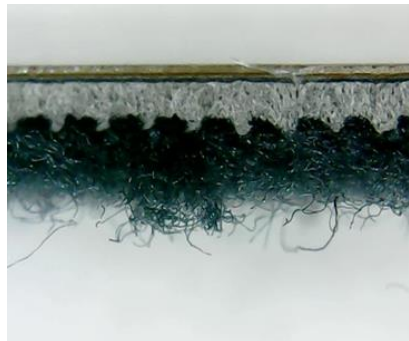
Рисунок 3 – Фотографія розташування нерівностей на поверхні з більшою шорсткістю шкіряної деталі а) та профіль поверхонь б)

Майже всі види синтетичних матеріалів для низу взуття випускаються з різним малюнком (мереєю) на ходовій та неходовій поверхні. Тільки підошви із пластшкіри та деякі види каучукових підошв мають до обробки однаковий малюнок на обох сторонах. Ці деталі набувають різних властивостей поверхонь у процесі обробки: двоїння, шліфування, промазки клеєм і т.д.

На рис.4, а показано фотографію розташування нерівностей та профілю поверхні б шкірзамінника (рис. 4, б). Як видно, розташування нерівностей та їх профіль мають складний характер.



а)



б)

Рисунок 4 – Фотографія розташування нерівностей на поверхні з більшою шорсткістю шкірзамінника а) та профіль поверхонь б)

Штучне хутро застосовується для підкладки в зимовому взутті та оздобленні. Виробляють його на тканинній, трикотажній та нетканій основах механічним та клейовим способами. Тканини хутра виробляють складним переплетенням прутковим і подвійним способами.

Штучне хутро характеризується властивостями волосяного покриву ґрунту та хутра в цілому. Висота ворсового покриву повинна бути не менше 7 мм, кут нахилу волокон від 18° до 65° , густина від 140 до 608 г/м².

На рис. 5, а показана фотографія розташування нерівностей на стороні з більшими нерівностями та профіль поверхні штучного хутра (рис. 5, б).



Рисунок 5 – Фотографія розташування нерівностей штучного хутра а) та профілю поверхні б)

Як видно з рис. 3, 4, 5, розташування нерівностей на поверхнях та їх профіль в даних взуттєвих матеріалах мають складний характер.

Тиснення лицьової поверхні шкіряних деталей низу взуття, а також галантерейних шкір з декоративною метою також призводить до появи на ній нерівностей різного розташування та профілю.

Створення різних рифлень, малюнків та інших нерівностей виконується з різною декоративною та експлуатаційною метою. Це добре видно із розгляду окремих видів синтетичних матеріалів. Різновидом пористих гум є вулканіт, лицева поверхня якого має малюнок "букле" з декоративною метою [5, 8].

Представник шкіроподібних гум волокнит, який застосовується для підшов дитячого взуття, має спеціальний малюнок "букле", "стільники" або "морозець" з декоративною метою.

Транспарентні підшви випускають із глибоким рифленням на ходовій поверхні підшви, що збільшує коефіцієнт тертя її з поверхнею дорожнього покриття та знижує витрату каучуку.

На рис. 6 показана фотографія перпендикулярних зрізів мікропористих гумових підшов, що мають гладку неходову поверхню і рифлення на ходових поверхнях. Профіль виступів нерівностей має неправильну геометричну форму, розташування виступів на поверхні – із змінним кроком.



Рисунок 6 – Профіль гумової підшви

Особливий інтерес представляють синтетичні матеріали для деталей низу спеціального взуття, що мають нерівності правильної геометричної форми, які закономірно розміщені на поверхні.

Так жиростійкі підшви для підвищення коефіцієнта тертя по за жиреній поверхні керамічної плитки підлоги на ходовій поверхні мають глибоке рифлення з кутом нахилу малюнка рифлення 60° по відношенню до поздовжньої осі підшви або мають на ходовій поверхні присоски. Застосовуються для взуття, що використовується на підприємствах м'ясомолочної промисловості.

Фрикційні гумові підшви характеризуються підвищеним коефіцієнтом тертя об метал. Ця властивість досягається за рахунок пористості волокнистого наповнювача та глибокого малюнка

рифлення ходової поверхні підошви. Взуття на такій підошві використовується робітниками-будівельниками та монтажниками-верхолазами.

Гумову підошву для гірськолижних черевиків випускають у вигляді пластин із рифленою ходовою поверхнею. Непориста гума з рифленням на лицьовій поверхні "дрібне букле" має високу зносостійкість, гнучкість, легкість. Застосовується для легкоатлетичного взуття та взуття для вільної боротьби. Для кросового взуття застосовують гуму непористої структури завтовшки 3,5-4,5 мм з рифленням "калоша" або "хвиля".

Висновок. Отже, в результаті досліджень визначені сили взаємодії струменів повітря з поверхнями плоских деталей в процесі контролю положення плоских деталей взуття за властивостями їх поверхонь і фактори, які впливають на процес контролю. Аналіз поверхонь взуттєвих матеріалів показав, що шорсткість їх поверхонь настільки різноманітна, що визначити аналітичним способом коефіцієнт аеродинамічної сили C не можливо. Тому нами створений стенд для експериментального визначення його для різних матеріалів, які застосовуються для виробництва взуття. Результати експериментів будуть опубліковані в наступній статті.

Інформаційні джерела

1. Кармаліта А. К., Пундик С. І., Драпак Г. М., Мельник В. І. Аналіз механічних способів контролю положення плоских деталей взуття по властивостях поверхонь. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. №3. С. 194-198. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-194-198>.

2. Патент на корисну модель 154403 UA, МПК B65H 3/08 (2006.01) Спосіб орієнтованої подачі на обробку плоских деталей з різною шорсткістю поверхонь / Кармаліта А.К., Пундик С.І.; – № 2023 02942; заявл. 16.06.2023; опуб. 08.11.2023, Бюл. № 1. 3 с.

3. Forces on sails. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Forces_on_sails.

4. Гидроаэродинамика парусного судна. URL: <https://sea-man.org/aerodinamika-parusa.html#hodkost-parusnogo-sudna>.

5. Коновал В. П., Гаркавенко С. С., Свістунова Л. Т. Універсальний довідник взуттєвика. К.: Лібра, 2010. 720 с.

6. Коновал В. П., Свістунова Л. Т., Олійникова В. В. Технологія взуттєвого виробництва: підручник для учнів професійно-техн. навчальних закладів. К.: Либідь, 2003. 368 с.

7. Коновал В.П., Рибальченко В.В., Хом'як М.Є., Шевченко Г.І. Натуральні та штучні матеріали для взуття. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: КНУТД, 2005. 218с.

8. Бурмістенков О. П., Злотенко Б. М., Коновал В. П., Панасюк І. В., Скиба М. Є., Синюк О. М. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія. Хмельницький, 2007. 255 с.

Karmalita A. K., Pundyk S. I.

Khmelnyskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

THE INTERACTION OF AIR JETS WITH THE SURFACE OF A FLAT PART IN THE PROCESS OF ORGANIZING THE ENVIRONMENT FOR INDUSTRIAL ROBOTS

The article determines that for the successful application of industrial robots in technological processes of light industry, it is necessary to create technical systems to control the position of robotic objects and their correct orientation. It was determined that, unlike the instrument-making, machine-building and some other branches of industry, where orientation and position control is mainly performed based on the geometric features of the object, in light industry it is necessary to perform an additional type of position control - based on the properties of the surfaces. Therefore, the task of creating devices for such control is urgent. The article describes the results of research into a method of controlling surface properties using compressed air, for which the authors received a patent for the invention. As a result of research, the forces of interaction of air jets with the surfaces of flat parts in the process of controlling their position have been determined. The results of studies of the characteristics of the surfaces of flat parts of shoes, the roughness of which is the main factor affecting the control process, are described. The directions of further research of the control process are determined.

Key words: air jets, surface roughness, nozzles, pressure, force.

УДК 539.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-08

Криницький О.С., Біліщук В.Б., Середюк О.Є.

Івано-Франківський національний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ

В роботі представлено огляд методів отримання та синтезу термоелектричних матеріалів. Розглянуто як існуючі протягом тривалого часу (так звані, історичні методи), так і доволі сучасні методи, а також їхній вплив на підвищення термоелектричної ефективності напівпровідникових матеріалів, які в подальшому можна використати для виробництва термоелектричних генераторів та охолоджувачів. Розглянуті методи синтезу термоелектричних матеріалів потребують затрати значної кількості часу на отримання та синтез нових матеріалів, так як вони мають значну кількість технологічних процесів з попередньої підготовки матеріалів, їхньої очистки та формування. Тому було розроблено і запропоновано удосконалений метод отримання напівпровідникових термоелектричних матеріалів який дозволяє з меншими енергозатратами ефективно керувати термоелектричними параметрами такими як: коефіцієнт Зебека, електропровідність, теплопровідність. Було проведено дослідження впливу синтезованих напівпровідникових матеріалів розробленим методом на термоелектричні параметри технологічного процесу, а саме фракції подрібнення синтезованого термоелектричного матеріалу на зміну величини коефіцієнт Зебека від температури. Також було проведено дослідження впливу сили тиску під час холодного пресування на коефіцієнт Зебека від температури, що дозволило обрати ефективні технологічні параметри подрібнення і пресування для отримання термоелектричних матеріалів з найкращою ефективністю.

Ключові слова: термоелектричні матеріали, електропровідність, коефіцієнт Зебека, термоелектрична потужність, синтез.

Постановка проблеми. Термоелектричні пристрої забезпечують перетворення тепла в електричну енергію, що вважається однією з екологічно чистих технологій перетворення енергії для заміни викопного палива. Термоелектричні пристрої успішно застосовуються у сферах переробки відпрацьованого тепла для виробництва електроенергії та охолодження. Для більш широкого застосування термоелектричних пристроїв є вимога підвищення ефективності перетворення ними енергії, що можна зробити за рахунок збільшення безрозмірної термоелектричної добротності (ZT). Вона розраховується наступним чином: $ZT = S^2\sigma T/\chi$, де S – коефіцієнт Зебека, σ – електропровідність, T – температура, χ – теплопровідність [1]. З виразу видно що збільшення ZT , як правило, досягається шляхом підвищення $S^2\sigma$ або зменшення χ .

Одним із можливих шляхів підвищення термоелектричних характеристик матеріалів є розроблення нових методів їх отримання. Крім того, розвиток методів отримання нових термоелектричних матеріалів може покращити механічні властивості пристроїв, виготовлених з них, що допоможе підвищити їх надійність [2, 3].

Метою даної роботи є провести аналіз різних методів отримання термоелектричних напівпровідникових матеріалів і їхнього впливу на зміну термоелектричної добротності ($S^2\sigma$) де одним із ключових параметрів є коефіцієнт Зебека. Ще одним методом впливу на зміну термоелектричної добротності є вибір технологічних параметрів під час пресування синтезованих термоелектричних матеріалів тому важливим завданням є дослідити даний вплив.

Аналіз існуючих методів отримання напівпровідникових матеріалів

1. Методи плавлення. Методи витягування кристалів. Типовим представником і широко відомим є метод Чохральського для виробництва об'ємних монокристалів напівпровідникових матеріалів (рис. 1). Згідно з цим методом матеріал розплавляється в тиглі циліндричної форми, нагрівання розплаву здійснюється резистивними або радіочастотними нагрівачами. Важливо ретельно регулювати потужність нагрівача(ів), щоб певна частина зануреного зародкового кристалу (затравки) переплавилася та утворився меніск розплаву. Потім затравка повільно піднімається (часто при обертанні), і розплав кристалізується на межі затравки, утворюючи нову кристалічну частину. Форма цього кристалу, особливо діаметр,

контролюється шляхом регулювання потужності нагріву, швидкості витягування та швидкості обертання витягуючого стрижня. Під час вирощування є необхідність в контролі атмосфери, в якій проводиться процедура витягування кристалу, тому вся установка знаходиться у герметичній ємності, яка заповнена газом (інертний газ для напівпровідників, кисень або повітря для оксидів) [4].

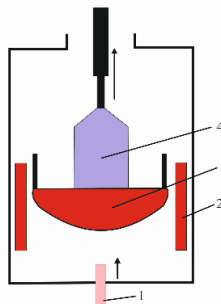


Рисунок 1 – Схематичне зображення реалізації методу Чохральського.

1 – подача інертного газу, 2 – нагрівач, 3 – розплав, 4 – зародковий кристал (затравка)

Метод твердотільних реакцій. У даному методі кварцова трубка відіграє роль ампули для розміщення реагуючих компонент. Кварцові трубки попередньо обробляються шляхом нагріву для видалення органічних залишків. Потім реагуючі компоненти запаюють у трубку шляхом плавлення кварцу, коли з неї видалено повітря, і нагрівають до заданої температури плавлення компонент в муфельній печі. На якість і термоелектричну добротність отриманого матеріалу впливатимуть такі фактори як температура нагріву, швидкість підвищення температури, час витримки за даної температури, швидкість охолодження до кімнатної температури.

Даним методом були успішно синтезовані леговані лужними металами термоелектричні матеріали, такі як $PbTe$ і $PbSe$ [5], введення даних домішок в різних концентраціях дозволило змінювати концентрацію носіїв заряду, щоб підвищити транспортні властивості електронів, що, в свою чергу, сприяє підвищенню термоелектричної добротності. Незважаючи на переваги твердотільних реакцій, вони мають ряд недоліків, зокрема при високій температурі, понад $1200^{\circ}C$, кварцові трубки схильні до тріщин через зниження міцності а отже, є важко підтримувати високий вакуум, що не дає можливість розплавити реагенти з дуже високими температурами плавлення. Крім того, не можна використовувати для синтезу матеріали з високоактивними металами (такими як Mg), які реагують з кварцом при високій температурі.

Дугове плавлення. У ситуаціях, коли неможливо застосувати твердотільні реакції, як альтернативу, застосовують метод дугового плавлення. Часто даний метод використовують для синтезу матеріалів з дуже високими температурами плавлення. Перед процесом дугового плавлення порошки реагуючих речовин змішують і у холодному вигляді пресують у гранули. Потім завантажують в дуговий плавильний апарат, в якому реакція проводиться під вакуумом або в атмосфері інертних газів. Постійний струм створює електричну дугу між гранулою та електродом (рис. 2). В результаті гранула розплавляється [6]. Температура дуги може досягати $3000^{\circ}C$, що дозволяє синтезувати клатрати, сплави $Si_{1-x}Ge_x$ [7].

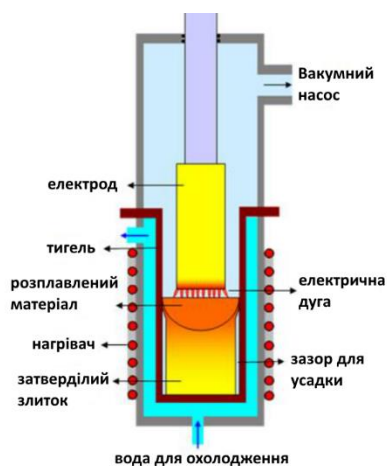


Рисунок 2 – Схематичне зображення процесу дугового плавлення

Індукційне плавлення. Індукційна плавка ґрунтується на електромагнітній індукції. Високочастотний струм, який створює швидкозмінне магнітне поле, призводить до виникнення вихорового струму в матеріалі. Як наслідок, матеріал нагрівається джоулевим нагріванням [8].

Левітаційне плавлення. У методі левітаційного плавлення (рис. 3) використовується високочастотна піч і магнітне поле, яке створюється за допомогою додаткової котушки, а тепло виділяється самим матеріалом таким самим чином, як і при індукційній плавці [9]. Основною перевагою процесу левітаційної плавки є електромагнітне перемішування матеріалу, котрий плавиться, і відсутність контакту матеріалу із тиглем під час нагріву. Коли високочастотний змінний струм подається в мідну котушку, вихоровий струм виникатиме в матеріалі для плавки, а також у мідному тиглі. Кожного моменту часу всі індукційні струми мають однаковий напрямок (за або проти годинникової стрілки), але вони протилежні на зовнішній стороні зразка для плавлення та на внутрішній стороні мідного тигля, що створює силу відштовхування між зразком і мідним тиглем і зразок матеріалу втримується у повітрі. Сила відштовхування разом із силою тяжіння зразка відіграють важливу роль у перемішуванні під час плавлення, що сприятливо впливає на чистоту та однорідність зливка.

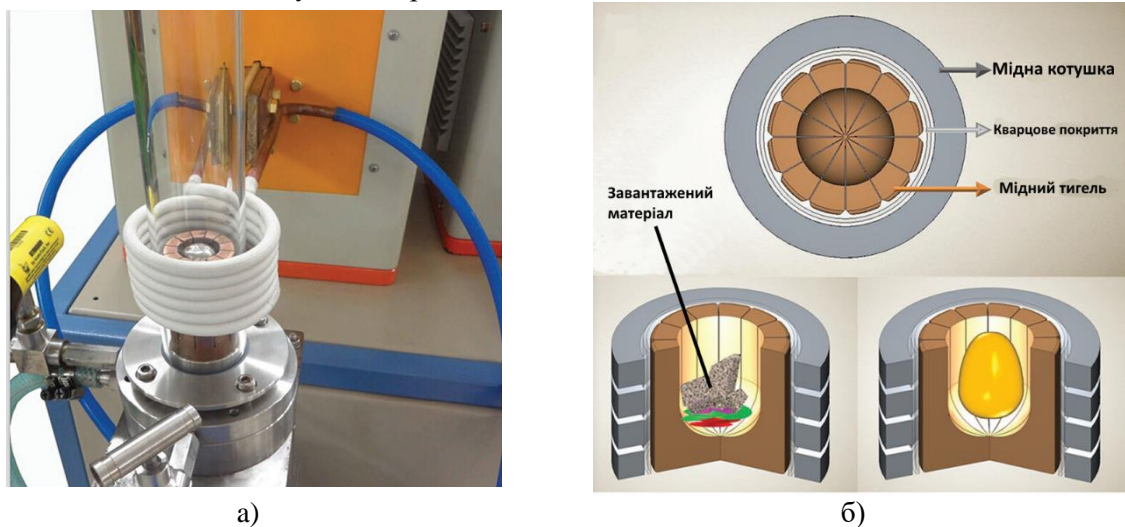


Рисунок 3 – а) фотографія левітаційної плавильної системи;
б) схематичний малюнок процесу левітаційного плавлення з показаними матеріалами

Саморозповсюджуваний високотемпературний синтез. У даному виді синтезу подрібнені речовини змішують і холодно пресують у циліндри. Синтез проводиться у вакуумі або атмосфері інертного газу і ініціюється точковим нагріванням невеликої частини (звичай, верхньої) циліндричного зразка, а теплова хвиля, яка виникає від горіння, спричиненого екзотермічними реакціями, проходить через матеріал, що залишився (рис. 4). У цьому процесі хімічна реакція локалізується в зоні горіння, яка самовільно поширюється по матеріалу. Завдяки часовій ефективності, точному контролю складу та мінімізації енергії цей метод широко використовується для синтезу термоелектричних матеріалів Cu_2Se , $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$, SnTe , Mg_2Si [10].

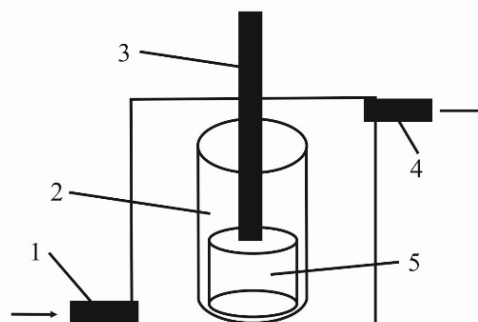


Рисунок 4 – Схематичне зображення саморозповсюджаного високотемпературного синтезу: 1 – подача інертного газу, 2 – графітовий тигель, 3 – графітовий електрод, 4 – вихід інертного газу, 5 – зразок матеріалу

Синтез із розплаву, що обертається. У даному методі тонкий потік розплавленого сплаву напівпровідникових матеріалів впорскується на обертове колесо, яке внутрішньо охолоджується (рис. 5а) [11]. Тепло з розплаву швидко передається колесу, що викликає швидке затвердіння рідини та неперервне утворення тонких пластинок або стрічок (рис. 5б). Швидкість охолодження може досягати від 10^4 до 10^7 К·хв⁻¹, що призводить до подрібнення зерен і наноструктур у матеріалах. Налаштування швидкості обертання колеса та тиску викиду розплаву може ефективно регулювати нано/мікроструктури готових матеріалів. Даний метод використовувався для виготовлення широкого діапазону термоелектричних матеріалів. Цікаві мікро/наноструктури часто зустрічаються в цих матеріалах, що призводять до значного підвищення термоелектричних характеристик.

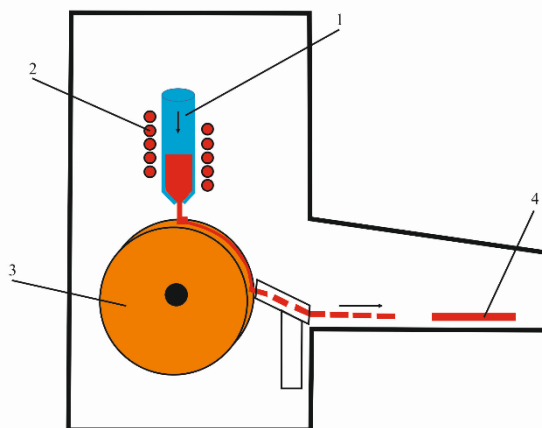


Рисунок 5 – Схематичне зображення системи синтезу з розплаву, котрий обертається:
1 – подача матеріалу, 2 – нагрівач, 3 – мідне коліщатко яке обертається,
4 – пластинки розплаву

2. Методи подрібнення матеріалів. Кульове подрібнення. Кульове подрібнення включає в себе механічне легування та механічне подрібнення. За допомогою механічного легування можна синтезувати матеріали з порошків [12]. Механічним подрібненням можна ефективно отримувати дрібні порошки зі зливок. Відрізняючись високою економічною ефективністю, кульовий млин широко використовується для виготовлення термоелектричних матеріалів. Крім того, його використання призвело до покращення термоелектричних характеристик у матеріалах зі сплавів Mg, половинні сполуки Гейслера [13] та SiGe.

Механічне легування. Дана техніка сухого оброблення порошку, при якій порошки, змішані з кульками, герметизують у контейнері у захисній атмосфері для мінімізації окислення. Під час подрібнення енергія зіткнення між кульками ефективно передається порошкам, що призводить до їх подрібнення. Факторами, що впливають на характеристики термоелектричних матеріалів, є інтенсивність кульового помелу, швидкість помелу, тривалість і співвідношення дисперсії порошків і куль. Регулювання цих параметрів дозволяє виготовляти високоякісні матеріали.

Механічне подрібнення. Використання кульового помелу для подрібнення злитків дозволяє значно зменшити розмір зерна та ввести в матрицю нанокристали. При цьому розміри зерен зменшені до нанорозміру, а вони мають високу кристалічну якість із чистими межами зерен. Завдяки отриманим нанорозмірним зернам і вбудованим наноточкам розсіювання фононів було значно покращено, що призвело до значно нижчого χ у зразку, обробленому кульовим млином, порівняно з аналогом зливка. У результаті було досягнуто ZT 1,5 при $\sim 110^\circ\text{C}$, що вище, ніж у зливка [14].

Синтез із розчинів. Метод синтезу із розчинів широко використовувався для отримання термоелектричних матеріалів через перевагу застосування низької температури синтезу і малого розміру отримуваних частинок. Найбільш широко використовувані методи: синтез під атмосферним тиском, сольвотермічний синтез і сольвотермічний метод із застосуванням мікрохвильового випромінювання [15].

Синтез із розчину під атмосферним тиском. Даний вид синтезу був розроблений для створення надтонких збагачених Te нанодротів Bi_2Te_3 , гетероструктури нанодротів $\text{PbTe-Ag}_2\text{Te}$

та ультратонких нанодротів PbTe [16]. Завдяки нанорозмірній величині розміру зерна та ефекту фільтрації електронів, термоелектричні характеристики були покращені в отриманих наноструктурованих термоелектричних матеріалах.

Сольвотермічний синтез. У даному методі синтезу реагенти із стехіометричним складом кінцевого продукту змішуються в органічному розчиннику. Після повного перемішування суміш поміщають у герметичний автоклав, який нагрівають при температурі від 100°C до 250°C протягом певного періоду часу. Після охолодження до кімнатної температури продукти промивають, центрифугують і сушать. Особливістю цього методу є те, що можна контролювати морфологію та розмір продуктів. Під високим тиском і високою температурою можна виготовляти кристалічні добре наноструктуровані термоелектричні матеріали. З використанням етиленгліколю, як розчинника, та полівінілпіролідону, як поверхнево-активної речовини, синтезовано наноструктури Bi_2Te_3 -Te [17].

Сольвотермічний синтез із застосуванням мікрохвиль. Традиційний сольвотермічний метод займає багато часу. Щоб скоротити утворення нового матеріалу, даному методу необхідно лише кілька хвилин, завдяки локалізованому механізму нагріву за допомогою мікрохвильового опромінення. Мікрохвильовий сольвотермічний метод був успішно використаний для синтезу термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 , SnSe і SnTe [18].

Синтез відшаруванням шаруватих термоелектричних матеріалів. Шаруваті кристали – це ті, які утворюють міцні хімічні зв'язки в площині, але мають слабкий зв'язок поза площиною. Це дозволяє відшарувати їх на так звані нанопластили. Таке відшарування призводить до створення матеріалів з надзвичайною великою площею кристалічної поверхні.

Рідке відшарування використовувалося для виготовлення термоелектричних матеріалів, що складаються з атомарно тонких нанопластин. Завдяки малим розмірам зерен було значно збільшене розсіювання фононів. Тому відповідний показник теплопровідності χ для матеріалів, отриманих таким чином, значно нижчий, ніж у матеріалів, отриманих із злиwkів Bi_2Se_3 . Максимальне значення ZT для зразків, отриманих з наноліstів Bi_2Se_3 , становило до 0,36, що набагато вище, ніж у злитків.

У представленому короткому огляді було проведено ознайомлення з типовими методами синтезу термоелектричних матеріалів було описано різні типи методів плавлення для синтезу об'ємних термоелектричних матеріалів, які є класичними методами для синтезу високоефективних термоелектричних матеріалів шляхом їхнього легування. Потім було розглянуте кулькове подрібнення так як воно широко використовується для виготовлення термоелектричних матеріалів. Крім того, отримані дрібно зернисті структури зазвичай призводять до низької теплопровідності, що забезпечує високу якість кінцевих продуктів. Після цього було представлено механізм методів синтезу з розчину. Оскільки дані методи можуть добре контролювати морфологію та розмір отриманих нанопорошків, вони широко використовуються для виготовлення високоефективних наноструктурованих термоелектричних матеріалів.

Однак використання даних методів синтезу зазвичай включають тривалі в часі та/або складні процедури самого синтезу і подальшого відпалу, отриманих матеріалів для нормалізації термоелектричних характеристик, що вимагає значних енергетичних затрат. Ще більшою проблемою для деяких методів отримання це виготовлення зразків великого розміру з однорідними властивостями по всій довжині, що може створювати проблеми при потребі промислового виготовлення даних матеріалів. Щоб вирішити ці проблеми авторами було розроблено новий удосконалений метод отримання напівпровідникових матеріалів. Який дозволяє отримати напівпровідникові матеріали за короткі терміни і з меншими енергозатратами та дозволяє контролювати їх однорідність.

Викладення основного матеріалу. Нами було розроблено метод який належить до методу твердотільних реакцій у методику синтезу було добавлено примусове перемішуванням синтезованих компонентів у ампулі, що дозволить отримувати на виході злиток з більш однорідними параметрами. Синтез проводиться у вакуумованих кварцових ампулах до тиску 10^{-4} Па, які розміщували у електропечі. Для синтезу використано попередньо очищені від забруднень речовини з високим вмістом основних компонентів. Вакуумовані ампули поміщали у резистивні електропечі, електроживлення яких здійснювали з використанням високоточних регуляторів температури. На краях кварцової ампули розміщували термопари типу «хромель-алюмель» для контролю температури. Значення температури для синтезу визначалися із діаграм стану синтезованих сполук.

Методика синтезу наступна: на початковому етапі встановлювалась температура до 800 К, для переходу в рідку фазу всіх завантажених речовин у ампулі, після встановлення температури проводилася витримка впродовж 3 год. для дифузії речовин. Другим етапом був нагрів до температури 1240 К, яка необхідна для формування хімічних зв'язків, і витримка при даній температурі яка тривала 2 год. Під час даного етапу здійснювали примусове коливання печі приблизно 2-3 коливання на 30 хвилин. Після витримки починався третій етап – охолодження, який здійснювали за допомогою терморегулятора із заданою швидкістю 15 К/год до температури (600-700) К, а потім – із швидкістю до 20 К/год. Отримані злитки подрібнювали за допомогою кулькового млина та пресували за допомогою холодного пресування під тиском (0,5-1) ГПа, використовуючи прес-форми. Отримані циліндричної форми зразки з ($d = (5-8)$ мм, $h = (5-10)$ мм) досліджували на величину отримуваної термо-ЕРС.

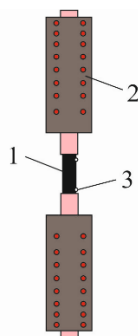


Рисунок 6 – Схема реалізації вимірювання термо-ЕРС: 1 – зразок, 2 – нагрівач, 3 – термопара

Для вимірювання величини термо-ЕРС було розроблено пристрій спеціальної конструкції (рис. 6), який складається з двох нагрівачів циліндричної форми, між якими розміщувався зразок, для вимірювання температури використовувалися термопари типу «хромель-алюмель», для контролю і стабілізації використовувалися терморегулятори. Після встановлення стабільної різниці температур і витримки впродовж 15 хв. виконувалося вимірювання значення термо-ЕРС.

Для вибору оптимальної фракції подрібнення отриманих напівпровідникових матеріалів було проведено дослідження зміни величини термо-ЕРС від фракції напівпровідникового матеріалу та сили тиску, при якій отримували зразок. Для отримання різного набору фракцій напівпровідникові матеріали пропускалися через набір сит із різними розмірами сіточки.

Після аналізу отриманих експериментальних даних можна зробити наступні висновки, що найбільше значення термо-ЕРС мають зразки, отримані із фракцій порошку розміром (0,8-1,0) мм (рис. 7 – крива 2) при тисках (0,75-1,0) ГПа (рис. 8 – криві 2, 3). Малим фракціям (0,0-0,6) мм (рис. 7 – крива 4) і незначним тискам (0,5 ГПа) (рис. 8 – крива 1) відповідають найменші значення величини термо-ЕРС. Це пов'язано із механічним станом матеріалу і, зокрема, його пористістю.

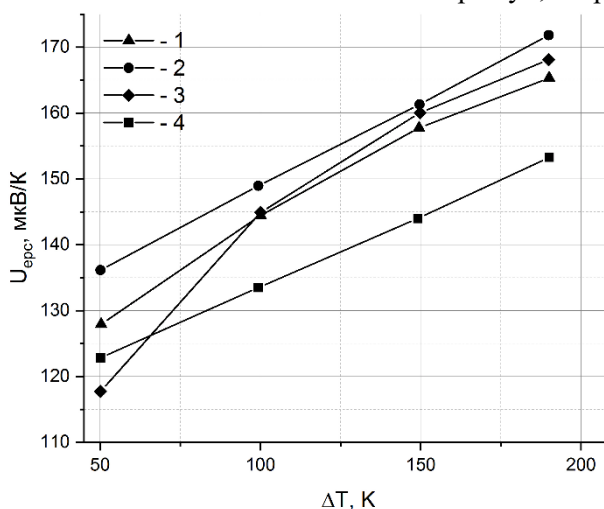


Рисунок 7 – Залежність термо-ЕРС $U_{ерс}$ від різниці температур ΔT між гарячим і холодним кінцем зразків n-PbTe, пресованих з фракцій різного розміру d , мм: 1 – 0-1,0 мм, 2 – 0,8-1,0 мм, 3 – 0,6-0,8 мм, 4 – 0,0-0,6 мм

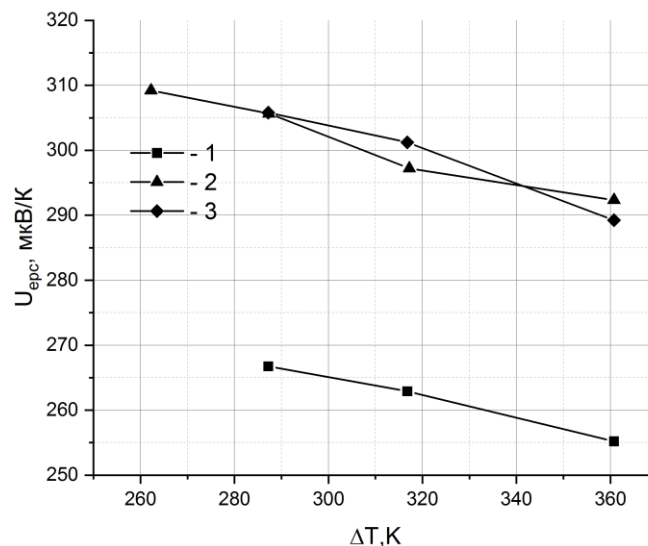


Рисунок 8 – Залежність термо-ЕРС $U_{ерс}$ від різниці температур ΔT між гарячим і холодним кінцем зразків р-PbTe:Te, отриманих при різному тиску пресування P, ГПа: 1 – 0,5 ГПа, 2 – 0,75 ГПа, 3 – 1,0 ГПа.

Висновки. У статті проведено огляд методів отримання напівпровідникових термоелектричних матеріалів. Розглянуто як існуючі, історичні методи, так і доволі сучасні, дані методи мають кілька істотних недоліків, зокрема, таких як енергоощадність оскільки синтез може тривати по кілька діб, і неможливість забезпечити великого об'єму синтезованого матеріалу для отримання у промислових масштабах.

Проведено аналіз методів подрібнення термоелектричних матеріалів, які є досить важливі, оскільки отриманий дрібно зернистий порошок, як правило, призводить до зниження теплопровідності, що забезпечує збільшення термоелектричної добротності отриманих напівпровідникових матеріалів.

Представлено методи синтезу із розчину. Оскільки вони дозволяють добре контролювати розміри отриманих матеріалів, а отже, створювати високоефективні наноструктуровані термоелектричні матеріалів, але вони вимагають контролю тиску при якому відбувається синтез, що деколи є ускладненим заданням.

Розроблено нову методику отримання напівпровідникових матеріалів, яка дозволяє значно скоротити використання часу отримання напівпровідникових матеріалів, додавання спеціального оберտального механізму для ампул із синтезованим матеріалом дозволяє отримати більш однорідний напівпровідниковий матеріал,

Після отримання напівпровідникового матеріалу проведено дослідження зміни величини термо-ЕРС від величини фракцій отриманого напівпровідникового матеріалу, а також тиску, при якому їх пресують, і встановлено, що найбільше значення можна отримати із фракцій порошку розміром (0,8-1,0) мм і при тисках (0,75-1,0) ГПа.

Інформаційні джерела

1. G.J. Snyder, E.S. Toberer, Complex thermoelectric materials. *Nat. Mater.* 2008. Vol. 7. P.105–114.
2. T. Zhu, Y. Liu, C. Fu, J.P. Heremans, J.G. Snyder, X. Zhao, Compromise and synergy in high-efficiency thermoelectric materials. *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29 P.1605884.
3. J. Li, Y. Pan, C. Wu, F. Sun, T. Wei, Processing of advanced thermoelectric materials, *Sci. China Technol. Sci.* 2017. Vol. 60. P.1347–1364.
4. G. Muller, P. Rudolph, Crystal growth from the melt, in: K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan, P. Veysse`re (Eds.). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology.* Elsevier, Oxford, 2001, P.1866–1872.
5. Y. Pei, A.D. LaLonde, N.A. Heinz, G.J. Snyder, High thermoelectric figure of merit in PbTe alloys demonstrated in PbTe-CdTe, *Adv. Energy Mater.* 2012. Vol. 2. P.670–675.
6. A.R. Moss, Arc-melting processes for the refractory metals, *J. Less Common Met.* 1959. Vol.1. P.60–72.

7. O. Yamashita, N. Sadatomi, Thermoelectric properties of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x < 0.10$) with alloy and dopant segregations, *J. Appl. Phys.* 2000. Vol.88 P.245–251.
8. R. Valery, L. Don, L.C. Raymond, Theoretical background, in: Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2017.
9. A.J. Mestel, Magnetic levitation of liquid metals, *J. Fluid Mech.* 2006. Vol.117. P.27–43.
10. Q. Zhang, X. Su, Y. Yan, H. Xie, T. Liang, Y. You, X. Tang, C. Uher, Phase segregation and superior thermoelectric properties of $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x}\text{Sbx}$ ($0 < x < 0.025$) prepared by ultrafast self-propagating high-temperature synthesis, *Appl. Mater. Interfaces.* 2016. Vol.8. P.3268–3276.
11. W. Xie, S. Wang, S. Zhu, J. He, X. Tang, Q. Zhang, T.M. Tritt, High performance Bi_2Te_3 nanocomposites prepared by single-element-melt-spinning spark plasma sintering, *J. Mater. Sci.* 2013. Vol.48. P.2745–2760.
12. W.-D. Liu, Z.-G. Chen, J. Zou, Eco-friendly higher manganese silicide thermoelectric materials: progress and future challenges, *Adv. Energy Mater.* 2018. Vol.8. P.1800056.
13. L. Yang, Z.-G. Chen, M.S. Dargusch, J. Zou, High performance thermoelectric materials: progress and their applications, *Adv. Energy Mater.* 2018. Vol.8. P.1701797.
14. B. Poudel, Q. Hao, Y. Ma, Y. Lan, A. Minnich, B. Yu, X. Yan, D. Wang, A. Muto, D. Vashaee, X. Chen, J. Liu, M.S. Dresselhaus, G. Chen, Z. Ren, High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys, *Science.* 2008. Vol.320. P.634–638.
15. M. Hong, Z.-G. Chen, Y. Pei, L. Yang, J. Zou, Limit of zT enhancement in rocksalt structured chalcogenides by band convergence, *Phys. Rev. B.* 2016. Vol.94. P.161201.
16. S.W. Finefrock, G. Zhang, J.-H. Bahk, H. Fang, H. Yang, A. Shakouri, Y. Wu, Structure and thermoelectric properties of spark plasma sintered ultrathin PbTe nanowires, *Nano Lett.* 2014. Vol.14 P.3466–3473.
17. L. Cheng, Z.-G. Chen, L. Yang, G. Han, H.-Y. Xu, G.J. Snyder, G.-Q. Lu, J. Zou, T-shaped Bi_2Te_3 -Te heteronanojunctions: epitaxial growth, structural modeling, and thermoelectric properties, *J. Phys. Chem. C* Vol.117 2013. P.12458–12464.
18. L. Wang, X. Tan, G. Liu, J. Xu, H. Shao, B. Yu, H. Jiang, S. Yue, J. Jiang, Manipulating band convergence and resonant state in thermoelectric material SnTe by Mn–In codoping, *ACS Energy Lett.* 2017. Vol.2 P.1203–1207.

O.S. Krynytsky, V.B. Bilishchuk, O.Ye Serediuk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY OF RECEIVING THERMOELECTRIC MATERIALS ON THEIR EFFICIENCY

The paper presents an overview of the methods of obtaining and synthesizing thermoelectric materials. Both existing for a long time (so-called historical methods) and quite modern methods are considered, as well as their influence on increasing the thermoelectric efficiency of semiconductor materials, which can be used in the future for the production of thermoelectric generators and coolers. The considered methods of synthesis of thermoelectric materials require spending a significant amount of time on obtaining and synthesizing new materials, as they have a significant number of technological processes for the preliminary preparation of materials, their purification and formation. Therefore, an improved method of obtaining semiconductor thermoelectric materials was developed and proposed, which allows with lower energy consumption to effectively control thermoelectric parameters such as: Seebeck coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity. A study of the influence of synthesized semiconductor materials using the developed method on the thermoelectric parameters of the technological process, namely the grinding fraction of the synthesized thermoelectric material on the change in the value of the Seebeck coefficient as a function of temperature, was conducted. A study of the effect of pressure force during cold pressing on the Seebeck coefficient as a function of temperature was also carried out, which made it possible to choose effective technological parameters of grinding and pressing to obtain thermoelectric materials with the best efficiency.

Key words: thermoelectric materials, electrical conductivity, Seebeck coefficient, thermoelectric power, synthesis.

УДК 621.74.01

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-09

Мазур І.А.¹, Волох В.І.¹, Морозов І.В.²¹Український державний університет науки та технологій м. Дніпро²Приватне акціонерне товариство «Камет-Сталь» м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШЛАКОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЗАГОТОВКАХ ПРИ МАШИННО- БЕЗПЕРЕРВНІЙ РОЗЛИВЦІ СТАЛІ

На підприємствах при машинно-безперервній розливці сталі (МБЛЗ) з різних марок сталі виготовляють заготовки з дефектом, попередньо класифікованим як захоплення шлаку. Внаслідок цього було проведено дослідження для визначення основних причин.

Представлені металографічні дослідження дефектів заготовки, які показують, що причиною дефекту є не лише захоплення шлаку, але також холодні краплі та пористість. Для проведення металографічних досліджень застосовувалася різна ступінь травлення, також було виконано аналіз растровим електронним мікроскопом. Виходячи з наявної в літературі інформації та на підставі термодинамічної моделі системи Fe-Si-Mn-O проведено механізм та схему піноутворення та захоплення шлакових включень у кристалізаторі. За результатами металографічного дослідження запропоновано механізм утворення та захоплення холодних крапель та запропоновані рекомендації, щодо зменшення шлакових включень у заготовках.

Ключові слова: розливка сталі, пористість, шлакові включення, заготовка, безперервне лиття.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. До числа основних завдань сучасної металургії відноситься розробка і впровадження нових технологій, спрямованих на досягнення високої чистоти заготовки від неметалевих включень у прокаті, що отримується з безперервнолитих слябів при мінімальних енерго- і ресурсо витратах (рис.1).

Ключовим агрегатом машин безперервного розливання заготовок (МБЛЗ), в якому ще можливе проведення операцій по зниженню забрудненості металу неметалічними включеннями, служить проміжний ківш [1]. Одним із відомих способів рафінування сталі від неметалевих включень є використання секціонованих проміжних ковшів з каналами в розділових перегородках, які також інколи використовуються в поєднанні з продувкою металу інертним газом через каналні фурми [2]. Незважаючи на численні дослідження, присвячені аналізу процесів видалення неметалевих включень, до теперішнього часу остаточно не існує однозначно встановлених оптимальних умов рафінування сталі від неметалевих включень в проміжному ковші МБЛЗ. Внаслідок цього вибір конструктивних параметрів проміжних ковшів і умов продувки інертним газом носить переважно емпіричний характер. Кількісні оцінки зміни розподілу неметалевих включень в ході рафінування сталі вельми нечисленні [3].

У зв'язку з цим дослідження гідродинаміки течій розплаву в ванні проміжного ковша, вибір раціональних конструктивних параметрів перегородок та їх наявність, конструктивних параметрів каналних протяжних фурм, відпрацювання режимів продувки аргонном і кількісна оцінка впливу зазначених процесів на результати рафінування сталі від неметалевих включень має важливе значення.

Постановка проблеми. Протягом тривалого часу на підприємстві виготовляють заготовки перетином 130×130 мм, 150×150 мм., та 160×160 мм. На підприємстві у різних виробничих умовах та на різних марках сталі були розлиті заготовки з дефектом, попередньо класифіковані як шлакові включення (рис.2 та рис.3). Це свідчить, що данні дефекти мають системний характер виникнення.

При безперервній розливці сталі відбуваються періодичне попадання шлакових включень які кристалізуються у металі у різних місцях зливка, але найчастіше біля кутів заготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, де розв'язувались завдання цієї проблеми, виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена стаття.

Одним з характерних дефектів у безперервної литої заготовки є центральна пористість яка проявляється у вигляді усадкових порожнин які зливаються у суцільну пору. Утворюються переривчасті продовгуваті порожнини [1-2]. Розвитку усадкових порожнин сприяють наступні

фактори: швидкість розливки, інтенсивність охолодження, температура металу, підвищений рівень коливань та інші фактори. Але в [1-2] не описується виникнення неметалевих включень у кутах заготовки.

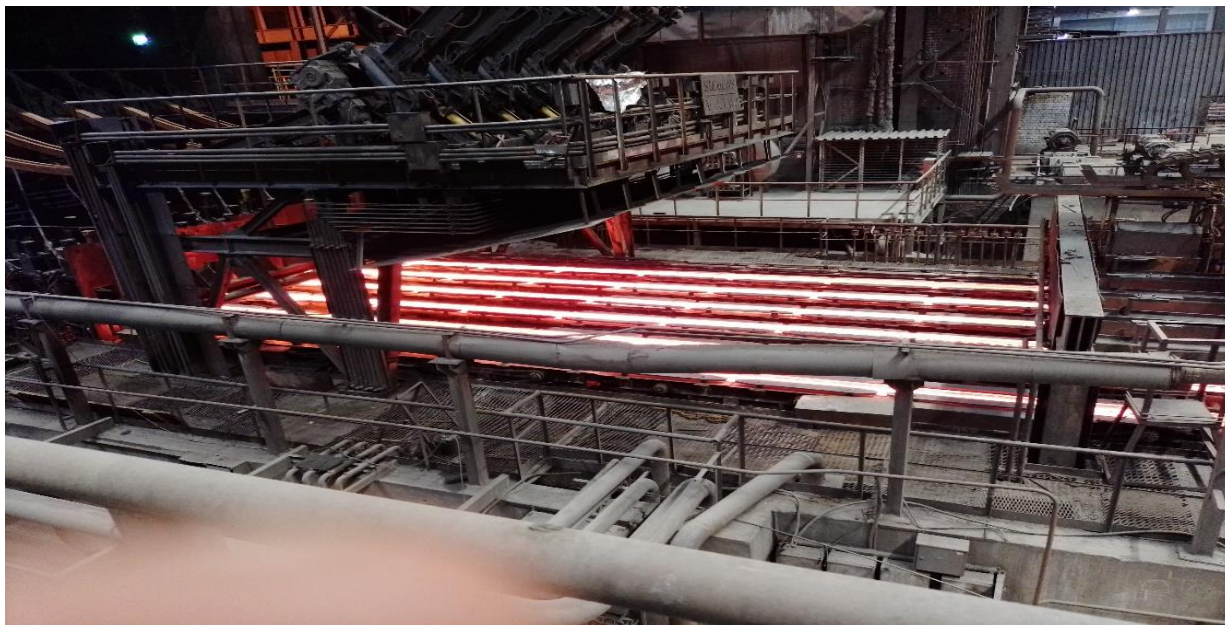


Рисунок 1 – Загальний вид розливки сталеві заготовки на МБЛЗ



Рисунок 2 – Макроструктура заготовки 130x130 мм з дефектом, сталь СтЗсп

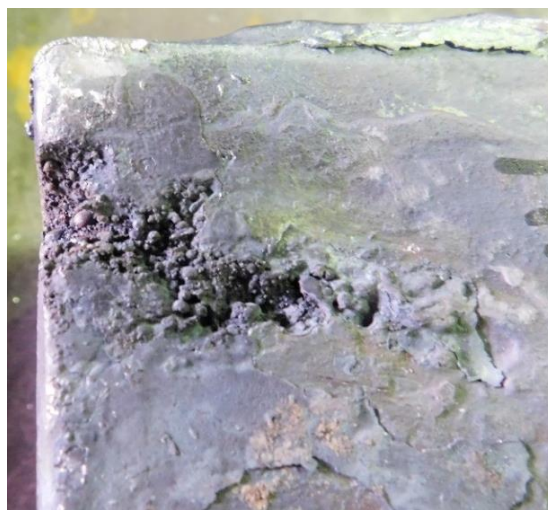


Рисунок 3 – Поверхня заготовки з дефектом сталь СтЗсп

Авторами роботи [3] показано, що описується система підтримки системи вибору режиму вторинного охолодження заготовки та температурно-швидкісного режиму розливки та як формується рідка лунка металу, але в цій роботі не роз'яснено як формуються шлакові включення. У роботі [4] також не сформульовані основи зародження газових пухирців та відсутні металографічні дослідження формування шлакових крапель.

Мета роботи. Метою роботи є визначення характеру та причин виникнення дефекту, основної причини його формування та надання рекомендацій щодо їх мінімізації у заготовці.

Постановка завдання. Оскільки відлита товарна заготовка МБЛЗ має дефекти в вигляді пор, усадкових продовгуватих порожнин, шлакових включень, то ця заготовка відноситься вже як не товарна та їде на переробку створюючи при цьому економічні збитки. Особливо слід зосередити увагу на формуванні процесу шлакових включень при різних режимах розливки та вторинного охолодження й механічного процесу відбору шлаку з кристалізатору, формуванні крапель при дозованій подачі ріпакового мастила у кристалізатор для зменшення та запобігання виникнення шлакових включень.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

Проведений аналіз по кількості відбракованих заготовок по шлаковим включенням за 2023р (рис. 4). показав, що при розливанні товарної заготовки шлакові включення є постійно присутні та їх кількість зменшується.

Відсортування з шлаковими включеннями свідчать про стабільну присутність шлаку у заготовках, яка складає у межах до 150 тон за місяць.

Це призводить до додаткових витрат, пов'язаних з переробкою на прокатному стані та з можливим отриманням браку прокатної продукції у вигляді розшарування катанки, вкраплення включень на бокових поверхнях швелеру або кутка та інших видів дефектів.

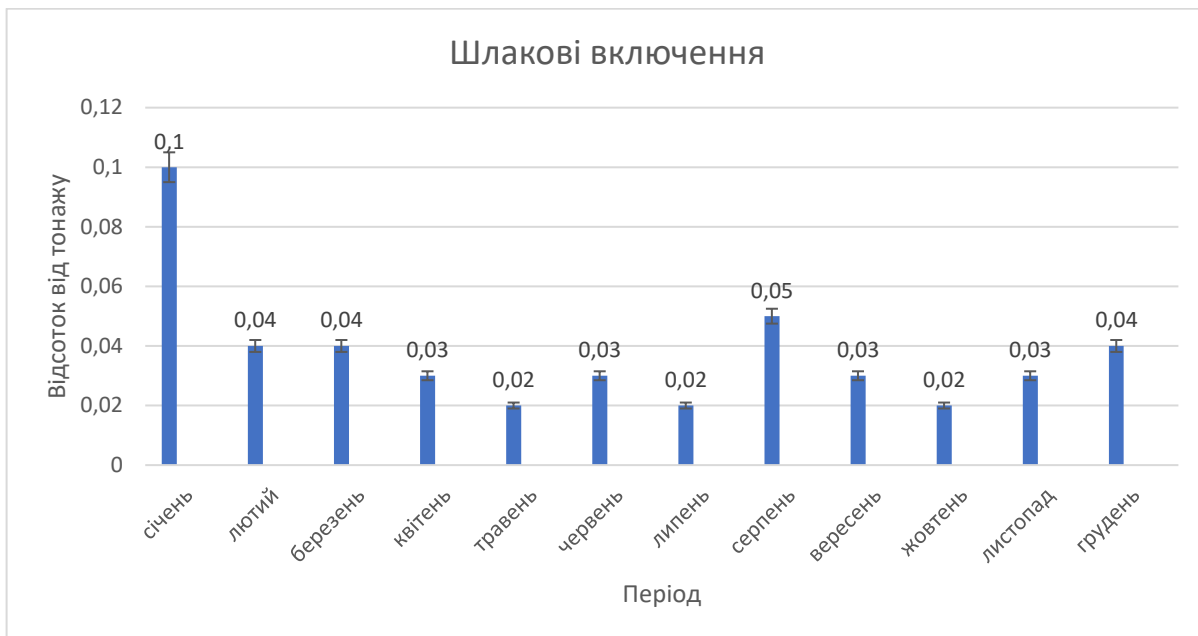


Рисунок 4 – Гістограма шлакових включень у відсотках від кількості тон розливої заготовки в 2023 р.

Аналіз виникнення шлакових включень за 3 роки свідчить, що присутність заготовок з шлаком постійна, незважаючи на те, що їх кількість зменшується (рис. 5). Необхідно налагоджувати пробіли у технологічному процесі та шукати вузькі місця при розливанні сталі.

Присутність шлакових включень у товарній заготовці підвищує рівень вибраковки, що знижує ціноутворення заготовки та комерційну привабливість заготовки.



Рисунок 5 – Гістограма шлакових включень у відсотках від кількості тон розливої заготовки протягом з 2020 р. по 2023 р.

Розташування шлакових включень заздалегідь відбувається у кутах безперервнолітої заготовки (БЛЗ) (рис.6). У цій статті представлені металографічні дослідження даних дефектів, розглядаються механізми утворення та захоплення шлаку, а також присутність крапель мастила, яке подається на кристалізатор, та пов'язаної з ними пористості [5].

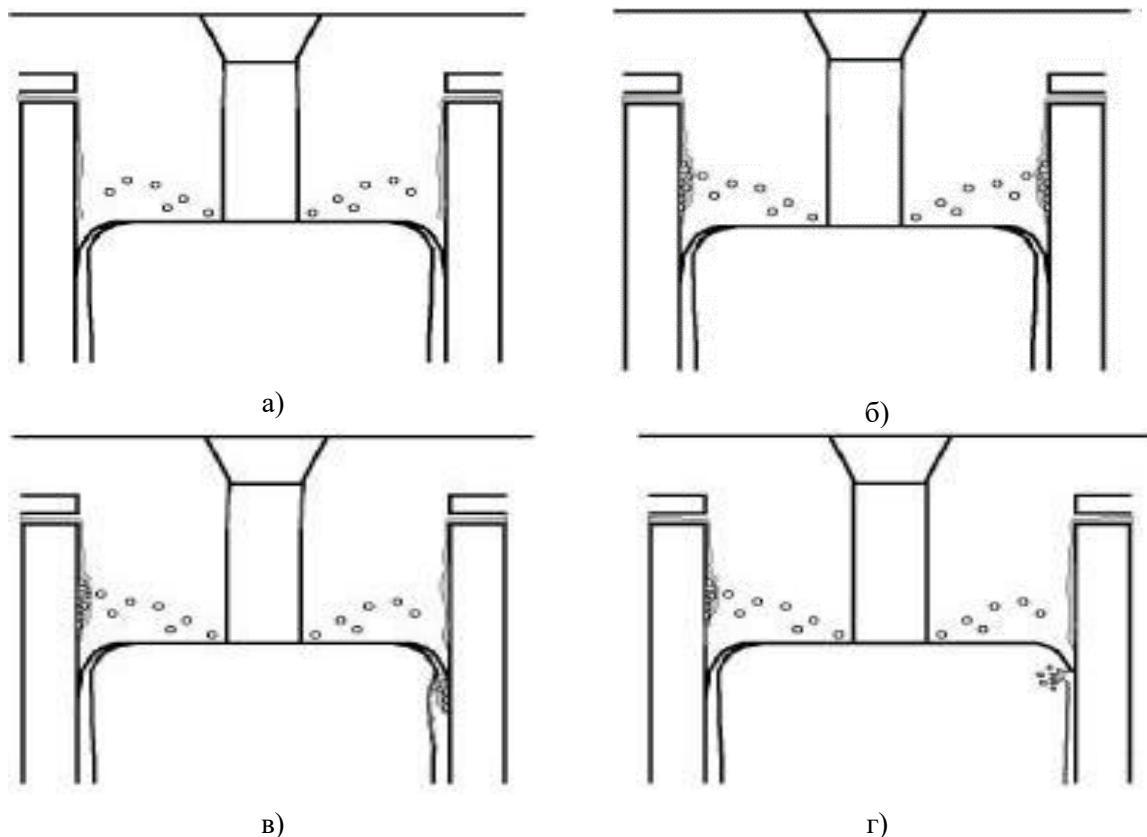


Рисунок 6 – Механізм формування шлакових включень
а) бризки металу; б) скупчення крапель шлаку в кутах кристалізатору; в) захоплення шлакової корки з стінок кристалізатору; г) виникнення пузирів повітря з перемішуванням мастила

Обговорення результатів досліджень. На дослідження природи поверхневих дефектів надійшли зразки БЛЗ відібрані з двох плавок зі сталі марки СтЗсп. Дані дефекти, виявлені під час огляду БЛЗ, класифікувалися спеціалістами технічного контролю як дефект – шлакові включення. При зовнішньому огляді зразків (див. рис. 7) даний дефект має V-подібну, U-подібну форму, розташовану в кутах БЛЗ і візуально є невиконанням геометрії форми по кутах БЛЗ. Також у порожнині дефекту спостерігаються невеликі металеві вкраплення круглої форми. Наявність неметалевого матеріалу при зовнішньому огляді немає.

При дослідженні макроструктури та при зовнішньому огляді шліфу підготовленого для мікродосліджень (рис.8 та рис. 9) у зоні зазначеного дефекту спостерігаються металеві краплі та пористість. Ця пористість поширюється вглиб на зразку плавки до 3,0 мм, а в іншій плавці до – 7,0 мм.

При мікроструктурному дослідженні на оптичному мікроскопі «Неофот-21» у досліджуваній зоні спостерігаються неметалеві включення. Дані неметалеві включення виявлено в декількох видах: на поверхні БЛЗ, між сталлю та металевими краплями та у вигляді глобулярних макровключень.

Відповідно до досліджень, наведених у роботі [6,7] неметалеві включення, виявлені на поверхні БЛЗ і між сталлю та металевими краплями (рис. 7 і рис. 8) є силікат марганцю або оксид марганцю і заліза товщиною від 0,2 до 0,3 мм. Виявлені глобулярні макровключення (рис. 8) являють собою гомогенні силікати марганцю, силікати марганцю з родонітовими голками та силікати марганцю з кристобалітовими дендритами.

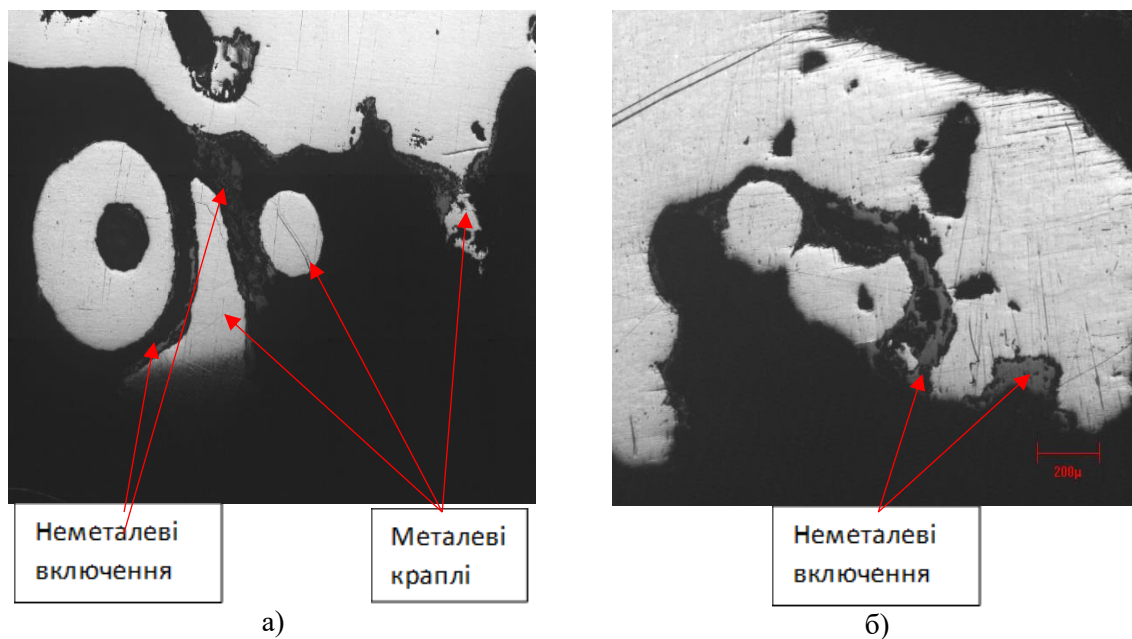
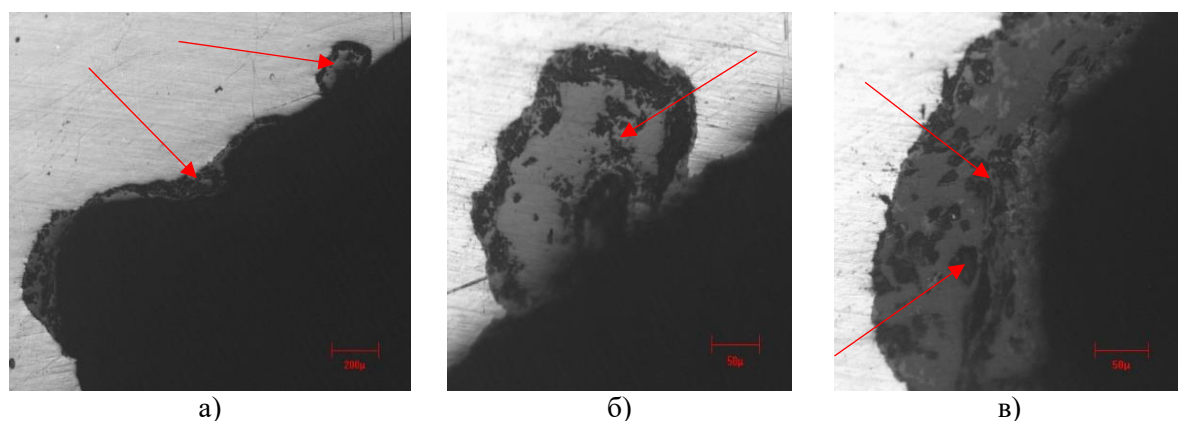


Рисунок 7 – Мікроструктура у зоні неметалевих включень та металевих крапель



шлакові включення по межі заготовлі

збільшена частина шлакового включення

шлакове включення з металевими вкрапленнями

Рисунок 8 – Мікроструктура у зоні неметалевих включень зразка БЛЗ, марка сталі 3пс

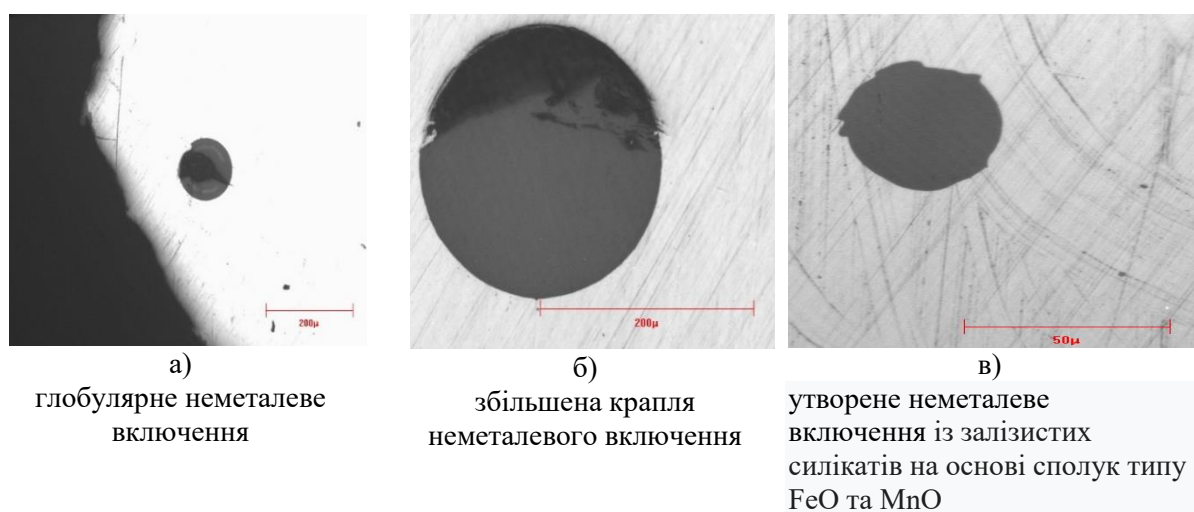


Рисунок 9 – Мікроструктура у зоні глобулярних неметалевих включень

Металографічний аналіз показує, що йдеться не про класичне шлакове включення, а про складний дефект, який включає глибоку пористість, металеві краплі та неметалічний матеріал.

© Мазур І.А., Волох В.І., Морозов І.В.

Механізм утворення металевих крапель наведено на рис.6. Цей механізм може пояснити характеристики дефектів, виявлених у досліджуваних зразках.

Поверхневі дефекти, що спостерігаються в БЛЗ конгломератом різних матеріалів, що представляє собою сукупність шлакових включень, металевих крапель та пористості [7].

Висновки. Поверхневі дефекти, що спостерігаються у БЛЗ є конгломератом різних матеріалів, що представляє собою сукупність шлакових включень, металевих крапель та пористості. Поверхневі дефекти це шлакові включення глибиною до 3 мм, та газові бульбашки глибиною до 4 мм.

На підставі результатів дослідження на металургійному підприємстві було внесено кілька змін до металургійного технологічного процесу роботи МБЛЗ, а саме:

1. Збільшено час попереднього нагріву проміжних ковшів, в результаті знизилася нестійкість потоку сталі та утворення бризг в кристалізаторі.

2. Забезпечено належне центрування внутрішніх склянок по відношенню до кристалізатора.

3. Щоб уникнути закупорки, забезпечено контроль відсоткового співвідношення %Ca/%Al та % Ca/%S, що мінімізує попадання прохолодних крапель.

4. Щоб уникнути присутності вологи в кристалізаторі, виконується попереднє нагрівання мастила.

5. Підвищена термічна стійкість сталі в проміжному ковші, а також для запобігання виникнення шлакових включень видані слідуючи рекомендації:

а) періодично проводити очистку металевою щіткою (або іншим пристроєм верхньої частини мідної стінки гільзи кристалізатору від скупчених металевих частин під час розливки);

б) виключення аномального підвищеного рівня коливань рівня металу у кристалізаторі. Ці коливання можуть бути викликані як проблемами у роботі системи підтримання рівня металу у кристалізаторі так і надмірним боковим зміщенням кристалізатору;

в) потрібно перевіряти механізм коливання кристалізатору, але не рідше одного разу на рік за допомогою акселерометрів. Бокове зміщення повинно бути в межах $\pm 0,2$ мм;

г) струмінь сталі з проміжного ковшу повинен попадати по центру кристалізатору. В іншому випадку, якщо струмінь падає поруч з мідною стінкою, то цей дефект може виникати частіше.

6. В 2024р. було встановлено, що на періодичність виникнення дослідженого дефекту впливає також марка та постачальник мастила, яке подається в кристалізатор, тому в цьому напрямку будуть проведені наступні дослідження.

Заходи, прийняті щодо технологічного режиму на МБЛЗ, на підставі даних результатів, дозволили знизити отримання шлакових включень на поверхні заготовки.

Інформаційні джерела

1. Підвищення ефективності безперервного розливання сортової заготовки // А. А. Мінаєв, А. Н. Смирнов, В. Л. Пилушенко та ін. // Метал та лиття України. 2001. № 5-6. С. 22-25.

2. Властивості шлакоутворювальних сумішей для безперервного розливання сталі з підвищеною швидкістю / О. М. Смирнов, С. Л. Макуров, М. В. Єпішев та ін. // Метал та лиття України. 2006. № 1. С. 55-57.

3. Механізм формування шорсткої поверхні шлакового гарнісажу та її вплив на величину термічного опору, зазору між оболонкою злитка та стінкою кристалізатора / Н. П. Лякішев, Н. А. Арутюнян, А. І. Зайцев та ін. // Метали. 2005. № 3. С. 3-15.

4. Shuai, Y.; Sun, L.F.; Cao, R.H.; Xiao, N.G. Numerical analysis of influence of billet submerged entry nozzle on mold flow field and temperature field. Foundry Technol. 2018, 39, 167–171.

5. Розрахунок параметрів фізичного моделювання процесів розподілу інокуляторів у кристалізаторі МБЛЗ / Е.В.Сінегін, Б.М. Бойченко, В.Г. Герасименко [та ін.]. - Металургійна та гірничорудна промисловість. 2012. №7. С.127-130.

6. Guan, W.B.; Wang, Z.; Zhu, J.; Song, M.M. Analysis and optimization the reason of surface slag-scratch defect of casting billet on No.70 steel. Shanxi Metall. 2019, 181, 21–22.

7. Yong-feng Chen; Li Zhao; Xiao-tan Zuo; Qun-nan Tao; Hong-biao Zhang; Hai Li; Qiang-qiang Wang; and Sheng-ping He. Investigation and Minimization of Slag Spot Surface Defects in Continuous Casting of High Carbon Steel Billets through Statistical Evaluation. Metall. Mater. Trans. B 2020, 10, 10–11.

I. Mazur, V. Voloh, I. Morozov.

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

*Private joint-stock company "Kamet-Stal" Kamianske

RESEARCH OF THE PROCESS OF THE FORMATION OF SLAG INCLUDED IN BILLETS DURING THE CASTING OF A CONTINUOUS STEEL CASTING MACHINE

For a long time, blanks with a defect, previously classified as slag entrapment, have been manufactured at the enterprise for grade MBLZ from different grades of steel. As a result, research was conducted to determine the root cause.

Metallographic studies of workpiece defects are presented, showing that the cause of the defect is not only slag entrapment, but also cold drops and porosity. Different degrees of etching were used to conduct metallographic studies, and scanning electron microscope analysis was also performed. Based on the information available in the literature and on the basis of the thermodynamic model of the Fe-Si-Mn-O system, the mechanism and scheme of foaming and capture of slag inclusions in the crystallizer was carried out. Based on the results of the metallographic study, a mechanism for the formation and capture of cold drops and recommendations for reducing slag inclusions in the workpieces are proposed.

Key words: *steel casting, porosity, slag inclusions, billet, continuous casting.*

УДК 658.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-10

Маркіна Л.М., Смолянкін О.О., Сацик В.О., Решетило О.М.

Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ОДНОПЛАТНОГО КОМП'ЮТЕРА RASPBERRY PI ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ФЕРМЕНТАЦІЇ МОЛОКА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СИРУ

Проведено дослідження харчової промисловості та визначено ряд проблем, які пов'язані з низьким технічним рівнем підприємств та використанням ручної праці, що впливає на якість та ефективність виробництва. Особливу увагу приділено ділянці ферментації молока при виробництві сиру, визначено нестійкість системи керування. Було застосовано методіку теорії автоматичного керування з корекцією параметрів системи, що дозволило досягнути стійкості системи. Для покращення показників якості системи розглянуто використання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, здійснено підбір необхідних технічних засобів автоматизації, розроблено електричну схему регулювання температури в процесі ферментації з PID – регулятором. Отримано перехідні характеристики та визначено час регулювання системи.

Ключові слова: ферментація, регулювання температури, система автоматичного керування, стійкість, критерій Найквіста, годограф Михайлова, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi.

Постановка проблеми. Харчова промисловість в Україні є одна з найважливіших та найбільших галузей промисловості. Вона забезпечує виробництво широкого спектру продуктів харчування, таких як: зернові, м'ясо, молоко, олію, кондитерські вироби та багато іншого. Україна є експортером сільськогосподарської продукції, зокрема соняшникової олії, м'ясної продукції, зернових культур та молочної продукції. Перелічена продукція є лише малим відсотком від усіх існуючих напрямків харчової промисловості, які виробляються в Україні. Хоч дана галузь має великий потенціал, зокрема експорт в країни Європи, але існує і ряд проблем та викликів з якими стикається [1]. Зокрема до них можна віднести: старіння обладнання, недостатня кількість інвестицій, зміна стандартів якості продукції та багато іншого, що спричиняє нестабільність роботи. У зв'язку з цим чимало підприємств спрямовують свою увагу на удосконалення технологічних процесів із застосуванням сучасних технічних засобів автоматизації.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження в галузі харчової промисловості, підкреслюють кілька ключових проблем і викликів, що стоять перед цим сектором. Однією з таких проблем є низький технічний рівень підприємств, що впливає на якість та ефективність виробництва. Ще однією проблемою є високий рівень застосування ручної праці, зокрема в контексті виробництва молочної продукції. Це призводить до зниження ефективності виробництва, збільшення витрат на оплату праці та збільшення ризику помилок та непередбачених відхилень у якості продукції [2,6].

Виклад основного матеріалу. У даній статті розглянемо одну із ділянок харчової промисловості, а саме процес ферментації молока при виробництві сиру. Даний процес передбачає сквашування молока для подальшого отримання сирного згустку. Ділянка ферментації є однією із початкових та ключових стадій від якої в подальшому залежить якість готової продукції, оскільки для дії ферментів необхідно здійснювати контроль та регулювання температурного режиму в межах від 30°C до 40 °C. В залежності від видів сиру температура може коливатись: для м'яких 30°C -35°C, тверді 38°C -40°C, напівтверді 35°C -38°C. Технологія ферментації молока здійснюється в змішувачах, які обладнані мішалками та паровими сорочками для нагріву та підтримання температурного режиму. Молоко та фермент надходять у ємність у визначених кількостях 1:10, 1:20, 1:50 в залежності від виду сиру. Для забезпечення контролю та регулювання температури на підприємствах не завжди використовують сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації, які забезпечують своєчасне реагування на зовнішні чинники, які можуть виникнути під час процесу ферментації.

Проведені дослідження, які здійснювались на ділянці ферментації молока при виробництві сиру, дозволили виявити ряд проблем - нестійкість системи керування. Розглянемо САР температури в ферментаторі, які представлена у вигляді структурної схеми на рисунку 1.

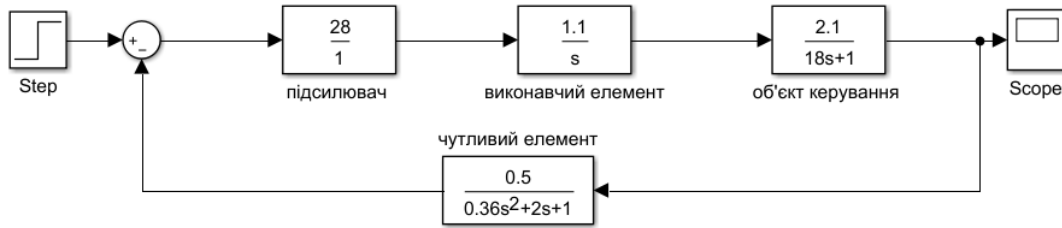
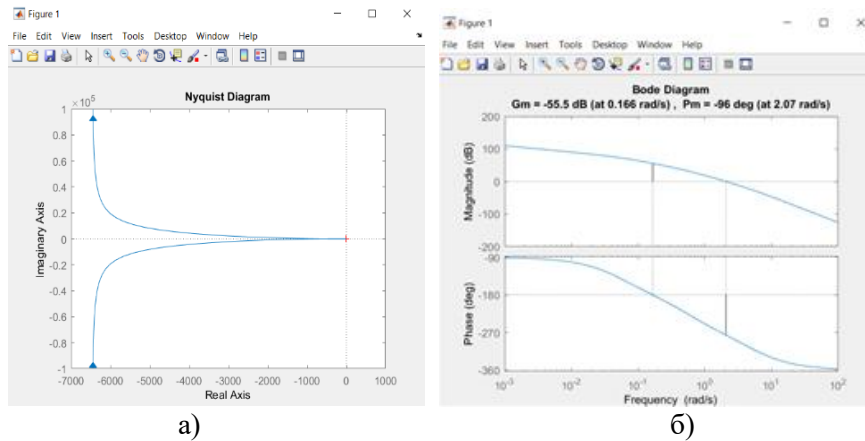


Рисунок 1 – Структурна схема САР температури у ферментаторі при виробництві сиру

Для дослідження системи автоматичного керування було використано критерії Найквіста та Михайлова, які дозволяють дослідити стійкість у розімкнутому та замкнутому стані.



а)

б)

Рисунок 2 – Критерій Найквіста:

а – амплітудна фазочастотна характеристика; б – ЛАЧХ та ЛФЧХ

Отримані характеристики підтверджують нестійкість системи у розімкнутому стані. Відповідно до формулювання критерію Найквіста, для стійкості системи в розімкнутому стані необхідно, щоб амплітудна фазочастотна характеристика не охоплювала точку з координатами $(-1;j0)$ та ЛАЧХ перетинала вісь частот раніше, ніж ЛФЧХ -180 [3]. Отримані характеристики даних умов не виконуються, тому САР є нестійкою.

У замкнутому стані дослідження здійснювались за допомогою побудови годографа Михайлова, що теж підтвердив нестійкість, оскільки він не починає свій рух з дійсної осі та не проходить послідовно 4 квадранти, які відповідають степені характеристичного рівняння.

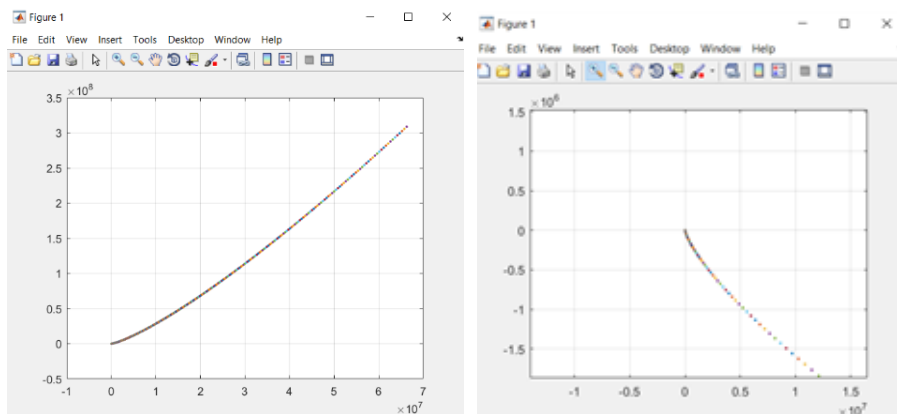


Рисунок 3 – Годограф Михайлова

Також було проведено побудову перехідної характеристики САР, яка відображає реакції системи на дію збурення та її стабілізацію. Отримана характеристика остаточно підтвердила нестійкість досліджуваної системи.

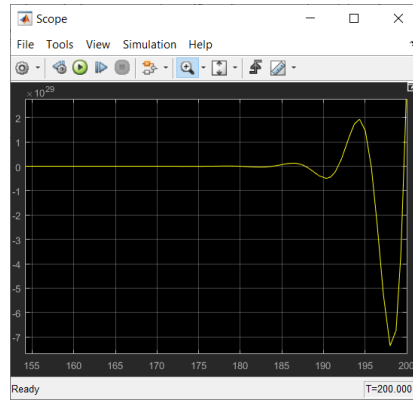


Рисунок 4 – Перехідна характеристика замкнутої системи

Для вирішення даної проблеми в теорії автоматичного регулювання існує методика, яка передбачає введення в систему автоматичного регулювання коректуючої ланки та визначення параметрів коефіцієнта підсилення, що буде забезпечувати стійкість, а також визначення його критичного значення. Отримані дані дозволяють не лише забезпечувати стійкий стан системи та проводити налаштування параметрів обладнання в допустимих межах не допускаючи переходу системи в нестійкість. Застосування даного алгоритму дозволили отримати наступну САР, що зображена на рисунку 5.

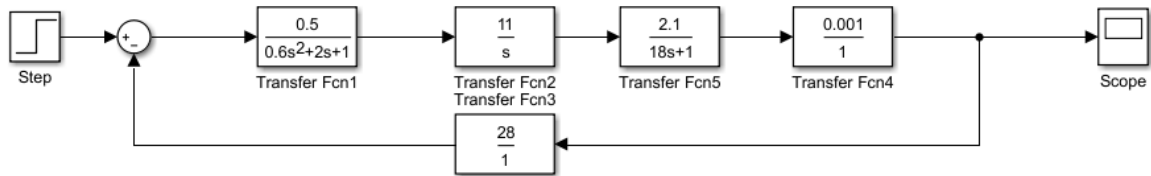


Рисунок 5 – Структурна схема САР температури у ферментаторі при виробництві сиру з корекцією

Передаточна функція розімкнутої системи з корекцією:

$$W_p = \frac{0.3234}{6.48s^4 + 36.36s^3 + 20s^2 + s}$$

Передаточна функція замкнутої системи з корекцією:

$$W_3 = \frac{0.3234}{6.48s^4 + 36.36s^3 + 20s^2 + s + 0.3234}$$

Провівши перерахунки із врахування корекції системи було отримано характеристики за критерієм Найквіста, що зображено на рисунку 6, а також годограф Михайлова на рисунку 7.

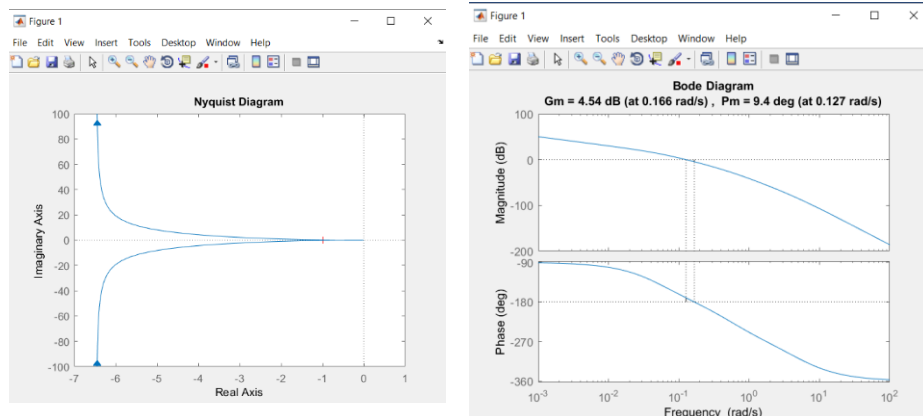


Рисунок 6 – Характеристики Найквіста з корекцією

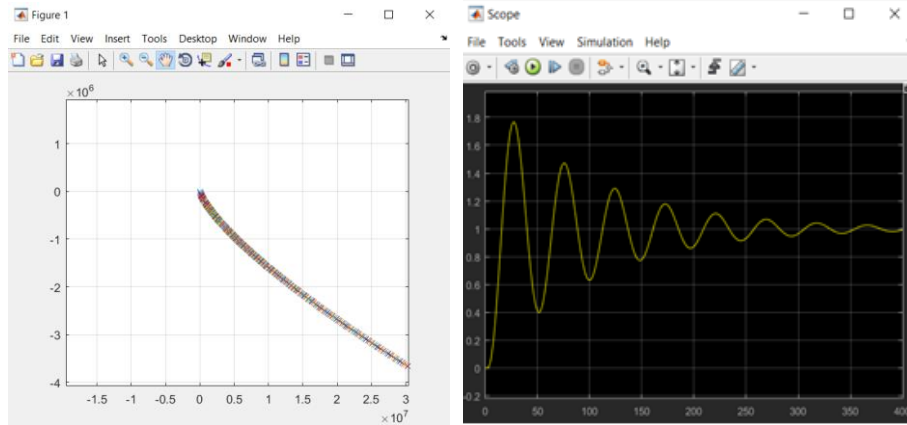


Рисунок 7 – Годограф Михайлова та перехідна характеристика з корекцією.

Застосування методики введення коректуючої ланки дозволило змінити характеристики системи, шляхом додавання додаткового елементу в контур керування, що компенсує недоліки або вдосконалює структуру системи, також дозволяє підвищити стійкість системи до зовнішніх впливів або параметричних змін, забезпечуючи більш точне керування і надійність роботи. Підтвердженням є отримані характеристики, які вказують на стійкість системи у розімкненому та замкненому стані. Час регулювання за перехідною характеристикою становить 400 с. Дані результати дають можливість не лише покращити ефективність роботи системи, а й надійність.

Сучасні системи автоматичного керування передбачають не лише використання класичних методів теорії автоматичного керування, але і застосування контролерів та одноплатних комп'ютерів: контролери DS1104 від фірми dSPACE [4], ADAM-4000 та Raspberry Pi. Два перші контролери є дорогішими, що може стати перешкодою для малих виробництв, що тільки розпочинають свою діяльність. Також, складність процесу налаштування та програмування, вимагає глибоких знань в області MATLAB/Simulink або мов програмування C/C++, що може виявитися викликом для неспеціалізованих користувачів. Однак ми пропонуємо використати одноплатний комп'ютер, який є більш доступним та економічним рішенням - Raspberry Pi [5].

З врахуванням цих можливостей, його можна використовувати для розробки складних систем керування, зокрема температурою в ферментаторі при виробництві сиру. Для реалізації цієї системи потрібно деяке обладнання, таке як датчики температури, реле для керування нагрівачами, а також програмне забезпечення для зчитування даних з датчиків та управління реле. На щастя, Raspberry Pi має широкий спектр портів та можливостей для підключення зовнішніх пристроїв, що робить його ідеальним для таких завдань. Електрична схема зображена на рисунку 8.

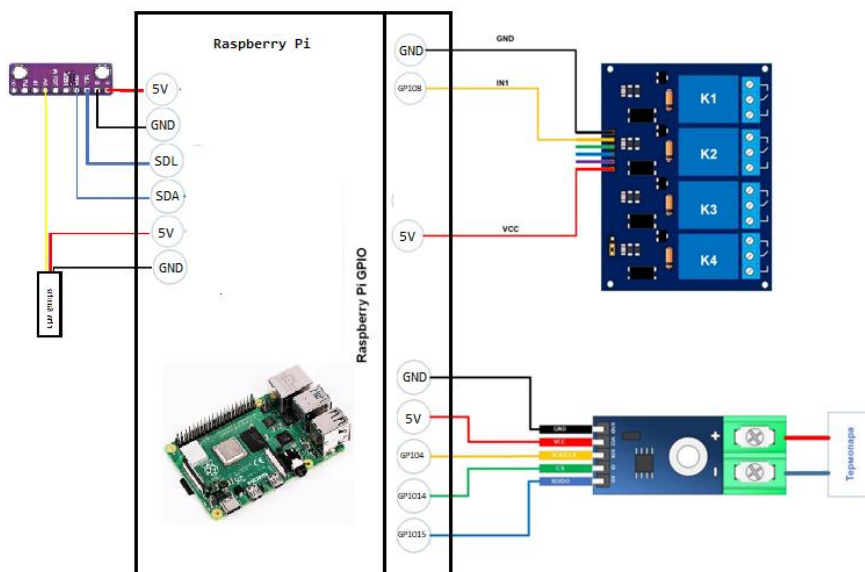


Рисунок 8 – Електрична схема регулювання температури в процесі ферментації

Термопара типу К підключена до одноплатного комп'ютера Raspberry Pi через цифровий підсилювач MAX6675, який забезпечує компенсацію холодного з'єднання і перетворює сигнал від термопари у цифровий формат. Цей модуль дозволяє безперервно вимірювати температуру у змішувачі, забезпечуючи необхідну точність і надійність.

Для налаштування температури керування у змішувачі використовується змінний опір, який підключений до входів SDL та SDA через перетворювач ADS1015. Цей перетворювач аналогових сигналів в цифровий формат забезпечує точне вимірювання значень опору, що відповідають заданій температурі керування.

Для регулювання температури в ферментаторі використовується модульне реле, яке підключене до виходу GPIO8 Raspberry Pi. Це реле дозволяє автоматично управляти роботою нагрівачів або інших пристроїв, що забезпечують регулювання температури, згідно з отриманими даними від термопари та перетворювача опору.

Така конфігурація дозволяє ефективно контролювати та регулювати температуру в змішувачі за допомогою одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, забезпечуючи оптимальні умови для отримання сирного згустку. Для спроектованої схеми була використана мова програмування Python. На цій мові програмування реалізована програма, що використовує попередньо розраховані коефіцієнти передаточної функції та PID регулятора, які вже є вбудовані в програму та використовуються для ефективного керування температурним режимом у ферментаторі при виробництві сиру.

Результатом роботи розробленої системи керування є побудова двох перехідних характеристик, які відображають застосування двох способів.

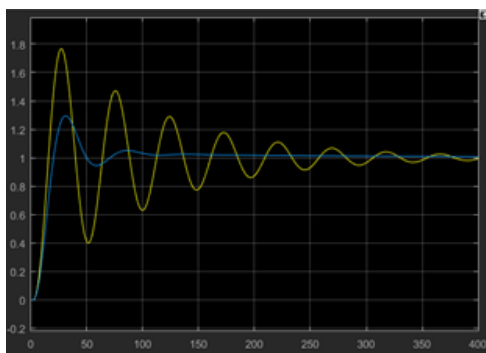


Рисунок 9 – Перехідні характеристики отримані методом корекції та із застосуванням контролера Raspberry Pi.

Висновки. В даній роботі було досліджено на стійкість процес ферментації при виробництві сиру із застосуванням класичного методу теорії автоматичного керування та з допомогою сучасних засобів автоматизації, а саме одноплатного комп'ютера Raspberry Pi та побудовано відповідні перехідні характеристики до кожного з них. Застосування одноплатного комп'ютера та PID – регулятора забезпечує не лише стійкість системи, але і покращує показники якості системи, а саме час регулювання, який становить 150 с.

Інформаційні джерела

1. Антоненко Т. Молокопереробка року 2011-го // Молоко і ферма. 2012. № 1 (8). С. 22–27.
2. Михайлицька О.Р., Сливка Н.Б., Турчин І.М. Актуальні проблеми вітчизняного сироваріння / Збірник наукових праць ВНАУ. Безпека продуктів харчування та технологія переробки. 2013. Випуск 3 (73). 192-196 с.
3. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. 2-ге вид., перероб. і дог. К.: Либідь, 2007. 656 с
4. Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. Моделювання процесу замісу у змішувальному баку при виробництві спирту. // WORLD SCIENCE. № 6 (34) Vol. 2, June 2018. P. 52-56. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12062018/5820.
5. Simon Mork Raspberry Pi Cookbook. Software and Hardware Problems and Solutions. O'Reilly Media. 2022. p.618
6. І.Г. Власенко, Т.В. Семко, С.В. Гирич. Інновації у виробництві твердих сирів. Вінниця, РВВ ВТЕІ КНТЕУ, 2018. 144 с.

Markina L., Smoliankin O., Satsik V., Reshetylo O.

Lutsk National Technical University

USING A SINGLE-BOARD RASPBERRY PI COMPUTER TO CONTROL THE TEMPERATURE OF MILK FERMENTATION IN CHEESE PRODUCTION.

A study of the food industry has been carried out. A number of problems have been identified that are associated with the low technical level of enterprises and the use of manual labour, which affects the quality and efficiency of production. Particular attention is paid to the area of milk fermentation in cheese production, and the instability of the control system is identified. The methodology of automatic control theory with correction of system parameters was applied, which allowed to achieve system stability. To improve the quality indicators of the system, the use of a single chamber was considered, the necessary technical means of automation were selected, and an electrical circuit for temperature control during fermentation with a PID controller was developed. The transient characteristics are obtained and the system control time is determined.

Keywords: *fermentation, temperature control, automatic control system, stability, Nyquist criterion, Mikhailov hodograph, unicameral computer Raspberry Pi.*

УДК 621.3.088

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-11

Мороз С.А., Чалий В.Д., Лишук В.В., Ткачук А.А., Горайчук А.А.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЧУТЛИВІСТЬ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЙМАЧІВ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ДАВАЧАХ РУХУ

В статті проведений аналіз одного з різновидів давачів, які використовуються в технологіях Smart City. Зокрема розглянуті давачі на основі піроелектричних приймачів, що реєструють теплове випромінювання, зокрема випромінювання людського тіла. Встановлено, що для оцінки ефективності роботи приймачів випромінювання використовується ряд характеристик, досить важливими з яких є чутливість та поріг чутливості. Наведені математичні відношення, які описують чутливість приймача як комплексну частотну характеристику, що пов'язує реакцію піроелектричного приймача та вплив на нього у вигляді гармонійного потоку. Представлені характеристики порогу чутливості приймача та формули для визначення даної характеристики. Встановлено, що для визначення порогу чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання необхідно знати рівень шумів його чутливого елемента. Для виведення відповідних формул представлена еквівалентна схема піроелектричного приймача. Встановлені джерела шумів піроелектричних елементів, зокрема тепловий (джонсонівський) шум навантажувального опору, тепловий (джонсонівський) шум опору діелектричних втрат чутливого елемента, шумова ЕРС вимірювальної схеми, ввідний шумовий струм вимірювальної схеми, температурний шум чутливого елемента. Подана графічна залежність величини шумів від різних джерел для типового детектора з електричною та тепловою постійними часу. Зроблені відповідні висновки за результатами аналізу.

Ключові слова: піроелектричний приймач, теплове випромінювання, давач, чутливість, шуми завод.

Постановка проблеми. У зв'язку з широким застосуванням сучасних електронних пристроїв здійснюється істотна «інтелектуалізація» різноманітних давачів фізичних величин. Ці засоби перестають бути просто допоміжними і набувають нових властивостей, що робить істотний вплив на використання таких давачів в контексті розвитку технологій Smart City. Smart City (Розумне місто) – це концепція об'єднання багатьох електронно-комунікаційних та інформаційних технологій, враховуючи системи Інтернету речей для управління та контролю за інфраструктурою міста. За рахунок використання давачів, які інтегровані у різноманітні системи у режимі реального часу, отримані дані обробляються та аналізуються. Зібрана інформація є ключем до вирішення поставлених завдань.

Для виконання завдань, які потрібно вирішувати в рамках проєктів Smart City використовуються різноманітні пристрої, як сприймають зовнішню інформацію різних типів. Одними з таких пристроїв є давачі на основі піроелектричних приймачів теплового випромінювання, зокрема людського тіла.

Як відомо, [1, 2] інфрачервоними називаються електромагнітні хвилі з довжиною хвилі $\lambda > 0,76$ мкм. Оскільки рівень випромінювання людського тіла вкрай низький то технічні засоби виявлення, завдяки своїй конструкції, мають на кілька порядків більшу чутливість.

В даний час виготовляються піроелектричні перетворювачі різноманітних типів, що включають різні детектори теплового випромінювання, тепловізійні матриці і піровидикони, анемометри, хроматографічні детектори, тощо. Обсяги виготовлення пристроїв, робота яких побудована на піроелектричному ефекті постійно збільшуються, також розширюються сфери їх застосування [3].

Аналіз останніх досліджень. В різних інформаційних джерелах [4-6] для оцінки ефективності роботи приймачів випромінювання використовується ряд характеристик, найважливішими є: чутливість, імпульсна функція, перехідна характеристика, інерційність, швидкодія, спектральна чутливість, зонна характеристика, динамічний діапазон, поріг чутливості (NEP , NEI), виявна здатність.

Додатковими характеристиками є: - спектр шумів; величина сигналу, що може бути отриманий; характеристика насичення; температурні залежності параметрів приймача; взаємозв'язок між зазначеними та іншими характеристиками.

© Мороз С.А., Чалий В.Д., Лишук В.В., Ткачук А.А., Горайчук А.А.

Чутливість піроелектричних приймачів теплового випромінювання визначається відношенням величин вихідного сигналу до впливу потоку випромінювання $\Phi(t)$. Вихідним сигналом піроелектричних приймачів може бути або струм I або напруга V (рисунок 1). У першому випадку чутливість називається ампер-ватною і позначається R_I , у другому – вольт-ватною та позначається R_V . Типова чутливість R_I піроелектричних елементів діаметром 2 мм та ємністю 30 пФ становить ~ 1 мкА/Вт. Загалом обидві чутливості залежать від частоти модуляції ω потоку випромінювання $\Phi(t)$ і описуються комплексною частотною характеристикою $K(\omega) = R(\omega) \cdot \exp[i\psi(\omega)t]$.

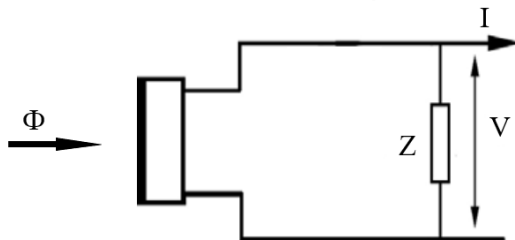


Рисунок 1 – Спрощена схема приймача теплового випромінювання:
 Φ – потік випромінювання; I – електричний струм, що виникає; V – напруга

Функція $K(\omega)$ пов'язує реакцію приймача та вплив на нього у вигляді гармонійного потоку $\Phi(t) = \Phi I \exp(i\omega t)$:

$$V(\omega, t) = K(\omega) \Phi I \exp(i\omega t). \quad (1)$$

Вихідний сигнал при спектрі впливу, що дорівнює $C_F(\omega)$, задається виразом у вигляді інтеграла Фур'є:

$$V(t) = (1/2\pi)^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\omega) C_F(\omega) \exp \exp(i\omega t) d\omega. \quad (2)$$

Поріг чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання (або еквівалентна шуму потужність - noise equivalent power, NEP) визначається величиною потоку випромінювання Φ_{min} , сигнал, що викликає в приймачі, рівний середньоквадратичному значенню його загального шуму $\langle V_N^2 \rangle^{1/2}$:

$$\Phi_{min} = \langle V_N^2 \rangle^{1/2} / R_V = NEP. \quad (3)$$

Поріг чутливості (або NEP) визначає мінімальний сигнал, який може бути зареєстрований. При реєстрації однорідного потоку випромінювання: $\Phi = A\varphi$ (φ – густина потоку випромінювання) більш відповідною характеристикою є NEI (noise equivalent irradiance) – еквівалентна шуму опроміненість (щільність потоку випромінювання):

$$NEI = NEP/A, \quad (4)$$

де A – площа приймача.

NEI дає можливість порівнювати здатність реєстрації даного падаючого випромінювання чутливого елемента різних розмірів. NEP визначається зазвичай для даної частоти та одиничної смуги пропускання і виражається у Вт Гц^{-1/2}. Іноді NEP визначається як відношення шуму широкосмугового до чутливості при заданій частоті, в цьому випадку NEP виражається в Вт. Аналогічно, NEI виражається у Вт·см⁻²·Гц^{-1/2} або Вт·см⁻².

Мета роботи. Метою статті є аналіз факторів, які впливають на чутливість піроелектричних приймачів теплового випромінювання у давачах руху; опис поняття чутливості для ІЧ-давачів; розгляд існуючих шумів які можуть мати суттєвий вплив на чутливий елемент давачів руху; формулювання висновків та рекомендацій для практичного використання у процесі проектування та виготовлення давачів руху.

Викладення основного матеріалу. Як вже було вказано вище одним з основних характеристик ефективної роботи таких пристроїв є чутливість. Для визначення порога чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання необхідно знати рівень шумів його чутливого елемента, еквівалентна схема якого представлена (рисунок 2) конденсатором з ємністю C_g і тангенсом кута діелектричних втрат $tg\delta$.

Зазвичай виділяють наступні джерела шумів піроелектричних елементів.

1) Тепловий (джонсонівський) шум навантажувального опору R_s який визначається

формулою Найквіста:

$$U_{NR}^2 = \frac{4k_B T R_a \Delta f}{1 + \omega^2 C_S^2 R_a^2} \quad I_{NR}^2 = \frac{4k_B T \Delta f}{R_a}, \quad (5)$$

де $f = \omega/2\pi$ – частота напруги, що реєструється, Δf – робоча полоса пропускання приймача

Джонсонівський шум – це середньоквадратична напруга на резисторі, зумовлена хаотичним тепловим рухом у ньому електронів.

2) Тепловий (джонсонівський) шум опору діелектричних втрат чутливого елементу визначається узагальненою формулою Найквіста у разі довільних дисипативних систем. При $C_S \gg C_a$ цей шум визначається формулою:

$$U_{ND}^2 = \frac{4k_B T t g \delta \Delta f}{\omega C_S (1 + t g^2 \delta)} \approx \frac{4k_B T t g \delta \Delta f}{\omega C_S} \quad I_{ND}^2 = 4k_B T C_S \omega t g \delta \Delta f. \quad (6)$$

У загальному випадку джонсонівські шуми кола із сумарним адмітансом $Y = g + i\omega C g$ визначаються формулою:

$$U_{NJ}^2 = \frac{4k_B T g \Delta f}{g^2 + \omega^2 C_g^2} \quad I_{NJ}^2 = 4k_B T g \Delta f. \quad (7)$$

де g – електропровідність паралельно з'єднаних активного опору навантаження R_a (з провідністю $g_R = 1/R_a$) та чутливим елементом (з провідністю на змінному струмі $g_D = C_S t g \delta$).

При $\omega = \omega_c = 1/(R_a C_S t g \delta)$ виконується рівність $g_R = g_D$, ця частота лежить зазвичай в діапазоні 0,1 ÷ 10 Гц, вона визначає полосовий фільтр між резистивними та діелектричними шумами. При $\omega \gg \omega_c$ переважають шуми діелектричних втрат, а при $\omega \ll \omega_c$ переважають шуми навантажувального опору. Тому при високих частотах ($\omega > 1/\tau_E$, ω_c) і $C_S \gg C_a$ питома виявна здатність визначається формулою:

$$D^* = \frac{R_V (\Delta f A^{1/2})}{(U_{NJ}^2)^{1/2}} = \frac{\eta p^\sigma}{d^{1/2} (4k_B T)^{1/2} C_V (\epsilon \epsilon_0 t g \delta)^{1/2} \omega^{1/2}}. \quad (8)$$

Для досягнення максимальних величин D^* у цій області частот необхідно збільшувати параметр піроелектричної якості $M_D = p^\sigma / C_V (\epsilon \epsilon_0 t g \delta)^{1/2}$. Слід зазначити, що для деяких кристалів (наприклад, LiTaO₃) ϵ і $t g \delta$ у аналізованій області частот практично не залежать від частоти, проте це виконується не завжди. Так, для полімерних і деяких керамічних матеріалів спостерігаються помітні зміни ϵ і $t g \delta$ з частотою, що впливає на величину шуму, що розглядається.

3) Шумова ЕРС $((U_{NV}^2)^{1/2})$ вимірювальної схеми

4) Вхідний шумовий струм $((I_{NI}^2)^{1/2})$ вимірювальної схеми

Параметри 3 та 4 залежать від параметрів та режиму роботи вхідного транзистора. Мінімальні значення шумової ЕРС на низьких частотах (10 ÷ 20) Гц становлять ~ 10 нВ/Гц^{1/2}, а значення шумового струму $\sim (2 \div 3) \cdot 10^{-16}$ А/Гц^{1/2}. За своєю природою шумовий струм є, переважно, дробовим шумом, що у колі затвора польових транзисторів. Залежність шумового струму від затворного струму I_e добре описується формулою Шоттки:

$$I_{NI}^2 = 2e I_e \Delta f. \quad (9)$$

5) Температурний шум чутливого елементу, який пов'язаний з флуктуаціями у ньому температури, що виникають через статистичну природу теплообміну між чутливим елементом і навколишнім середовищем. Для простої моделі піроелектричного приймача із зосередженими параметрами температурний шум визначається флуктуаціями теплового потоку, що падає на поверхню приймача:

$$(U_{NT}^2)^{1/2} = \frac{R_V (4k_B T^2 G_{th} \Delta f)^{1/2}}{\eta}. \quad (10)$$

Встановлено, що температурний шум є одним із складових частин шуму діелектричних втрат. Це означає, що існує такий механізм діелектричних втрат, який кількісно пов'язаний з

тепловими втратами і призводить до додаткового опору електричних втрат, еквівалентних шумової напруги $(U_{NT}^2)^{1/2}$. Цей механізм пов'язаний з електротермічною взаємодією, що виявляється у взаємному впливі піроелектричного та електрокалоричного ефектів на електричні та теплові процеси у піроелектриках.

Повна середньоквадратична напруга шумів U_N^2 може бути записано у вигляді:

$$U_{NT}^2 = U_{NR}^2 + U_{ND}^2 + U_{NV}^2 + U_{NI}^2 + U_{NT}^2. \quad (11)$$

Кожен із цих джерел шумів представлений на еквівалентній схемі як генератора напруги чи струму (рисунок 2, а). Залежність величини шумів від різних джерел для типового детектора з електричною та тепловою постійними часу більшими за 1 мс подана на рисунку 2, б.

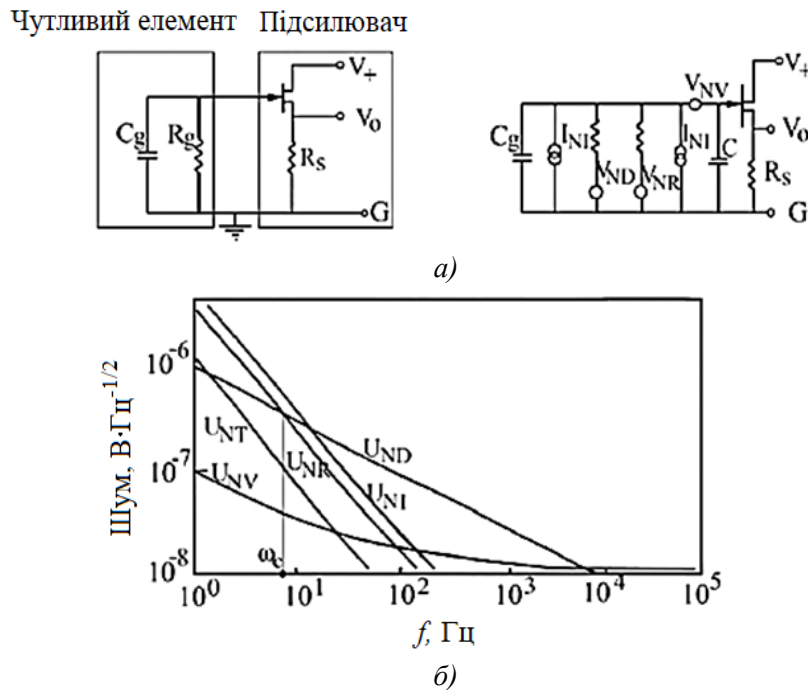


Рисунок 2 – Еквівалентна електрична схема піроелектричного приймача із зазначенням джерел шумів (а) та відносні величини напруг шумів для типових піроелектричних детекторів (б)

При понад 20 Гц переважають джонсонівські теплові шуми опору діелектричних втрат, температурний шум незначний. При частотах $f < 20$ Гц основний внесок дають джонсонівські шуми опору і шуми підсилювача.

Висновки. Крім перелічених вище, є низка інших джерел небажаних сигналів у піроелектричних детекторах, які пов'язані, переважно, зі своїм оточенням – швидкою зміною навколишньої температури, електромагнітними перешкодами, механічними вібраціями. Оскільки всі піроелектрики є одночасно і п'єзоелектриками, то вібрації та акустичні дії генеруватимуть у них паразитні п'єзоелектричні сигнали. Величина цих сигналів значною мірою залежить від матеріалу піроелектрика, способу закріплення чутливого елемента, робочого зрізу піроелектричної пластинки. Ефективним способом зменшення п'єзосигналу, спричиненого акустичним впливом, є вакуумування піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Для боротьби з п'єзоелектричними перешкодами використовують різні компенсаційні методи, які засновані на обробці електричних сигналів від двох п'єзоелементів, один з яких є чутливий елемент піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Обидва елементи знаходяться по можливості в ідентичних механічних станах і електрично включені в протифазі так, що результуючий сигнал містить тільки значно подавлену п'єзоелектричну компоненту.

Для зменшення впливу різних джерел шумів ефективним є застосування різних алгоритмів оброблення вхідних сигналів піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Серед основних варто виділити наступні методи підвищення завадостійкості піроелектричних приймачів: диференціальний метод; метод частотної фільтрації; метод спектральної фільтрації;

двохдіапазонний метод; метод оптимальної просторово-частотної фільтрації; параметричні методи.

Розвиток електронних пристроїв на основі піроелектричних приймачів випромінювання йде головним чином у напрямі підвищення завадостійкості за рахунок удосконалення оптичних систем, алгоритмів обробки сигналів, широкого застосування методів цифрової обробки сигналів з використанням спеціалізованих мікроконтролерів та процесорів.

Інформаційні джерела

1. Поплавко Ю. М. П'єзоелектрики: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Ю. І. Якименко. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 328 с.

2. Мороз С.А., Ткачук А.А., Лишук В.В. Особливості використання піроелектричних приймачів випромінювання для електронних пристроїв технології Smart City. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» 20-22 жовтня 2022 р. С. 47-48.

3. Луньов С.В., Удовицька Ю.А., Хвищун М.В., Мороз С.А., Маслюк В.Т. Технологія одержання чутливого елемента для датчика інфрачервоного випромінювання. Перспективні технології та прилади". Збірник наукових праць. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. С. 77–81.

4. Moroz, S.A., Khvyshchun, M.V., Tkachuk, A.A., Lyshuk V.V., Prystupa, S.O. Investigation of Features of Functioning of the Pyroelectric Sensors in Electronic Security Devices. IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). Pp. 27-32.

5. Мороз С.А., Пташенчук В.В., Мелимука О.Я. Особливості застосування піроприймачів для електронних охоронних пристроїв. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції (29-30 жовтня 2020 р.): збірник тез. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 104 с. С.53-55

6. Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Хвищун М.В., Селепина Й.Р. Аналіз впливу інфрачервоного випромінювання на піроелектричний приймач. Актуальні проблеми фундаментальних наук: матеріали IV Міжнародної наукової конференції – (Луцьк-Світязь, 01-05 червня 2021 р.). Луцьк: Вежа-Друк, 2021. С. 85-87

Moroz S.A., Chalyy V.D., Lyshuk V.V., Tkachuk A.A., Goraychuk A.A.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE SENSITIVITY OF PYROELECTRIC HEAT RADIATION RECEIVERS IN MOTION TRANSMITTERS

The article analyzes one of the types of transmitters used in Smart City technologies. In particular, sensors based on pyroelectric receivers that register thermal radiation, in particular the radiation of the human body, are considered. It has been established that a number of characteristics are used to assess the efficiency of radiation receivers, the most important of which are sensitivity and sensitivity threshold. Mathematical relations are presented that describe the sensitivity of the receiver as a complex frequency characteristic that connects the reaction of the pyroelectric receiver and the influence on it in the form of a harmonic flow. The characteristics of the sensitivity threshold of the receiver and the formulas for determining this characteristic are presented. It was established that in order to determine the sensitivity threshold of pyroelectric thermal radiation receivers, it is necessary to know the noise level of its sensitive element. To derive the corresponding formulas, an equivalent circuit of a pyroelectric receiver is presented. Sources of noise of pyroelectric elements are established, in particular, thermal (Johnson) noise of the load resistance, thermal (Johnson) noise of the dielectric loss resistance of the sensitive element, noise EMF of the measuring circuit, single noise current of the measuring circuit, temperature noise of the sensitive element. The graphical dependence of the amount of noise from various sources for a typical detector with electrical and thermal time constants is given. Appropriate conclusions were drawn based on the results of the analysis.

Key words: pyroelectric receiver, thermal radiation, sensor, sensitivity, interference noise.

УДК 621.38

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-12

Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А., Ліневич Я.О.

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

АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК НА ПОВЕРХНІ БІО- ТА ШТУЧНИХ ПОЛІМЕРІВ ДЛЯ СЕНСОРІВ ВИГИНУ

Проаналізовано вплив різних типів полімерних підкладок – полііміду (PI), полівінілового спирту (ПВС), nanoцелюлози (НЦ), нанокомпозиту (НЦ-ПВС) на формування плівок Ni/Cr та електричні характеристики сенсорів вигину на їх основі для біомедичних застосувань. Для оцінки поверхневої морфології плівок Ni/Cr використано метод скануючої електронної мікроскопії (SEM), для їх хімічного аналізу використано метод енерго-дисперсійного рентгенівського аналізу (EDX-спектри). Здійснено вимірювання електричного опору плівок Ni/Cr в статистиці та зміну їх опору під час вигину великого пальця руки людини. Отримані результати свідчать про вплив виду підкладки на поверхневу морфологію плівок Ni/Cr, а також електричні характеристики сенсорів вигину на їх основі. Зокрема показано, що з точки зору величини сигналу та реверсивності сенсора вигину перспективним матеріалом підкладки є нанокомпозит НЦ-ПВС. Такі пристрої рекомендується використовувати як одноразові сенсори для носимої біорозкладної електроніки.

Ключові слова: сенсори вигину, nanoцелюлоза, полівініловий спирт, поліімід, скануюча електронна мікроскопія.

Постановка задачі. Тонкі металеві плівки, нанесені на поверхню біо- та штучних полімерів, виявляються надзвичайно ефективними у носимих сенсорах через їхню гнучкість та чутливість до деформації[1][2][3]. Використання цих плівок у сенсорах вигину має широкий спектр застосувань у різних галузях, що варіюються від медицини[4] до спорту[5], віртуальної реальності[6] та робототехніки[7].

У сенсорах вигину тонкі металеві плівки використовуються для вимірювання величини деформації (лінійного видовження[8]). Їх висока чутливість дозволяє точно визначати зміни форми поверхні та рухи об'єктів, з якими вони пов'язані. У медичних застосуваннях, наприклад, сенсори вигину можуть використовуватися для створення гнучких сенсорів, які відстежують рухи тіла або контролюють реабілітаційні процеси пацієнтів з різними захворюваннями. У спортивній галузі тонкі металеві плівки можуть бути використані у гнучких сенсорах для вимірювання рухів атлетів, оцінки їхньої техніки або навіть для аналізу рухів у віртуальних іграх та тренуваннях. Такі сенсори дозволяють отримати точну інформацію про динаміку рухів та використовуються для покращення тренувальних програм та підвищення ефективності спортивних вправ. Крім того, у робототехніці тонкі металеві плівки використовуються для створення гнучких сенсорів, які можуть реагувати на деформацію та кут вигину, допомагаючи роботам адаптуватися до зміни оточуючого середовища та виконувати завдання у різноманітних умовах. Таке використання тонких металевих плівок у сенсорах вигину підкреслює їхню важливість як ключового компонента у створенні гнучких, чутливих та універсальних сенсорних систем, які мають широкий спектр застосувань у сучасному світі.

Зазвичай, у гнучких сенсорах вигину для осадження металевих плівок як підкладки використовують штучні полімери, такі як: поліімід, поліетилен, полімолочна кислота, полістирол, полікапролактан [9-10]. Однак штучні полімери мають екологічні обмеження за рахунок погані біорозкладності та екологічного забруднення під час їх виготовлення. Сучасний напрямок у подоланні цих проблем полягає у використанні біополімерів [11]. Біополімери є матеріалами природного походження або виробленими з таких відновлюваних природних джерел, як: крохмаль, целюлоза [12], білки тощо. Вони відрізняються від штучних полімерів своєю високою біорозкладністю [13] та екологічною безпечністю. Прикладами біополімерів є полілактид [14], полігліколід [15], пластифікований крохмаль, nanoцелюлоза[16], тощо.

Проблематика, яка розкривається у даній роботі, полягає у вивченні впливу різних типів підкладок на процес формування, структурні та електричні властивості тонких металевих плівок, зокрема плівок нікелю. Порівняння між штучними та природними полімерами в контексті їх використання як підкладок для цих плівок є ключовим аспектом цього дослідження.

© **Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А., Ліневич Я.О.**

Зокрема, відмінності у поверхневій морфології штучних та природних полімерів можуть впливати на адгезію, структуру та механічні властивості утворених плівок нікелю. Відомо, що структура та хімічний склад металевих плівок, що осаджуються на поверхню різних типів полімерів, визначають електричні властивості утворених плівок. Вивчення цього питання для використання таких плівок в сенсорах вигину відкриває можливості для створення більш чутливих та стабільних сенсорних систем.

На сьогодні проведені окремі дослідження для металевих плівок, що осаджені на поверхню різних неорганічних матеріалів, зокрема кремнію [17], германію [18], GaAs [19]). Однак такі дослідження не були проведені для металевих плівок на поверхні біополімерів. Крім того, в наявних роботах використовуються наступні методи осадження металевих плівок: вакуумне осадження [20], хімічне осадження з розчинів [21], хімічне осадження з газової фази [22], електрохімічне осадження [23], що ускладнює порівняльний аналіз їх властивостей. У даній роботі досліджено процес формування тонких плівок нікелю, що осаджуються в одному технологічному циклі методом магнетронного розпилення на підкладках з біо- та штучних полімерів. Такий підхід дозволяє здійснювати аналіз впливу підкладок на утворення тонких металевих плівок без значного впливу інших технологічних факторів, що можуть бути присутні в різних методах осадження.

Мета, основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є вивчення впливу природи підкладок з біо- та штучних полімерів на поверхневу морфологію, хімічний склад та електричні властивості тонких металевих плівок для використання їх в сенсорах вигину. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання: 1) нанести тонкі плівки нікелю на різні види полімерних підкладок, використовуючи процес вакуумного осадження, забезпечуючи формування плівок високої якості; 2) здійснити аналіз поверхневої морфології та хімічного складу одержаних плівок на різних видах полімерних підкладок за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM знімки) та енерго-дисперсійного рентгенівського аналізу (EDX-спектри); 3) встановити зв'язок "вид полімерної підкладки – поверхнева морфологія/хімічний склад тонких плівок нікелю – електричні властивості тонких плівок нікелю" для використання їх в сенсорах вигину.

Синтез дослідних зразків та методи їх дослідження. Плівки нікелю товщиною 250 нм з адгезійним шаром хрому товщиною 30 нм осаджували на поверхню біо- та штучних полімерів за допомогою ВЧ магнетронного розпилення у вакуумі. Особливість процесу осадження полягала у використанні низької температури (50°C), оскільки біополімери, зокрема наноцелюлоза, проявляють низьку стійкість до високих температур. Детальний опис процесу осадження плівок нікелю та хрому наведено в нашій попередній роботі [24]. Використання методу ВЧ магнетронного розпилення дозволило точно контролювати товщину плівок та їхню однорідність на поверхні різних полімерів. Цей метод відкриває можливості для створення тонких шарів металів на різних матеріалах, враховуючи їхні особливості та вимоги до обробки за низьких температурах. В якості підкладок використовувались гнучкі плівки полівінілового спирту (ПВС), наноцелюлози (НЦ), композиту НЦ-ПВС, а також штучний полімер поліімиду марки П-МА. Нанодифібрильована целюлоза отримувалася з невисушеної органосольвентної целюлози із стебел очерету методом окиснення у середовищі реагенту 2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксиду (ТЕМПО) [16]. Розчин ПВС отримано шляхом розчинення 1 г гранул ПВС марки 17-99 в 100 мл деіонізованої води за температури 90°C протягом 30 хв. Розчин композиту був виготовлений з розчинів наноцелюлози та полівінілового спирту, змішаних у пропорції 1:1 по масі. Всі отримані рідкі суспензії виливали в чашу Петрі та сушили у термокамері за температури 60°C до утворення суцільної тонкої плівки. Плівки нікелю та хрому осаджувались на поверхню полімерів через маску прямокутної форми розмірами 10x2 мм.

Для дослідження поверхневої морфології та хімічного складу тонких металевих плівок на поверхні біо- та штучних полімерів використовували скануючий електронний мікроскоп РЕМ-10бу в режимі вторинних електронів та метод енерго-дисперсійного рентгенівського аналізу відповідно. Опір плівок вимірювався за допомогою омметра East Tester ET4401. Для аналізу м'язової активності людини сенсор кріпився на тіло за допомогою медичного клею БФ-6.

Дослідження поверхневої морфології металевих плівок на біо- та штучних полімерах. Поверхнева морфологія плівок нікелю має суттєві відмінності в процесі осадження на різні види полімерних підкладок, що видно з SEM знімків, наведених на рисунку 1.

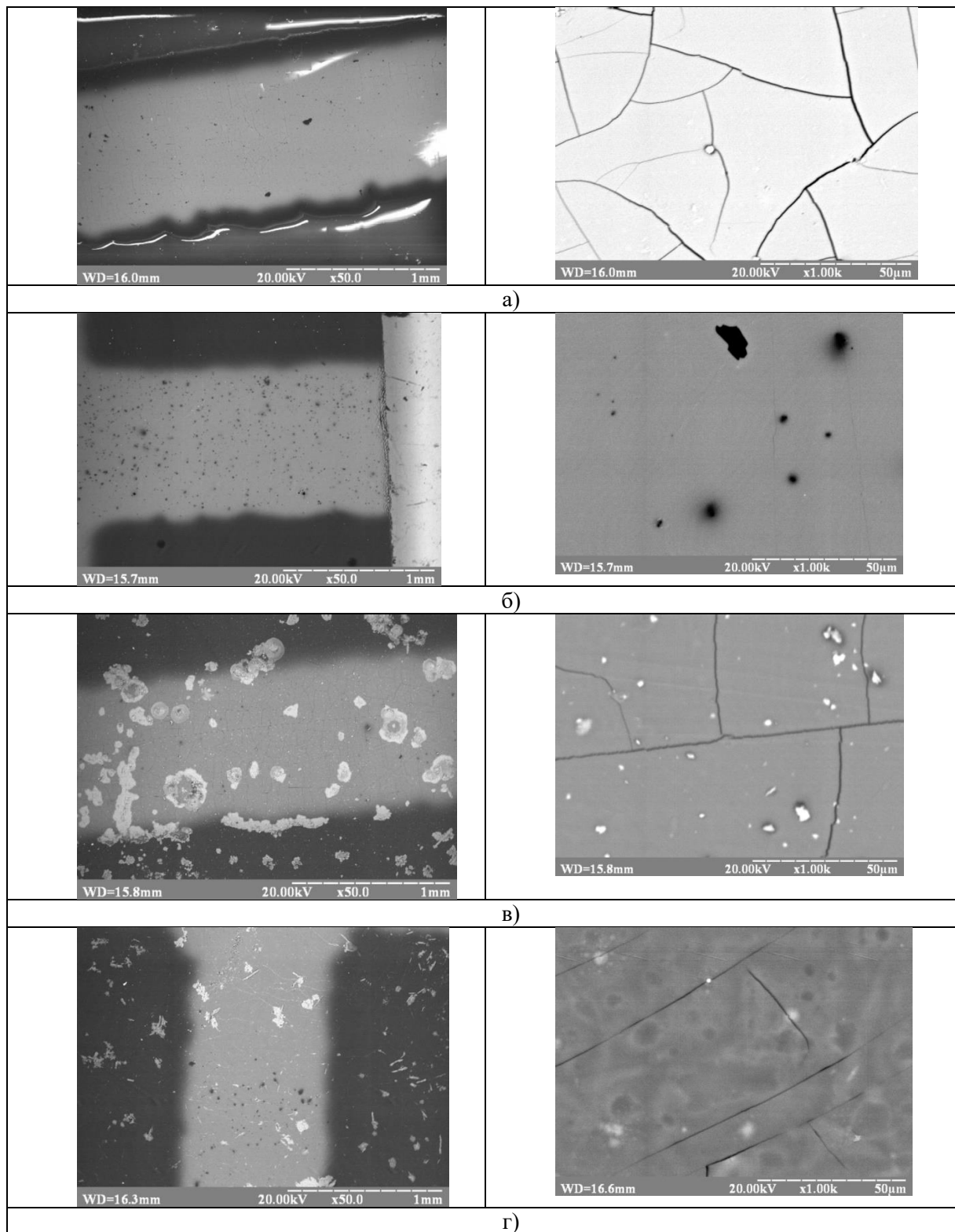


Рисунок 1 – СЕМ знімки тонких плівок Ni/Cr на поверхні різних видів підкладок: а) поліімід, б) ПВС, в) ПІ, г) ПІ-ПВС

Аналізуючи поверхневу морфологію металевої плівки при великому збільшенні, можна бачити наявність на її поверхні різноманітних структурних дефектів в залежності від виду полімерної підкладки (мікротріщини, мікроотвори, мікрозерна тощо). Зокрема у плівці Ni/Cr на поверхні ПІ спостерігається велика кількість мікротріщин розміром близько 1 мкм. Їх поява можлива через погану адгезію металевої плівки до поліімиду. Поверхня плівок на ПВС містить значно меншу кількість мікротріщин, які мають до того ж значно менший розмір. Однак в таких

плівках наявні мікроотвори розміром 50 мкм, причина утворення яких може полягати в наявності кавітаційних повітряних пустот в плівці ПВС. В той же час, плівки Ni/Cr на поверхні НЦ характеризуються наявністю мікротріщин розміром ~ 1 мкм та інших структурних неоднорідностей розміром 50-100 мкм, що пов'язані з розвинутою поверхневою морфологією НЦ (наявність в її складі нанофібрильованих і нанокристалічних целюлозних складових). Металева плівка на поверхні композиту НЦ-ПВС містить суміш структурних дефектів від ПВС (мікроотвори) та від НЦ (тріщини та структурні неоднорідності), однак в меншій кількості, аніж на поверхні чистих НЦ та ПВС.

Дослідження хімічного складу металевих плівок на біо- та штучних полімерах. Вміст хімічних елементів в дослідних зразках (якісний аналіз) показано на EDX-спектрах (рис.2). Як видно із наведених на рисунку 2 даних, всі плівки містять цільові хімічні елементи (нікель, хром) та домішки (кисень, залізо). Наявність на спектрах хрому обумовлена наявністю адгезійного підшару і проникненням електронного променя на певну глибину дослідного зразка. Наявність на спектрах нецільових домішок можна пов'язати або із забрудненнями під час процесу осадження (присутність залишків кисню у вакуумній камері, сліди заліза в мішені нікелю), або відгуком підкладки, що обумовлено проникненням електронного променя на певну глибину дослідного зразка. Крім того, спектри плівок на поверхні целюлозних біополімерів додатково містили домішки хлору, що пояснюється методом одержання наноцелюлози в середовищі ТЕМПО, в якому присутній розчин гіпохлориту натрію [16]. Тому очевидно, що відсутність даних домішок у складі плівок на поверхні нецелюлозовмісних підкладок свідчить про те, що відгук на хлор належить підкладам НЦ та НЦ-ПВС.

Таблиця 1 – Хімічний склад тонких плівок Ni/Cr на поверхні різних видів підкладок

PI			ПВС		
Хімічний елемент	Вміст, т, ваг.%	Вміст, ат.%	Хімічний елемент	Вміст, т, ваг.%	Вміст, ат.%
O	21,11	48,86	O	24,73	53,62
Ni	60,76	38,33	Ni	48,33	28,56
Cr	16,01	11,41	Cr	23,35	15,58
Fe	2,12	1,41	Fe	3,6	2,23
НЦ-ПВС			НЦ		
Хімічний елемент	Вміст, т, ваг.%	Вміст, ат.%	Хімічний елемент	Вміст, т, ваг.%	Вміст, ат.%
O	27,06	55,99	O	36,83	61,55
Ni	48,75	27,49	Ni	32,35	14,73
Cr	17,57	11,19	Cl	5,97	4,5
Cl	4,14	3,87	Cr	11,76	6,05
Fe	2,47	1,46	Na	10,07	11,72
			Fe	3,02	1,45

Кількісний аналіз EDX спектрів показав, що плівки переважно містили нікель (32 – 61 ваг%) та хром (12 – 23 ваг%) та в меншій мірі – сторонні домішки кисню (21 – 37ваг%), заліза (2 – 3,6 ваг%) і хлору (4 – 6 ваг%). Оскільки осадження плівок на різні види полімерних плівок здійснювалось в одному технологічному циклі, то присутність різної кількості сторонніх домішок у металевих плівках на різних підкладах обумовлена саме впливом різної хімічної природи полімерних підкладок.

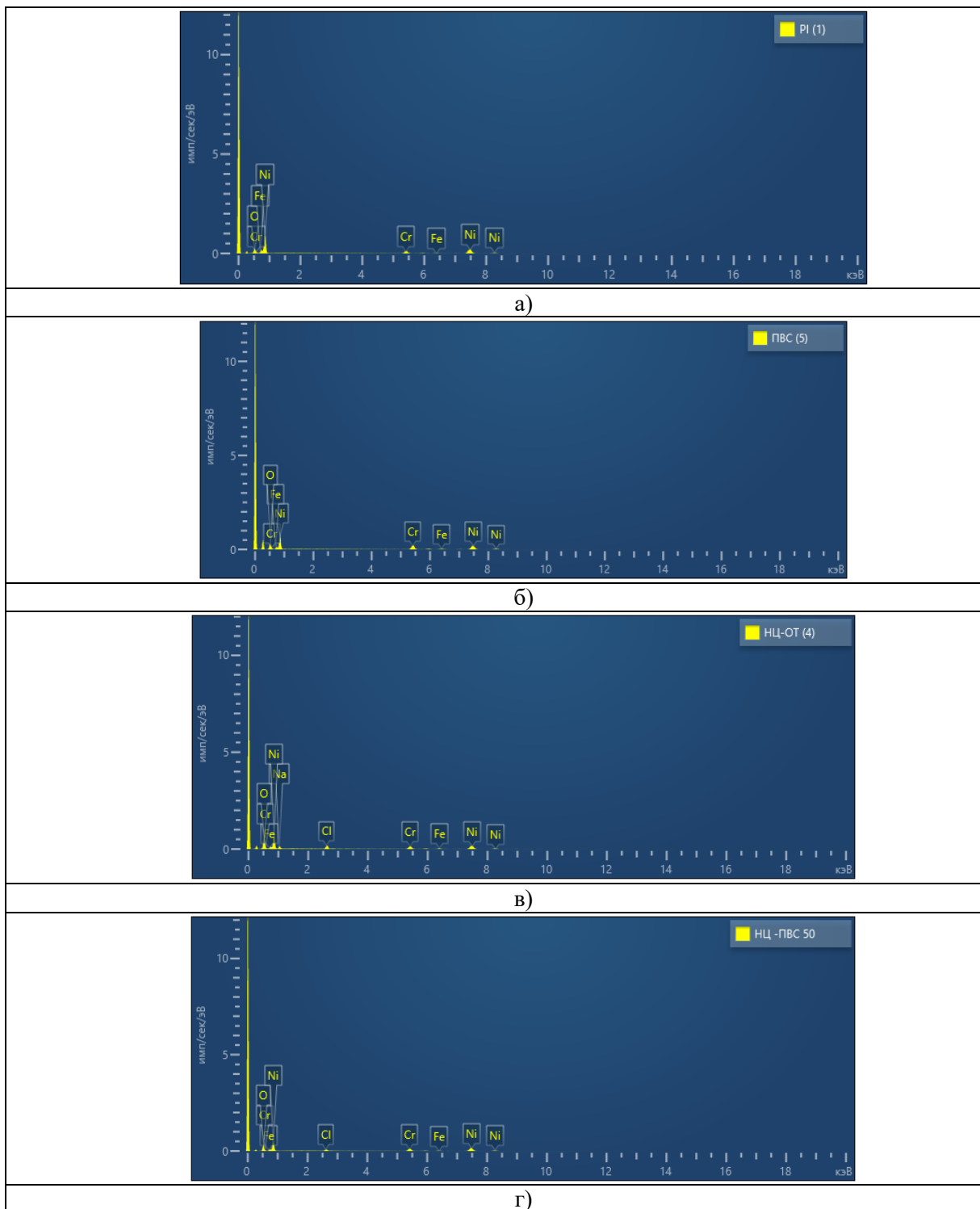


Рисунок 2 – Хімічний склад плівок Ni/Cr на поверхні різних видів полімерів: а) поліміду, б) ПВС, в) НЦ, г) НЦ-ПВС

Дослідження електричних властивостей металевих плівок на біо- та штучних полімерах для використання в сенсорах вигину. Електричний опір плівок нікелю, що осаджені в одному технологічному циклі на різні види полімерних підкладок, залежить від природи матеріалу підкладки (табл.2). Як видно із наведених даних, найменший опір спостерігався у плівок Ni на поверхні ПВС, що може пояснюватися відсутністю мікротріщин на СЕМ-знімках (рис. 1) та найменшою шорсткістю підкладки, як було встановлено у попередній роботі [25]. Значно більший опір спостерігався на плівках Ni, що осаджені на поліімідних підкладках, що пов'язано з наявністю мікротріщин у структурі плівок (рис. 1а) та вищою

шорсткістю, яка впливає на питомий опір. Максимальний опір спостерігався у плівках на поверхні наноцелюлози, що може бути пов'язано з її розвиненою поверхневою морфологією, що викликає появу як мікротріщин, так і структурних неоднорідностей (рис. 1в). Такі структурні дефекти створюють додаткові центри розсіювання носіїв заряду, що призводить до значного збільшення питомого опору металевої плівки. Додавання до складу НЦ домішок ПВС призвело до проміжного значення опору металевої плівки на поверхні такого композиту, що узгоджується з поверхневою морфологією на СЕМ-знімках (рис. 1г).

Таблиця 2 – Опір та с.к.з. шорсткості плівок Ni/Cr на поверхні різних видів полімерних підкладок

Підкладка	Опір, Ом	с.к.з. шорсткості підкладки, нм	с.к.з. шорсткості металевої плівки, нм
ПВС	167	30	28
PI	467	38	58
НЦ-ПВС	631	90	104
НЦ	739	98	144

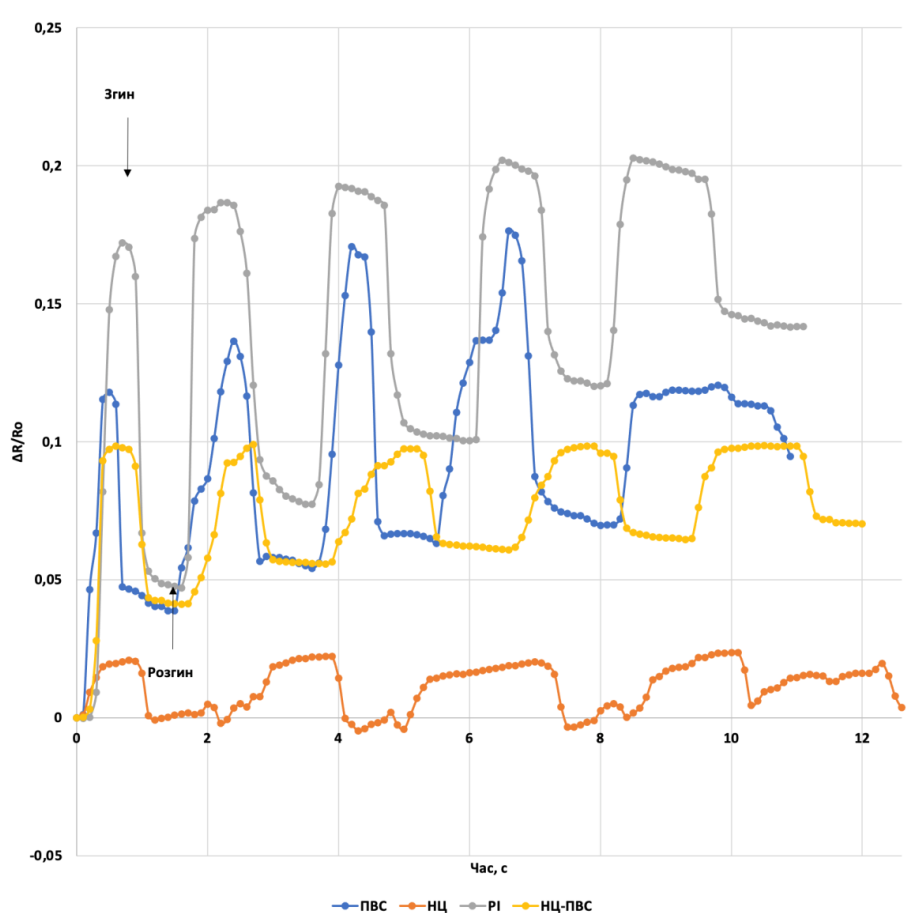


Рисунок 3 – Аналіз м'язової активності великого пальця людини за допомогою отриманих сенсорів

Графіки на рисунку 3 відображають зміни опорів сенсорів під час циклічного згину-розгину великого пальця. Усі сенсори реагують на м'язову активність пальця, однак спостерігаються відмінності у величині сигналу та реверсивності, залежно від типу підкладки. Встановлено взаємозв'язок між опором металевих плівок та їх чутливістю: чим менший опір, тим більша чутливість. При цьому максимальна чутливість сенсорів спостерігається для підкладок PI та ПВС, а серед біополімерів найбільший сигнал сенсора має місце для композиту НЦ-ПВС. Проте щодо реверсивності (здатності сигналу повертатися до вихідного значення опорів в кожному циклі згину-розгину), найгірші показники спостерігаються на підкладці з PI, а на підкладках з ПВС відбувається спотворення сигналу (поява бічного максимуму). Найкращу реверсивність

демонструють сенсори на підкладках з біополімерів. Таким чином, композит НЦ-ПВС є оптимальним матеріалом підкладки, оскільки сенсори, виготовлені на його основі, мають достатню чутливість та відмінну реверсивність. Зокрема такі сенсори можуть використовуватись для розпізнавання окремих символів та слів на письмі (рис. 4). Для цього сенсор був закріплений на великому пальці і людина прописувала спершу окремі літери "О", "І", "Х", а потім слово "ОІХ". З наведених на рисунку 4 графіків видно, що під час написання літери "О" амплітуда сигналу була меншою, а тривалість сигналу більшою, на відміну від написання літери "І". В той же час, написання літери "Х" супроводжується подвійним піком у відгуку сенсора. Такі особливості зміни сигналу сенсора під час письма дають змогу розпізнати на письмі слово "ОІХ".

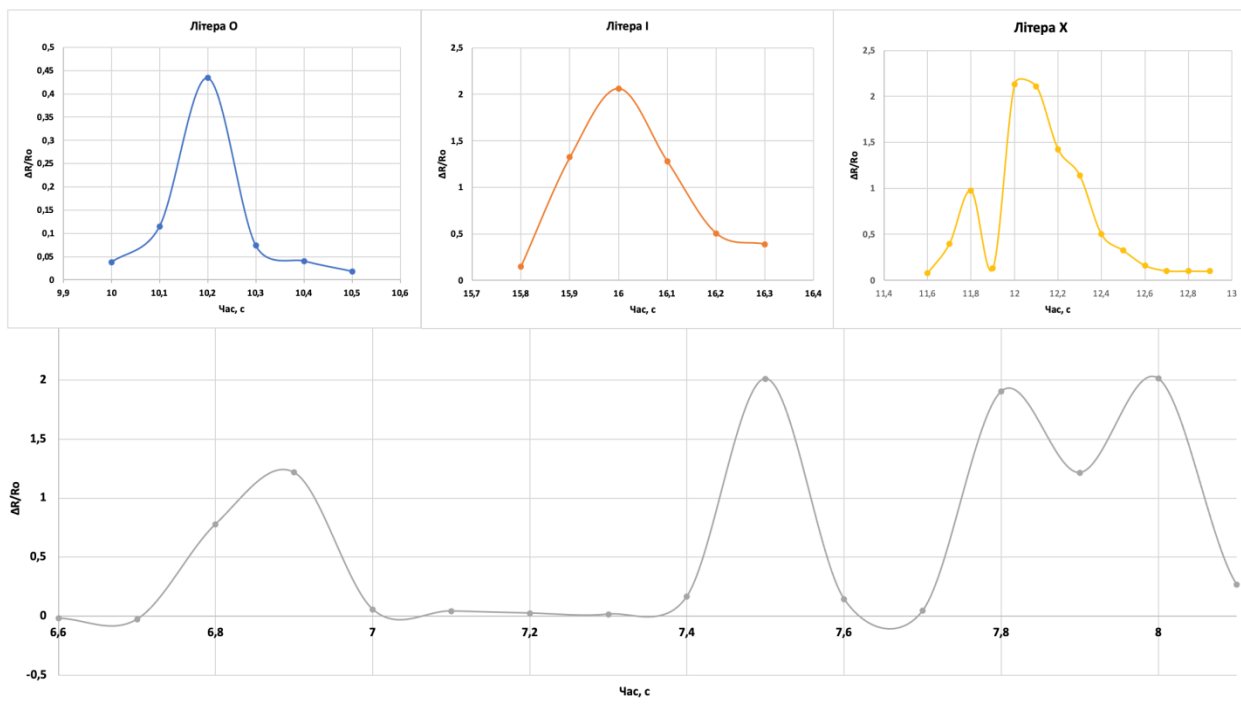


Рисунок 4 – Розпізнавання літер та слів на письмі за допомогою отриманих сенсорів

Висновки. В роботі осаджено тонкі плівки нікелю/хрому на поверхню біо- та штучних полімерів і досліджено їх поверхневу морфологію, хімічний склад та електричні властивості в залежності від виду підкладки. Отримані результати за допомогою СЕМ та EDX надали важливі відомості про формування тонких металевих плівок на поверхні полімерів, що є ключовим для подальшого розуміння їхніх електричних властивостей та потенційного використання у створенні сенсорів вигину. Показано, що з точки зору чутливості та реверсивності перспективним матеріалом підкладки є композит НЦ-ПВС, який здатний самочинно розкладатись у природі. Показано придатність таких сенсорів вигину до розпізнавання окремих символів та слів на письмі. Напрямок подальших досліджень є розробка оптимальної геометричної конфігурації чутливого елемента сенсора.

Інформаційні джерела

1. Zhou, Z., Zhang, H., Liu, J., & Huang, W. (2021). Flexible electronics from intrinsically soft materials. *Giant*, 6, 100051. <https://doi.org/10.1016/J.GIANT.2021.100051>
2. Лапшуда В.А., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А., Яценко О.В., Панченко С.А., Якименко О.С. (2023). Гнучкі сенсори вологості на основі плівок наноцелюлози для біомедичного застосування. *Перспективні Технології та Прилади*, 22, 81–90. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-12>
3. Naidonov, A., & Koval, V. (2022). Sensors based on nanocellulose for biodegradable, flexible, disposable and wearable electronics. *KPI Science News*, 1–2, 26–41. <https://doi.org/10.20535/KPISN.2022.1-2.262072>
4. Lin, H., Yuan, W., Shao, H., Zhao, C., Zhang, W., Ma, S., Li, Y., & Song, S. (2024). Muscle-inspired anisotropic hydrogel strain sensors with ultra-strong mechanical properties and improved

- sensing capabilities for human motion detection and Morse code transmission. *European Polymer Journal*, 202, 112642. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2023.112642>
5. Найдьонов А. О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А. (2022). Одноразові носимі сенсори на основі наноцелюлози для біомедичних застосувань. *Мікросистеми, Електроніка Та Акустика*, 27(3), 264043-1-264043–264048. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.МЕА.264043>
6. Lee, K. T., Chee, P. S., Lim, E. H., & Kam, Y. H. (2023). Development of flexible glove sensors for virtual reality (VR) applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.423>
7. Yong, S., Chapman, J., & Aw, K. (2022). Soft and flexible large-strain piezoresistive sensors: On implementing proprioception, object classification and curvature estimation systems in adaptive, human-like robot hands. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113609. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2022.113609>
8. Naidonov, A., Koval, V., Barbash, V., Dusheiko, M., Yashchenko, O., & Yakymenko, O. (2022). Nanocellulose-Based Biodegradable Bend Sensors. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 - Proceedings*, 292–297. <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927070>
9. Li, Q., Luo, S., Wang, Y., & Wang, Q. M. (2019). Carbon based polyimide nanocomposites thin film strain sensors fabricated by ink-jet printing method. *Sensors and Actuators A: Physical*, 300, 111664. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2019.111664>
10. Cai, J., He, Y., Zhou, Y., Yu, H., Luo, B., & Liu, M. (2022). Polyethylene glycol grafted chitin nanocrystals enhanced, stretchable, freezing-tolerant ionic conductive organohydrogel for strain sensors. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 155, 106813. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2022.106813>
11. Datki, Z., Darula, Z., Vedelek, V., Hunyadi-Gulyas, E., Dingmann, B. J., Vedelek, B., Kalman, J., Urban, P., Gyenesei, A., Galik-Olah, Z., Galik, B., & Sinka, R. (2023). Biofilm formation initiating rotifer-specific biopolymer and its predicted components. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127157. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127157>
12. Pang, Y., Luan, X., Shen, W., Zhu, B., Wang, L., Zhang, K., Cao, H., Xie, C., & Pang, J. (2023). Tough conductive cellulose organohydrogels with antifreezing capability, strain-sensitivity and for multi-functional sensors. *Industrial Crops and Products*, 204, 117320. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.117320>
13. Lapshuda, V., Koval, V., Barbash, V., Dusheiko, M., Yashchenko, O., & Yakymenko, O. (2023). Nanocellulose-Based Composites for Flexible and Biodegradable Humidity Sensors for Breath Monitoring. *IEEE Sensors Letters*, 7(10). <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2023.3311669>
14. Hernandez, J. A., Maynard, C., Gonzalez, D., Viz, M., O'Brien, C., Garcia, J., Newell, B., & Tallman, T. N. (2022). The development and characterization of carbon nanofiber/poly(lactic acid) filament for additively manufactured piezoresistive sensors. *Additive Manufacturing*, 58, 102948. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.102948>
15. Koh, L. M., & Khor, S. M. (2022). Current state and future prospects of sensors for evaluating polymer biodegradability and sensors made from biodegradable polymers: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1217, 339989. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.339989>
16. Barbash, V. A., Yashchenko, O. v., Gondovska, A. S., & Deykun, I. M. (2022). Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 12(4), 835–848. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z>
17. Qiu, J., Li, X., Ge, R., & Liu, C. (2022). Surface formation, morphology, integrity and wire marks in diamond wire slicing of mono-crystalline silicon in the photovoltaic industry. *Wear*, 488–489, 204186. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.204186>
18. Zhang, G., Huo, Z., Han, J., Zhang, W., & Zheng, J. (2023). Cutting depth-oriented surface morphology control in diamond-turning brittle single-crystal germanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 319, 118076. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2023.118076>
19. Tomasulo, S., Stevens, M. A., Nolde, J. A., Kotulak, N. A., & Yakes, M. K. (2022). Morphological characterization of GaAs islands grown on InGaAs by droplet epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 595, 126803. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2022.126803>
20. Swiontek, S. E., & Lakhtakia, A. (2015). Vacuum-metal-deposition and columnar-thin-film techniques implemented in the same apparatus. *Materials Letters*, 142, 291–293. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2014.12.038>

21. Shongalova, A., Aitzhanov, M., Zhantuarov, S., Urazov, K., Fernandes, P., Tokmoldin, N., & Correia, M. R. (2020). Comparison of antimony selenide thin films obtained by electrochemical deposition and selenization of a metal precursor. *Materials Today: Proceedings*, 25, 77–82. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.11.291>

22. Su, P., Zheng, G., Zhang, H., Sun, Y., Zuo, R., & Liu, L. (2024). A CFD study of the gas reaction path in growth of InN films in metal–organic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 626, 127464. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2023.127464>

23. Yao, K. M., Xu, M., Huang, X. Z., Mo, D. C., & Lyu, S. S. (2023). Electrochemical deposition of copper films to develop the latent sebaceous fingerprints on metal substrates. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 941, 117526. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2023.117526>

24. Koval, V., Barbash, V., Dusheyko, M., Lapshuda, V., Yashchenko, O., & Naidonov, A. (2021). Nickel-based Piezoresistive Sensors Obtained on Flexible Nanocellulose Substrate. *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties”, NAP 2021*. <https://doi.org/10.1109/NAP51885.2021.9568610>

25. Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А. (2023). Вплив матеріалу підкладки на характеристики сенсорів вигину для носимої електроніки. *Перспективні Технології Та Прилади*, 22. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-15>

Naidonov A.O., Koval V.M., Dusheiko M.G., Barbash V.A., Linevych Y. O.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE FORMATION OF THIN METAL FILMS ON THE SURFACE OF BIO-AND ARTIFICIAL POLYMERS FOR BENDING SENSORS

The influence of different types of polymeric substrates - polyimide (PI), polyvinyl alcohol (PVA), nanocellulose (NC), nanocomposite (NC-PVA) - on the formation of Ni/Cr films and the electrical characteristics of bending sensors based on them for biomedical applications is analyzed. The scanning electron microscopy (SEM) method was used to evaluate the surface morphology of Ni/Cr films, and the energy dispersive X-ray analysis (EDX spectra) was used for their chemical analysis. The electrical resistance of Ni/Cr films in static conditions and the change in their resistance during the bending of the human thumb were measured. Obtained results indicate the influence of the type of substrate on the surface morphology of Ni/Cr films, as well as the electrical characteristics of bending sensors based on them. In particular, it is shown that, in terms of signal value and reversibility of bend sensors, the NC-PVA nanocomposite is a promising substrate material. Such devices are recommended to be used as disposable sensors for wearable biodegradable electronics.

Keywords: *bending sensors, nanocellulose, polyvinyl alcohol, polyimide, scanning electron microscopy*

УДК 621.822.681.2:369.64

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-13

Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г.

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

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ

В роботі розглянуто оптимальну конструкцію оптоелектронного сенсора. Він характеризується здатністю вимірювати переміщення в міліметровому діапазоні з субмікрометричною роздільною здатністю. Сенсор складається з трикутної відбивної решітки і двох волоконно-оптичних зондів. Наведено принцип вимірювання сенсора. Конструкцію трикутної решітки сенсора було математично оптимізовано з урахуванням кута кроку решітки для підвищення роздільної здатності сенсора. Метод оптимізації виявив глобальний оптимум, при якому досягається найвища роздільна здатність.

Ключові слова: оптоелектронний сенсор, оптимізація, чутливість, роздільна здатність, волоконно-оптичний зонд, переміщення.

Постановка проблеми. Пристрої на основі високоточних малопотужних оптоелектронних систем були одним із головних предметів досліджень в останні роки. Розробка оптоелектронних сенсорів з високою чутливістю, великим динамічним діапазоном і низькою потужністю розсіювання домінує в дослідницькій галузі для різних комерційних застосувань, включаючи транспорт, біомедицину, космос, авіоніку та моніторинг навколишнього середовища. Використання математичних моделей у поєднанні з експериментальними дослідженнями та технічними розробками може значно покращити ефективність та надійність оптоелектронних сенсорів, забезпечити прогнозування можливих відмов та планування їхнього технічного обслуговування. Це дозволяє попереджувати непередбачені ситуації та знижувати час простою системи.

Завдання, аналіз літературних джерел та одержані результати роботи. Метою дослідження є дослідження математичних моделей і оптимізації оптоелектронних сенсорів.

Оптичні сенсори переміщення високої роздільної здатності на основі інтерферометрів Фабрі–Перо отримали широке застосування в оптоелектронних пристроях завдяки високій точності переміщення та стійкості до електромагнітних перешкод [1]. Дослідження, проведене Chung-Ping Chang [2] модифікує конструкцію традиційного інтерферометра Фабрі–Перо, що дозволило досягти діапазону вимірювання 100 мм із збільшенням оптичної роздільної здатності до чверті довжини хвилі. Іншим прикладом є широкодіапазонний тривісний ґратчастий кодер, розроблений Jie Lin [3]. Цей сенсор може одночасно вимірювати поступальні рухи осей x , y та z . Ґратчастий кодер складається з планарної масштабної решітки відбивного типу з періодом 8 мкм і оптичної головки для зчитування. Для більшої компактності ґратчастого кодера впроваджено подвійний ґратковий світлодіодний блок і два дифракційних оптичних елемента. Експериментальні результати показали роздільну здатність 4 нм для осьового зміщення осі z .

Акіхіде Кімура та ін. [4] описав тривісний поверхневий кодер, що складається з планарної решітки та оптичної сенсорної головки. Він був розроблений і виготовлений для субнанометричного вимірювання зміщення вздовж осей x , y і z . Головка оптичного сенсора мала розміри 50 мм (X) \times 70 мм (Y) \times 40 мм (Z), а роздільна здатність сенсора була кращою за 1 нм у всіх трьох осях.

Також було проведено кілька досліджень на основі інших оптичних технологій для вимірювання лінійних переміщень. Високоєфективний оптичний сенсор був створений A. Missoffe та ін. [5]. Компактна вимірювальна система складається з лазерного діодного модуля разом із фотодіодною матрицею. Ця система характеризується нечутливістю до великих механічних дефектів. Результати експерименту показали, що сенсор може досягати нанометричної роздільної здатності в сантиметровому діапазоні.

На продуктивність волоконно-оптичного сенсора переміщення впливають його геометричні параметри, такі як апертура волокна, радіус серцевини волокна, поперечне розділення передавального та приймального волокон, кут між двома волокнами та радіус відбивача. Було помічено, що для кращої чутливості сенсора має бути мінімальна відстань між передавальним і приймальним волокнами.

Для бездротових сенсорних мереж, де кілька викликів включають потенційно суперечливі цілі, задоволення однієї цілі призводить до погіршення продуктивності іншої (якщо ми зосередимося на збільшенні терміну служби мережі, затримка також може збільшитися, що небажано). Таким чином, багатоцільові методи оптимізації застосовуються для вирішення цієї проблеми з використанням натхненних природою метаевристичних алгоритмів [6]. Цей метод залишається більш складним у порівнянні з методом оптимізації, застосованим до сенсора в цьому дослідженні. Для оптимізації роботи сенсора було адаптовано середовище програмування Python, і аналітична модель змогла знайти оптимальні геометричні параметри кантилевера для фотоакустичного зондування з ємнісною трансдукцією. Ми бачимо, що геометричні параметри можуть змінювати продуктивність сенсора, що подібно до методу оптимізації, застосованого в цьому дослідженні.

Сенсор складається з двох волоконно-оптичних зондів, пов'язаних із поверхнею з високим ступенем відбивання. Кожен зонд має одне центральне емісійне волокно та чотири приймальні волокна, розміщені навколо емісійного волокна. Ефективність сенсора, коли він пов'язаний з плоскою поверхнею, вже була проаналізована [7]. У класичній конфігурації емісійне волокно, розміщене в центрі, випромінює світло на плоску відбиваючу поверхню. Світло, відбите поверхнею, вводиться в приймальні волокна та спрямовується на PIN-фотодіод. Вихідна напруга сенсора є функцією переміщення дзеркала (рис. 1).

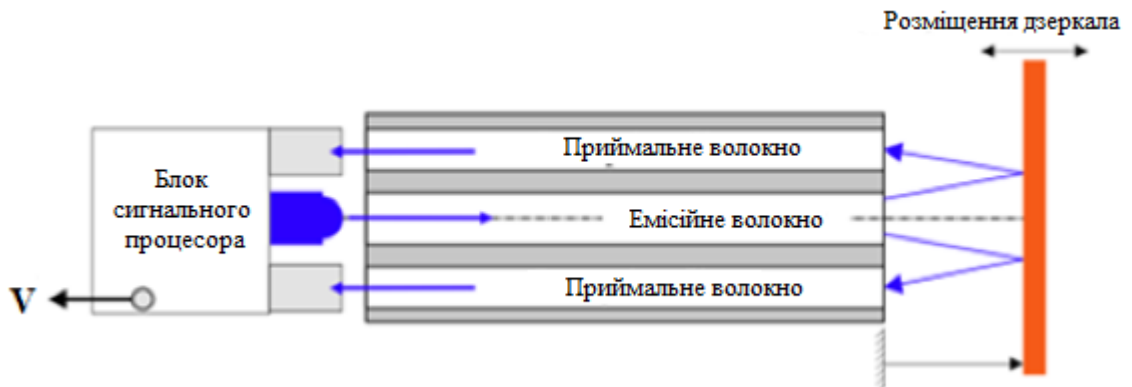


Рисунок 1 – Оптоелектронний сенсор

Коли плоске дзеркало переміщується перпендикулярно до осі зонда, крива відгуку сенсора виглядає так, як показано на рисунку 2.

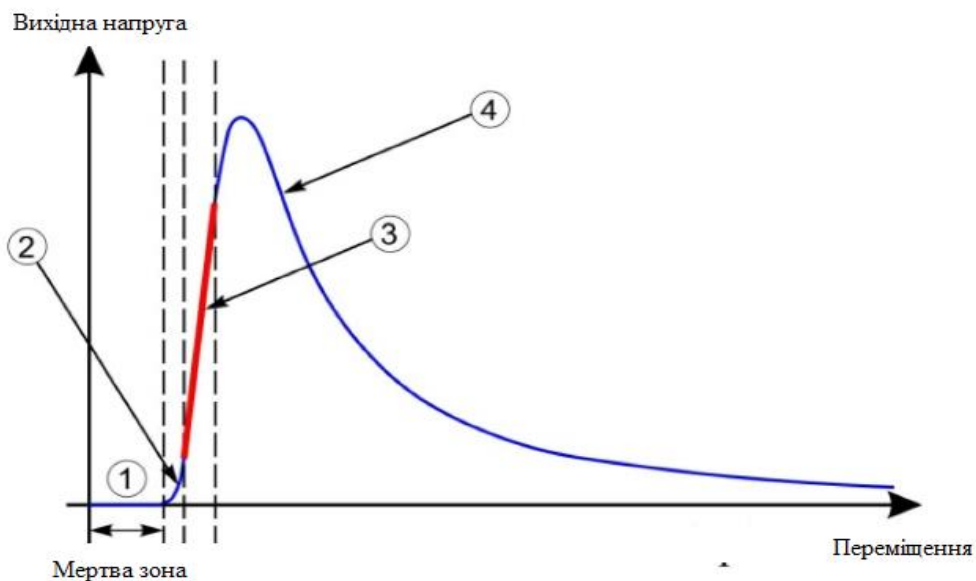


Рисунок 2 – Крива відгуку сенсора

Як видно на рисунку 2, крива реакції сенсора складається з чотирьох зон [8]. Перша зона - це мертва зона, де приймальні волокна не можуть збирати відбите світло через простір між випромінювальним і приймальним волокнами. Зони 2 і 4 демонструють сильну нелінійність із поганою роздільною здатністю. Зона 3, з іншого боку, є найцікавішою робочою зоною завдяки

своїй високій чутливості та лінійності. Продуктивність сенсора характеризується його чутливістю і роздільною здатністю в робочій зоні. Чутливість (S) розраховується як функція зміни вихідної напруги (ΔV) і зміщення в лінійній зоні (Δd):

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta d} \quad (1)$$

Роздільна здатність (R) виводиться з чутливості (S) і середньоквадратичного шуму сенсора (N_{RMS}):

$$R = \frac{N_{RMS}}{S} \quad (2)$$

Тим не менш, зона 3 має малий лінійний діапазон вимірювань (<200), який не підходить для довгих ходів у промислових застосуваннях.

Для збільшення діапазону вимірювання лінійної зони напрямок переміщення плоского дзеркала може відрізнятись від нормальної векторної орієнтації його поверхні. Це призводить до множення значення номінального діапазону на коефіцієнт $(\sin \epsilon)^{-1}$, де ϵ кут нахилу відносно осі решітки [9], як показано на рис. 3. В результаті волоконно-оптичний зонд зміщується вбік до плоского дзеркала.

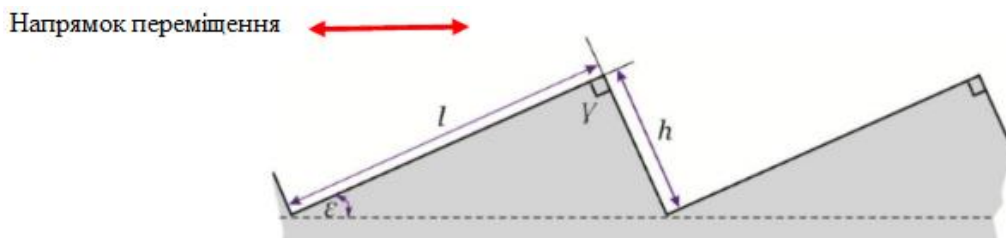


Рисунок 3 – Конфігурація похилого дзеркала

Таким чином, роздільна здатність сенсора з цією конфігурацією похилого дзеркала збільшується як функція кута ϵ згідно з рівнянням:

$$R_\epsilon = \frac{R}{\sin \epsilon} \quad (3)$$

де:

- R - роздільна здатність сенсора в класичному випадку;
- R_ϵ : відповідна роздільна здатність у конфігурації похилого дзеркала.

Як видно з рівняння 3, найвища роздільна здатність (тобто несприятлива роздільна здатність) досягається при малих значеннях кута ϵ , тоді як при більших значеннях ϵ роздільна здатність покращується. Для збільшення діапазону вимірювань до декількох міліметрів було продубльовано конфігурацію похилого дзеркала, в результаті чого вийшла решітка з плоских дзеркал.

У випадку решітки з плоских дзеркал необхідні два волоконно-оптичні зонди, щоб уникнути втрати вимірювання через перехід між двома послідовними кроками, і це забезпечує безперервне вимірювання зміщення на великій відстані шляхом почергового перемикавання між зондами. Іншими словами, слід уникати нелінійної зони на кривій відгуку сенсора. Для забезпечення корисного та правильного вимірювання в цій лінійній зоні використовуються два волоконно-оптичні зонди. Коли перший з них потрапляє в нелінійну зону, вимірювання перемикається на наступний зонд. Відзначається, що рух дзеркала щодо зонда може бути як вліво, так і вправо.

Геометричну модель було розроблено для вимірювання геометричних параметрів решітки та для моделювання роботи сенсора переміщення на великій відстані. Ця модель приймає як вхідні дані геометричні розміри кожного волокна та кожного кроку решітки. Ця модель дає на виході відповідну продуктивність сенсора. Ці характеристики включають роздільну здатність сенсора та відстань перекриття, необхідну для легкого перемикавання між двома волоконно-оптичними зондами.

У цій моделі враховано дві умови:

1. Відстань між зондом і сходиною решітки має бути в лінійній зоні (зона 3 на рис. 2).

© Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г.

2. Відстань перекриття, необхідна для перемикання між двома послідовними сигналами волоконно-оптичних зондів, щоб уникнути розриву лінійного вимірювання під час крокового переходу, залежить від швидкості вимірюваного зміщення. Зазвичай вважається, що він становить від 10 до 30 мкм.

Параметри в геометричній моделі плоскої решітки показані на рисунку 4.

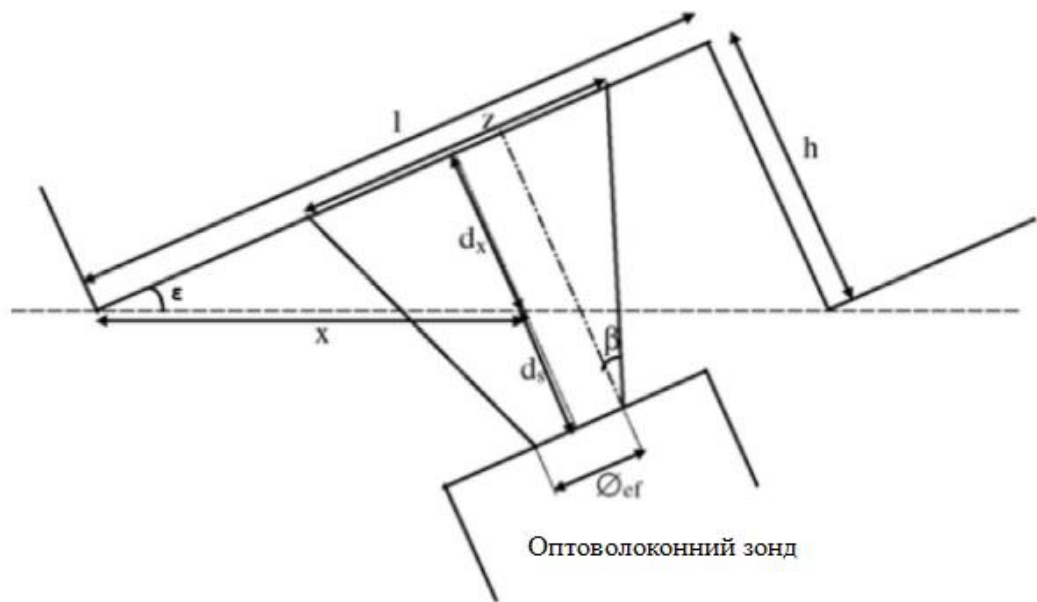


Рисунок 4 – Параметри в геометричній моделі плоскої решітки

Геометрична модель розраховує відстань (d) між зондом і ґраткою на додаток до відстані перекриття, необхідної для перебування в лінійній зоні та перемикання між двома зондами. Відстань (d), яка знаходиться між головкою зонда та ґраткою, буде локалізована в лінійній зоні сенсора, а перекриття має відповідне значення між 10 мкм і 30 мкм.

На рисунку 5 показано ілюстративний приклад експериментальної перевірки принципу сенсора цього прототипу. Як показано нижче, використовуються два волоконно-оптичні зонди, щоб залишатися в лінійній зоні сенсора.

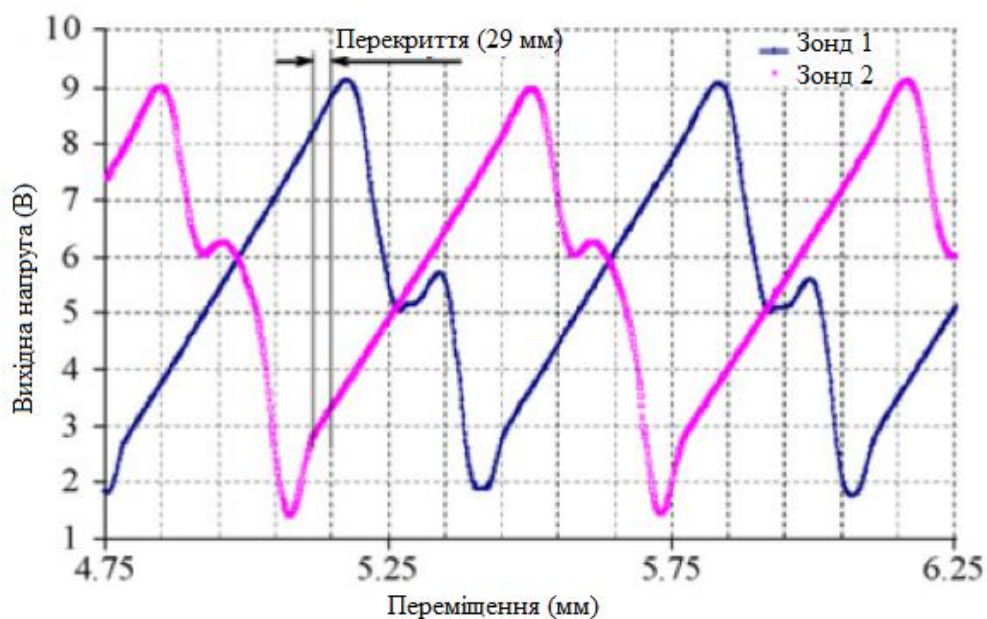


Рисунок 5 – Експериментальна перевірка принципу роботи сенсора

Для покращення роботи сенсора запропоновано метод оптимізації. Його метою є покращення найвищої роздільної здатності сенсора (невідповідної роздільної здатності) шляхом зменшення відповідного значення. Цього можна досягти за допомогою геометричних параметрів, зокрема кута ϵ .

Основна мета цієї розробки полягає у визначенні оптимальних розмірів планарної решітки сенсора, що може покращити його роздільну здатність; фізична модель сенсора ще не реалізована, а результати базуються на програмі, яка використовувалася раніше, де принцип сенсора був перевірений. На рисунку 6 показана класична калібрувальна крива оптикоелектронного сенсора для переміщення 300 мкм, яка розглядається в цьому дослідженні [9]. Помічено, що збільшення діапазону вимірювання призводить до зменшення чутливості сенсора, як показано на рисунку 7, який показує миттєву чутливість як функцію переміщення сенсору. Очевидно, що чутливість досягає свого максимального значення в точці перегину кривої, яка знаходиться при зміщенні 186 мкм і має максимальну чутливість 44,28 мВ/мкм. Однак поблизу точки перегину чутливість зменшується зі збільшенням діапазону вимірювань.

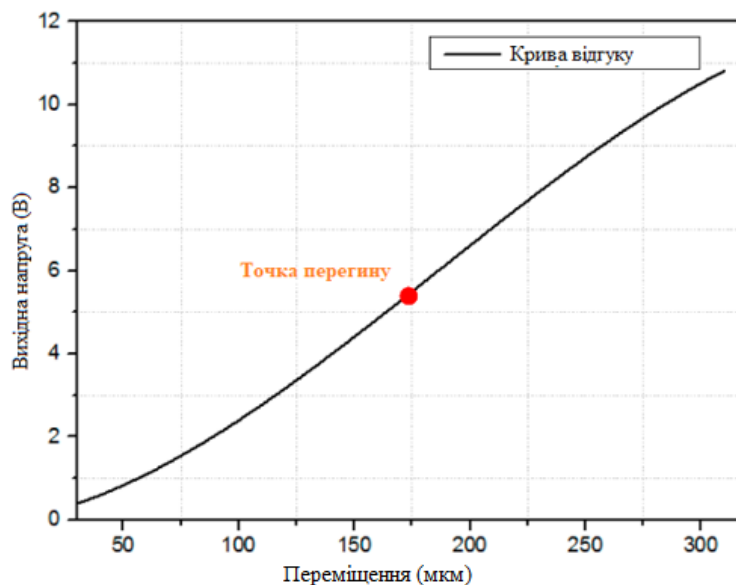


Рисунок 6 – Класична калібрувальна крива оптикоелектронного сенсора для переміщення 300 мкм

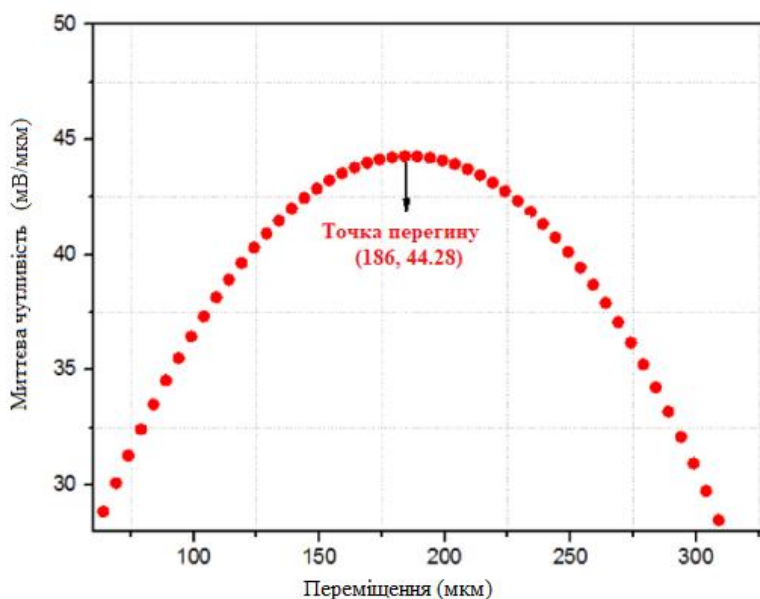


Рисунок 7 – Миттєва чутливість як функція зміщення

Підхід, застосований для досягнення оптимальної продуктивності сенсора, полягав у розподілі кількох зон навколо точки перегину кривої реакції сенсора, де кожна зона має додаткову довжину на 20 мкм порівняно з попередньою: (довжина 80 мкм для зони 1, 100 мкм для зони 2, 120 мкм для зони 3... тощо). Аналіз визначив зону, для якої роздільна здатність сенсора є оптимальною. Для загального аналізу було взято шість зон навколо точки перегину, чого було достатньо для визначення оптимальної роздільної здатності сенсора.

У кожній зоні розраховувалися чутливість, діапазон вимірювань і роздільна здатність як в осьовій, так і в поперечній конфігураціях. Що стосується осьової конфігурації сенсора, аналіз розглядав найбільш невідповідну чутливість діапазону вимірювання в кожній зоні (чутливість на краю діапазону вимірювання), з якої було виведено максимальну осьову роздільну здатність. Ці значення чутливості та роздільної здатності були враховані в цьому дослідженні з метою оптимізації роздільної здатності сенсора в найгіршому випадку.

Що стосується бічної конфігурації, аналіз виявив максимальний кут нахилу (ϵ_{\max}) у діапазоні вимірювань кожної досліджуваної зони для оптимізації роздільної здатності сенсора, оскільки найкраща роздільна здатність досягається при високому значенні кута ϵ . Для цього, а також для того, щоб отримати максимально можливий кут, необхідно було зафіксувати малий критерій перекриття, тому що при малому перекритті кут ϵ великий. Для цього дослідження в кожній зоні було взято перекриття 10 мкм, оскільки це було мінімально достатнє перекриття, що забезпечує високе значення кута ϵ .

Беручи до уваги аналіз, проведений для зони 1, яка має довжину 80 мкм навколо точки перегину (ця зона починається з 146 мкм і закінчується на 226 мкм), осьовий діапазон вимірювання становить 67,5 мкм (починаючи з 158,52 мкм і закінчуючи на 226 мкм), в якому були визначені мінімальна осьова чутливість і максимальна роздільна здатність ($S_{\text{аксіальний min}} = 42,59$ мВ/мкм, $R_{\text{аксіальний max}} = 7,04$ нм) і знайдено максимальний кут нахилу ($\epsilon_{\max} = 5,54^\circ$).

Висновки. Геометричний дизайн оптоелектронного сенсора покращено щодо його чутливості, роздільної здатності та діапазону вимірювань. У цій статті генерується глобальний оптимум між чутливістю та роздільною здатністю сенсора, що, як наслідок, покращує його загальну продуктивність. Цей глобальний оптимум з боку підвищив чутливість і роздільну здатність, навіть якщо аксіальна продуктивність була в несприятливому випадку; це було здійснено за допомогою кута ϵ , який було обрано максимальним значенням. Наступний підхід довів свою справедливість, оскільки чутливість сенсора зросла до 4,28 мВ/мкм, незважаючи на розширення діапазону вимірювань. Однак можна було б досягти вищих значень чутливості, якби аксіальні характеристики були кращими. З іншого боку, відповідний критерій перекриття слід розглядати як функцію швидкості вимірювальної системи та частоти дискретизації. Геометричні параметри сенсора в його оптимальній зоні будуть розглянуті для майбутнього виготовлення решітки, щоб експериментально підтвердити цей глобальний оптимум. За допомогою сенсора, згаданого в цьому дослідженні, з точки зору роздільної здатності та діапазону вимірювань, можна побачити, що навіть у найгіршому випадку межа роздільної здатності є нанометричною

Інформаційні джерела

- [1] Kim, Y.-S.; Dagalakis, N.G.; Choi, Y.-M. Optical fiber Fabry-Pérot micro-displacement sensor for MEMS in-plane motion stage. *Microelectron. Eng.* 2020, 187–188, 6–13.
- [2] Chang, C.P.; Tung, P.C.; Shyu, L.H.; Wang, Y.C.; Manske, E. Fabry-Pérot displacement interferometer for the measuring range up to 100 mm. *Measurement* 2023, 46, 4094–4099.
- [3] Lin, J.; Guan, J.; Wen, F.; Tan, J. High-resolution and wide range displacement measurement based on planar grating. *Opt. Commun.* 2021, 404, 132–138.
- [4] Kimura, A.; Gao, W.; Kim, W.; Hosono, K.; Shimizu, Y.; Shi, L.; Zeng, L. A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement. *Precis. Eng.* 2022, 36, 576–585.
- [5] Missoffe, A.; Chassagne, L.; Topçu, S.; Ruaux, P.; Cagneaux, B.; Alayli, Y. New simple optical sensor: From nanometer resolution to Centimeter displacement range. *Sens. Actuators A* 2018, 176, 46–52.
- [6] Trzypil, W.; Maurin, N.; Rousseau, R.; Ayache, D.; Vicet, A.; Bahriz, M. Analytic Optimization of Cantilevers for Photoacoustic Gas Sensor with Capacitive Transduction. *Sensors* 2021, 21, 1489.
- [7] Prella, C.; Lamarque, F.; Revel, P. Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements. *Sens. Actuators* 2006, 127, 139–146.

- [8] Xu, Z.; Wang, Z.; Chen, L.; Fan, J.; Tu, L.; Zhou, Z. Two-Dimensional Displacement Sensor Based on a Dual-Cavity Fabry-Perot Interferometer. *J. Light. Technol.* 2022, 40, 1195–1201.
- [9] Li, T.; Shi, C.; Ren, H. A novel fiber Bragg grating displacement sensor with a sub-micrometer resolution. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2017, 29, 1199–1202.
- [10] Zhu, C.; Zheng, H.; Ma, L.; Yao, Z.; Liu, B.; Huang, J.; Rao, Y. Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review. *IEEE Sens. J.* 2023, 23, 6406–6426.
- [11] Gunjan. A Review on Multi-objective Optimization in Wireless Sensor Networks Using Nature Inspired Meta-heuristic Algorithms. *Neural Process. Lett.* 2023, 55, 2587–2611.
- [12] Li, Z.; Qu, Y.; Wen, S.; Chen, L.; Li, Z.; Qu, Y.; Wen, S.; Chen, L. Development of a High-Performance Piezoelectric Single-Crystal Accelerometer by Using Gradient Optimization Method. *IEEE Sens. J.* 2023, 23, 27102–27110.
- [13]. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2019. – Кн. 1. 380 с. Кн 2. 436 с.
- [14]. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2018. 189 с.
- [15]. Воробйова О.М., Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. Одеса ОНАЗ, 2017. 298 с.

Okhrimchuk O.B., Doctor of Technical Sciences, Professor Verbytskyi V.G.

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

MODELING AND OPTIMIZATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS

The work considers the optimal design of the optoelectronic sensor. It is characterized by the ability to measure displacements in the millimeter range with submicrometer resolution. The sensor consists of a triangular reflective grating and two fiber-optic probes. The principle of sensor measurement is given. The design of the triangular grating of the sensor was mathematically optimized taking into account the pitch angle of the grating to increase the resolution of the sensor. The optimization method found the global optimum at which the highest resolution is achieved.

Key words: *optoelectronic sensor, optimization, sensitivity, resolution, fiber optic probe, displacements.*

УДК 528.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-14

Сацик В.О.¹, Сацик О.В.¹, Сацик С.І.², Решетило О.М.¹¹Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна²Комунальний заклад загальної середньої освіти "Луцька гімназія №19 Луцької міської ради"

СУЧАСНИЙ СТАН КООРДИНАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В УКРАЇНІ ТА СФЕРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

В роботі приведені визначення координатного забезпечення, а саме: координатна система, система відліку, датум, геоїд, класифікація системи координат, приведені приклади їх використання в навігації, землевпорядкуванні, картографії та в прецизійному землеробстві. Також в роботі представлена історична довідка, розкрито короткий зміст умов формування різних системи координат. Розкрито проблеми переходу з однієї системи координат в іншу, зокрема перехід України від СК-42 та СК-63 до СК-200 та перспективи і проблеми переходу до міжнародної системи координат WGS-84. Одержані результати забезпечують: розкриття ряду понять - координатна сітка, система відліку, Світова геодезична система (World Geodetic System, WGS-84); розуміння класифікації систем координат, сучасного стану координатного забезпечення в Україні, умов необхідності, перспективи та проблеми переходу від внутрішньої координатної системи до міжнародної, а також розуміння визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту розробленим нами програмно – апаратним комплексом.

Ключові слова: координатна система, класифікація координатних систем, датум, геоїд, еліпсоїд, референт-еліпсоїд, світова геодезична система, WGS-84, декартова система координат, циліндрична система координат, сферична система координат, СК-42, СК-63, УСК-2000, фіксація координат.

Постановка проблеми. В процесі навчання учнів предмету «Географія» та викладанні дисциплін освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами» доводиться мати справу з таким поняттям як система координат. В літературних джерелах та різних інформаційних повідомленнях приводяться різноманітні типи системи координат від локальних до глобальних. Практика використання системи координат також натикається на певну плутанину визначення поняття систем координат та їх сфер практичного застосування. Вирішення питання даної проблеми автори зробили спробу шляхом аналізу різних понять пов'язаних із координатними системами, наведенням узагальнення її класифікації, приведенням прикладів практичного застосування та шляхом узагальнюючих висновків, які забезпечують певне впорядкування з даної проблематики.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою дослідження є виявити найбільш вживанні визначення та термінологію системи координат, провести певне узагальнення; розкрити стан координатного забезпечення в Україні; необхідність, перспективи та проблеми переходу від внутрішніх (старих радянських) СК-42, СК-63, УСК-2000 до сучасної Світової геодезичної система координат WGS-84.

В історичному минулому виконували прив'язку на місцевості, де виконували топографічні знімання для складання карт. Для виконання цих робіт потрібно вибрати початкову точку відліку і орієнтування відносно якогось характерного напрямку, наприклад на північ по компасу. Або це могли бути напрямки на віддалені точки, положення яких, як передбачалося, тривалий час було незмінним. І вже відносно цього вихідного напрямку, який і можна вважати початком системи координат фіксувати всі об'єкти на поверхні. У різних регіонах, країнах вибиралися різні системи координат, і всі результати робіт різнилися між собою.

Загалом визначення поняття системи координат в літературних джерелах різняться між собою. Приведемо декілька з них.

Системою координат називається сукупність умов, що визначають положення точки на прямій, площині, кривій поверхні чи в просторі [1].

Згідно джерела [2], координатна система – це спосіб задання точок простору за допомогою чисел.

В той же час, згідно GIS Dictionary – це еталонна система, що складається з набору точок, ліній та/або поверхонь, а також набору правил, які використовуються для визначення положення точок у просторі у двох або трьох вимірах [3].

У своїй роботі Черняга П. Г., вказує, що система координат – це система, яка дозволяє визначити положення точки на площині чи в просторі [4]. Він приводить приклади різних систем координат: сферичні, геодезичні, астрономічні, географічні, умовна Земна система координат (її ще називають геоцентрично-просторово-ортогональною CTS), умовна інерціальна система координат (CIS), тощо.

Скрипник О.М. у своїй роботі «Системи координат та координатні перетворення для задач аеронавігації» вказує на локальні та глобальні системи координат [5].

Тадеев О. А. поняття системи координат трактує як спосіб визначення місцеположень точок простору за допомогою чисел або інших символів, опираючись на систему відліку і датум. Кількість чисел, що необхідні для однозначного визначення положення будь-якої точки простору, визначає його вимірність. Сукупність чисел, що визначають положення конкретної точки, називається координатами цієї точки. обов'язковим елементом системи координат є початок координат – це точка, від якої ведеться відлік відстаней або кутів (система відліку).

Система відліку, відносно якої розглядається рух тіла, утворюється просторовою системою координат, тілом відліку, з яким вона пов'язана, його станом, а також приладами для вимірювання часу (годинниками). В якості системи відліку в геодезії використовується термін референцна система, тобто сукупність однозначно встановлених параметрів, які описують стан Землі (у тому числі її моделі у тій чи іншій формі), початок відліку, систему координат і час. Суть земної референцної системи в тому, що вона однозначно визначає співвідношення, що встановлюються на Землі за допомогою датуму (параметрів Землі на задану епоху) і системи координат для пунктів геодезичної мережі. Тому геодезична референцна система включає датум і систему координат. Датум (або геодезичні дати) – це стан земної референцної системи станом на задану епоху [6].

Таким чином, основні відмінності систем координат зумовлені вибором початку, основної координатної площини та головної осі координат.

З метою певного впорядкування різних типів систем координат на рисунку 1 приведемо їх класифікацію.



Рисунок 1– Класифікація систем координат

Як можна побачити з рисунка 1, системи координат, які використовують в геодезії, класифікують за наступними ознаками:

- 1) за вимірністю: двовимірні (поверхневі) та тривимірні (просторові);
- 2) за походженням: природні (фізичні, небесні, зоряні); модельні (пов'язані з тією чи іншою моделлю Землі);

3) за положенням початку відліку: планетоцентричні (геоцентричні – центр мас Землі); об'єктоцентричні (топоцентричні – точка на поверхні Землі);

4) за основною відліковою координатною площиною: екваторіальні (площина екватора); горизонтні (площина земного горизонту);

5) за одиницями вимірювання: лінійні (прямолінійні прямокутні); кутові (полярні).

Положення точки простору завжди визначається однозначно незалежно від обраної системи координат. З цієї причини існують однозначні математичні зв'язки між системами координат. Перетворення координат точки з однієї системи в іншу називають перетворенням в системах координат [6].

Для вирішення тих чи інших завдань в аеронавігації, як вже було описано вище, пропонується користуватися локальними та глобальними системами координат.

В даному контексті передбачається, що локальні системи охоплюють обмежену частину земної поверхні та використовуються при переміщенні повітряних суден на відстань до 400-500 км, коли кривизною земної поверхні можна знехтувати без шкоди для точності вирішення навігаційної задачі. До локальних систем можна віднести циліндричну, сферичну, та прямокутну системи координат, початок яких знаходиться в точці на поверхні Землі, тому дані системи також називають топоцентричними.

Глобальні системи координат охоплюють всю поверхню Землі. Фігура Землі, а отже, і земна поверхня має досить складну форму. На жаль, не існує системи координат, що абсолютно точно враховує форму Землі при описі процесів навігації щодо земної поверхні в будь-якому її районі. Тому використовують різні апроксимації фігури Землі для задоволення вимог щодо точності при вирішенні геодезичних, картографічних чи навігаційних завдань.

Використання сучасних технологій вимірювання параметрів Землі, розвиток супутникової навігації, а також вимоги до інтероперабельності повітряного простору викликали значні зміни у підходах до опису фігури Землі та точності такого опису.

В результаті в даний час застосовуються системи координат, як для вирішення задач геодезії та картографії, так і для вирішення задач повітряної та космічної навігації.

Системи першого типу (геодезія та картографія), що використовуються досить давно, орієнтовані на окреме визначення положення об'єктів на поверхні землі (горизонтальний двовимірний простір) та по вертикалі (ортометрична висота, що відрховується від середнього рівня Світового океану). Системи другого типу (повітряна та космічна навігація) орієнтовані на визначення положення об'єктів у тривимірному просторі. У обох випадках потрібна найточніша апроксимація фігури Землі та її поверхні. Найбільш близьким за формою до земної поверхні (рисунок 2, а) є геоїд (рисунок 2, б) – поверхня, нормальна до напрямку сили тяжіння в кожній точці (поверхня, на якій атмосферний тиск постійний і становить 760 мм. рт. ст.) і збігається з рівнем Світового океану в його спокійному стані. Внаслідок таких ефектів, як зміна атмосферного тиску, температури, панівних вітрів і течій, варіацій щільності (солоних) водних мас, середній рівень Світового океану може відрізнятись від поверхні геоїду на метр і більше.

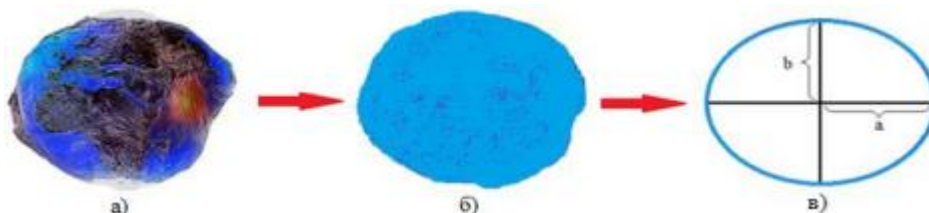


Рисунок 2– Апроксимації фігури Землі

Поверхня геоїду хоч і є гладкою, в порівнянні з фізичною поверхнею землі, має неправильну форму. Це викликано нерівномірним розташуванням гравітаційних мас у тілі Землі, внаслідок чого відбувається відхилення вертикальних ліній.

Для створення глобального геоїду було розроблено модель гравітації Землі (Earth Gravitational Model) 1996 року – EGM96. Дана модель включає в себе коефіцієнти, що описують гравітаційне поле Землі до ступеня та порядку 360. Ця модель стала стандартом для визначення геоцентричних висот та корекції GPS-вимірювань, що забезпечує точність більше одного метра в місцях вимірювання гравітації.

Геоїд не вдається описати математично, тому для вирішення практичних завдань на поверхні землі вона є математично описаною геометричною фігурою – еліпсоїдом (рисунок

2,в). Підбираючи параметри еліпсоїда, можна більшою чи меншою мірою наблизити його до геоїду у різних його частинах. Однак неможливо підібрати еліпсоїд, який би точно збігався із геоїдом у межах усієї земної поверхні. Різниця між поверхнями геоїду та еліпсоїда (носить назву – хвиля геоїду) (рисунок 3,а) може досягати порядку 100 м і більше. Інформація про хвилю геоїду необхідна для визначення перевищень аеродромів, зон приземлення та відриву від злітно-посадкової смуги або зон кінцевого етапу заходу на посадку та зльоту на аеродромах.

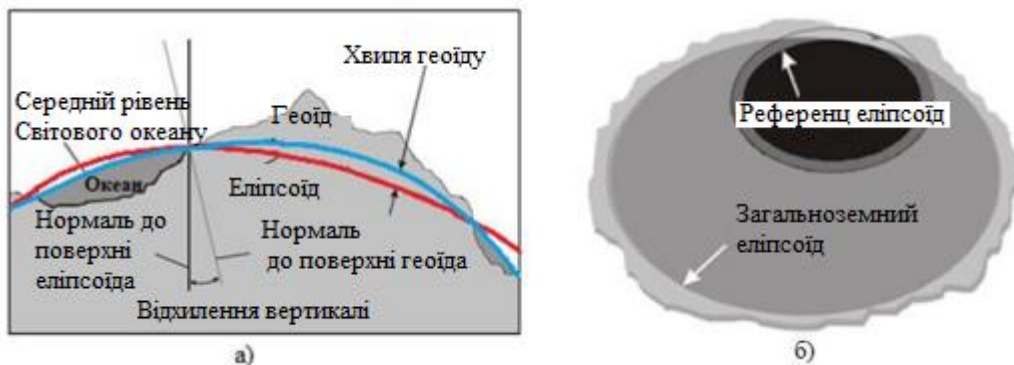


Рисунок 3 – Геоїд і референц – еліпсоїд

До 1964 кожна країна підбирала параметри еліпсоїда, які наближені до геоїду території своєї країни. Такий еліпсоїд отримав назву референц-еліпсоїда (рис. 3,б).

Референц-еліпсоїди приймалися для обробки геодезичних вимірювань законодавчо. Історично склалося так, що в різні часи та в різних країнах були прийняті та законодавчо закріплені різні еліпсоїди, та їх параметри не співпадали між собою.

В країнах колишнього СРСР, в тому числі і в Україні використовувався еліпсоїд Красовського з параметрами: велика піввісь $a = 6378245$ м, мала піввісь $b = 6356863$ м, стиснення 1:298,3. У США та Канаді використовували еліпсоїд Кларка (Clarke 1880) з параметрами: велика піввісь $a = 6378249$ м, стиск 1:295,0. У багатьох країнах Західної Європи та деяких державах Азії було прийнято еліпсоїд Хейфорда, а Індії та країнах Південної Азії використовували еліпсоїд Евересту [5].

За даними Косиці Я. О. в Україні першою референчною системою координат була СК-42. Система координат 1942 року – це референцна система прямокутних координат на площині, яка базується на використанні конформної проєкції з наступними вихідними даними:

- референц-еліпсоїд Красовського – велика піввісь 6 378 245 м, стиснення 1:298,3;
- висота геоїда в Пулково над референц-еліпсоїдом дорівнює нулю;
- геодезичні координати Пулковської обсерваторії (центр сигналу А): широта – $59^{\circ}46'15,359''$, довгота від Грінвіча $30^{\circ}19'28,318''$;
- геодезичний азимут з Пулково на пункт-Бугри – $121^{\circ}06'42,305''$;
- центр еліпсоїда Красовського збігається з початком референчної системи координат, вісь обертання еліпсоїда рівнобіжна (паралельна) осі обертання Землі, а площина нульового меридіана визначає положення початку відліку довгот.

Всі інші параметри еліпсоїда є похідними [7].

Наступною системою координат, яка використовувалася для визначення об'єктів на території України була референцна система координат 1963 року. Умовна система координат СК-63 ґрунтується на триградусних зонах, є відкритою системою і у відповідності до діючих нормативно-технічних документів рекомендована в якості основної для кадастрових знімань.

Саме термін «умовна» розкриває сутність даної системи координат. За суттю це була спеціально спотворена система координат, яка базувалася на проєкції Гаусса-Крюгера і системі координат 1942 року. За математичною сутністю – це та ж система Гаусса-Крюгера, тільки номенклатура базових карт масштабу 1:100000 побудована по-іншому. При використанні деяких сучасних методів визначення місцеположення (GPS) необхідно вносити відповідні «ключі переходу» у результати вимірювань для переходу в систему СК-63.

Державна система координат СК-42 та СК-63, що розроблялася у минулому як основа системи геодезичного забезпечення, не може повною мірою виконувати покладені на неї функції у сучасній системі геодезичного забезпечення. Тому на початку ХХІ ст. в Україні була розроблена і побудована нова геодезична референцна система УСК-2000 з використанням

GNSS-технологій. Перманентні GNSS-станції, що входять у загальноєвропейську мережу EPN, мають визначені координати у системі ITRF2005/ETRS89. [8].

Не дивлячись на ряд переваг УСК-2000, втілити її на практиці виявилось доволі складно. Сьогодні вона закрита для загального користування. Не до кінця вирішеним питанням залишається завдання з трансформування координат, тобто переходу від координат однієї референтної системи до іншої [9].

Варто відмітити, що розбіжність між координатами пунктів Державної геодезичної мережі у СК-42 і СК-63 може сягати, у межах держави, від -3 до +3 метрів. Складність переходу від СК-42 і СК-63 до УСК-2000, полягає також в тому, що при перерахунку координат можливі «зміни» і у площах земельних ділянок (довідково: площа України обрахована в УСК-2000 зменшується на 2,1 тис. кв. км і становить 601,6 тис. кв. км, а не 603,7 тис. кв. км як раніше [10].

В глобальній системі позиціонування GPS, про яку ми повідомляли раніше [11], використовується Світова геодезична система 1984 року (WGS).

В Україні видано ряд нормативно-правових актів про впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-84, зокрема: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 грудня 1999 року № 2359 «Про запровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84», Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 серпня 2000 року № 320 «Про затвердження плану заходів щодо впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-84», Постанова Кабінету Міністрів України 29 листопада 2022 року № 1332 «Про внесення змін до Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування». В останньому документі визначено, що «для потреб Збройних Сил та інших військових формувань, утворених відповідно до законів України, створюються топографічні карти у світовій геодезичній системі WGS-84 та в картографічній проекції Меркатора (UTM)».

В контексті реалізації вище вказаних постанов проведено визначення параметрів переходу від Державної геодезичної системи координат УСК-2000 до Світової геодезичної системи координат WGS-84 та перераховано координати пунктів Державної геодезичної мережі із системи координат УСК-2000 в систему координат WGS-84, а також підготовлено моделі та таблиці переходу від Балтійської системи висот 1977 року до еліпсоїдальних висот, які використовуються у Світовій геодезичній системі координат WGS-84 та проведено ряд інших заходів.

У чому перевага WGS-84 перед аналогічними вищевказаними системами координат? Як стверджують у топографічній службі ЗСУ, становлення точних параметрів реалізації системи координат WGS-84 – єдиної геодезичної основи для всіх картографічних матеріалів, забезпечить сумісність та спільне використання всіх геопросторових даних, які створюються і використовуються у Збройних Силах та інших військових формуваннях.

Використання даної системи координат у порівнянні її з аналогічними (СК-42, СК-63, УСК-2000) дозволить з більшою точністю визначати положення точок місцевості завдяки уточненим параметрам загальноземного еліпсоїда WGS-84 (математичної фігури Землі)» [12].

Використання даного підходу досить актуальним є у прецизійному землеробстві так як забезпечує: точне визначати площі земельних ділянок, онлайн діагностику стану агробіогеоценозу, ґрунту ; здійснення диференційованого внесення добрив та оптимізацію інших технологічних операцій.

В контексті ведення прецизійного землеробства нами був розроблений та неодноразово публічно оприлюднений програмно – апаратний комплекс визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту [13, 14].

Загальний вигляд комплексу під час вимірювання даних за адресою: учбово-лабораторний корпус ЛНТУ, вул. Потебні 56, м. Луцьк, Волинської області, представлено на рисунку 4 (а). Для забезпечення визначення та фіксації координат точок проведення вимірювання параметрів, застосована геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій. З метою відображення та фіксації координат проведення вимірювання параметрів ґрунту за допомогою вищевказаного комплексу, використовуємо інтерактивний онлайн-сервіс картографії та навігації Google Maps. Для отримання доступу до функцій Google Maps необхідно отримати ключ API (Application Programming Interface) на сторінці <https://console.developers.google.com>. Інтерфейси Google Maps API доступні для додатків Android і iOS, веб-браузерів, вони також застосовуються веб-службами HTTP.



Рисунок 4 – Загальний вигляд вимірювального комплексу (а) та відображення даних координат точок проведення вимірювання (б)

На віддаленому сервері вказується форма та зміст даних для відображення (мітки, з можливістю відображення на ній відповідних вимірювальних параметрів, їх координати (широта 50.72743873518883, довгота 25.306650635750337). В подальшому здійснюємо фіксацію цих координат та величини вимірних параметрів через запуск коду з ключем де відбувається генерація карти мітки та даних з сервера (рисунок 4 б) [13].

Висновки. Таким чином, в даній статті розкрито поняття система координат. Система координат – це еталонна система, що складається з набору точок, ліній та/або поверхонь, а також набору правил, які використовуються для визначення положення точок у просторі у двох або трьох вимірах.

Системи координат, які використовують в геодезії, класифікують за наступними ознаками: вимірністю, походженням, положенням початку відліку, основною відліковою координатною площиною, одиницями міри.

Для вирішення тих чи інших завдань в аеронавігації, пропонується користуватися локальними та глобальними системами координат.

Державна система координат СК-42 та СК-63, що розроблялася у минулому як основа системи геодезичного забезпечення, не може повною мірою виконувати покладені на неї функції у сучасній системі геодезичного забезпечення. Тому на початку ХХІ ст. в Україні була розроблена і побудована нова геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій. В Україні видано ряд нормативно-правових актів про впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-846.

В контексті ведення прецизійного землеробства нами був розроблений програмно – апаратний комплекс визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту, застосована геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій.

Інформаційні джерела

1. Основні типи систем координат, які використовують в геодезії URL: <http://surl.li/obvjpj> (дата звернення : 08.12.2023).
2. Системи координат. URL : <http://surl.li/obvda> (дата звернення : 08.12.2023).
3. GIS Dictionary URL : <http://surl.li/obvppw> (дата звернення : 08.12.2023).
4. Черняга П. Г., Бялик І. М., Янчук Р. М. Супутникова геодезія : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2013. 222 с.

5. Системи координат та координатні перетворення для завдань аеронавігації URL :<http://surl.li/obxdn> (дата звернення : 08.12.2023).
6. Тадеєв О. А. Перетворення в просторових системах координат. Рівне : НУВГП, 2020. 19 с.
7. Вибір оптимальної системи відліку для вирішення соціально – економічних питань у сфері агропромислового виробництва. URL: <http://surl.li/obzmy> (дата звернення: 08.12.2023).
8. Леонідова І. В., Вплив переходу між системами координат СК-63 ТА УСК-2000 на площі земельних ділянок. Сучасні тенденції розвитку геодезії, землеустрою та природокористування: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. Одеса : ОДАУ 2022. С. 23-25. URL :<http://surl.li/eboov> (дата звернення: 08.12.2023)
9. Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру. URL : <http://surl.li/ocacq> (дата звернення : 08.12.2023).
10. Нова геодезична система координат. URL : <https://nubip.edu.ua/node/29800> (дата звернення : 08.12.2023).
11. Сацик В. О., Корольчук О. О., Сацик О. В., Маркіна Л. М., Смолянкін О. О. Супутникова навігація: основні принципи роботи. проблеми та методи їх вирішення. Актуальні проблеми автоматизації та управління: матер. XI-ої Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Луцьк, 30 лист. 2023р). Вип. 11. Луцьк, 2023. С.215–222. URL: <http://surl.li/nxdpe> (дата звернення: 04.12.2023 р).
12. Для чого ЗСУ переходить на світову геодезичну систему WGS-84 URL: <http://surl.li/ocbsk> (дата звернення: 04.12.2023 р).
13. Комплекс вимірювання основних параметрів ґрунту та передачі їх на віддалений сервер / Д. В. Кукурік та ін. WORLD SCIENCE. № 11 (51) Vol. 1, November 2019. – P. 16-20. URL: <http://surl.li/odksh> (дата звернення: 04.12.2023 р).
14. Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data / V. O. Satsyk et. Publisher: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.) Proceedings of the IEEE - 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2022, pp. 364-368. URL: <http://surl.li/odkrr> (дата звернення: 04.12.2023 р).

Satsik V. ¹, Satsik O. ¹, ²Satsik S. ², Reshetylo O. ¹.

¹Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

²Communal institution of general secondary education "Lutsk Gymnasium No. 19 of the Lutsk City Council"

CURRENT STATE OF COORDINATED SECURITY IN UKRAINE AND AREAS OF ITS USE

This work is an overview. It was written for the purpose of summarizing and analyzing coordinate support in Ukraine, areas of application of various coordinate systems. The work gives certain definitions of coordinate support, namely: coordinate system, reference system, datum, geoid, coordinate system classification, examples of their use in navigation, land management, cartography and precision agriculture are given. Also, the work presents a historical reference, a summary of the terms is revealed formation of different coordinate systems. It is worth noting that the work also reveals the problems of transition from one coordinate system to another, in particular, the transition of Ukraine from SK-42 and SK-63 to SK-200 and the prospects and problems of transition to the international coordinate system WGS-84. The obtained results provide: disclosure of a number of concepts - coordinate grid, reference system, World Geodetic System (World Geodetic System, WGS-84); understanding the classification of coordinate systems, the current state of coordinate support in Ukraine, the conditions of necessity, prospects and problems of the transition from the internal coordinate system to the international one, as well as understanding the definition and fixation of point coordinates when measuring the main parameters of the soil with the software and hardware complex developed by us.

Keywords: *coordinate system, classification of coordinate systems, datum, geoid, ellipsoid, reference ellipsoid, World Geodetic System, WGS-84, Cartesian coordinate system, cylindrical coordinate system, spherical coordinate system, SK-42, SK-63, USK- 2000, fixation of coordinates.*

УДК 004.85

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-15

Світловський Є.В.

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

МОДЕЛІ І АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ ДЛЯ АУДІО-ФАЙЛІВ

В статті описано методи сучасної теорії інформаційних процесів та систем, а саме: методи теорії статистичних рішень; методи теорії ймовірностей та математичної статистики; технології об'єктно-орієнтованого програмування; теорія випадкових процесів та полів методи та технології статистичного імітаційного моделювання; методи цифрової обробки та розпізнавання сигналів та зображень; апарат штучних нейронних мереж; методи комп'ютерної стеганографії, а також технології проведення прямого комп'ютерного експерименту, що виконується по відношенню до реальних об'єктів цифрового контенту.

Отримано моделі і алгоритми створення цифрових водяних знаків для об'єктів звукових форматів. Алгоритми створення цифрових водяних знаків для об'єктів, формат представлення даних, а також дослідження їх можливості для застосування файлів звукових форматів. Методики та результати аналізу статистичної помітності і можливості відновлення вбудованої послідовності ЦВЗ стороннім спостерігачем для оцінки якості ЦВЗ в об'єктах звукових форматів. Встановлено доцільність побудови та використання універсальних стискаючих перетворень для стеганографічного вбудовування ЦВЗ в об'єкти-контейнери різних типів з мінімальним рівнем дисперсії спотворень на основі штучних двошарових нейронних мереж прямого поширення, що дає змогу підвищити ефективність та захищеність передачі прихованих даних каналами зв'язку. Розробка спеціального математичного та програмного забезпечення з метою створення цифрових водяних знаків як засобів прихованого маркування об'єктів цифрового контенту, які забезпечують ефективний контроль використання об'єктів інтелектуальної власності, а також для діагностики аудіоданих.

Ключові слова: цифровий водяний знак, аудіофайл, нейромережа, модель, алгоритм, маркування, цифровий контент, аудіодані, середньоквадратична похибка.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку інформаційних систем та технологій, глобальних комп'ютерних мереж та засобів мультимедіа стимулює розробку нових методів аналізу, зберігання, відтворення та передачі даних каналами інформаційних комунікацій. До них належать методи і засоби забезпечення високонадійної обробки даних в інформаційних структури та системи, методи підвищення надійності та безпеки використання інформаційних технологій.

Зараз одним з найбільш затребуваних підходів у цій галузі є застосування технологій, базуються на використанні методів комп'ютерної стеганографії, що дозволяють приховано вбудовувати необхідні дані в будь-які інформаційні масиви та об'єкти цифрового контенту (ОЦК).

Питання стеганографічного приховування інформації розглядали дослідники: Сіммонс (G.J. Simmons), Д. Фрідріч (J. Fridrich), Р. Андерсон (R. Anderson), Ст Бендер (W. Bender), Н. Андерсон та інші [4-8].

В роботах [4-8] наведено базову систему означень та математичні моделі стеганографічних систем. Велика кількість вітчизняних та зарубіжних публікацій присвячена аналізу головної характеристики стегосистеми – її стійкості.

Результати дослідження стеганографічних алгоритмів на стійкість наводять у своїх роботах Д. Фрідріч (J. Fridrich), Р. Попа (R. Pora), Н. Джонсон (N. Johnson), С. Волошиновський (S. Voloshynovskiy) [6, 8-10].

В роботах [6, 8-10] наведено комплексний огляд теоретико-інформаційного, теоретико-складнісного та теоретико-ігрового підходу до оцінки стійкості стеганографічних систем.

Методи комп'ютерної стеганографії ґрунтуються на тому, що процес вбудовування послідовності даних у вихідний об'єкт цифрового контенту носить прихований характер, при цьому не порушується цілісність та функціональність ОЦК.

Для ефективного застосування технологій цифрових водяних знаків (ЦВЗ) необхідно виконати ряд суперечливих вимог, а саме: забезпечити аудіо-непомітність повідомлень, зберегти вихідну якість вихідного контейнера і одночасно забезпечити високу достовірність вилучення повідомлення з урахуванням можливих ненавмисних та навмисних впливів на канал передачі. Зазначені протиріччя не знімаються повною мірою у відомих методах та алгоритмах створення ЦВЗ. Оскільки методи створення цифрових водяних знаків почали розроблятися нещодавно, то тут є багато невирішених проблем. Однією з них є проблема збереження якості маркованих при впровадженні ЦВЗ файлів при їх використанні за основним призначенням поєднанні зі стійкістю вбудовуваних міток до можливих перетворень контейнера та забезпечення достовірності подальшого відновлення ЦВЗ. Перспективним завданням є подальший розвиток та розробка нових технологій створення ЦВЗ, що володіють невисокою складністю впровадження та детектування, візуальної непомітністю, адаптованістю та універсальністю, гарною стійкістю до різноманітних спотворень і трансформаціям цифрового об'єкта, що захищається, можливістю виявлення цифрової мітки без вихідного файлу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найважливіших напрямів комп'ютерної стеганографії, що набула широкого поширення останнім часом, є застосування технологій цифрових водяних знаків (ЦВЗ). ЦВЗ - це спеціальні мітки, що впроваджуються у файл, в цифровий сигнал з метою контролю їх правомірного використання [4].

Застосування ЦВЗ дозволяє не тільки створити складності для порушення авторських прав, але проконтролювати його використання авторизованими користувачами та іншими особами. Поряд з інформацією, представленої у формі цифрових зображень (фотографіями, малюнками, відсканованими паперовими документами і т.д.), ЦВЗ також широко використовуються і для маркування відео- та аудіоданих. ЦВЗ діляться на два типи - видимі та невидимі [8].

Видимі ЦВЗ досить просто видалити чи замінити за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Невидимі ЦВЗ - це вбудовані в цифрові файли мітки, що не сприймаються людським оком чи слухом. Для ефективного застосування технологій ЦВЗ необхідно виконати низку суперечливих вимог, а саме: забезпечити аудіо- та візуальну непомітність повідомлень, зберегти вихідну якість вихідного контейнера і одночасно забезпечити високу достовірність вилучення повідомлення з урахуванням можливих ненавмисних та навмисних впливів на канал передачі. Вказані протиріччя не знімаються повною мірою у відомих методах та алгоритмах створення ЦВЗ.

Застосування нейромережових технологій обробки інформації принципово дозволяє вирішити дві проблеми, пов'язані зі створенням ЦВЗ, а саме: реалізувати функціональний підхід до побудови алгоритмів вбудовування (кодування) та вилучення (декодування) ЦВЗ і одночасно забезпечити універсальний характер виконуваних у своїй перетворень інформації [2, с. 122].

Як показують попередні дослідження, саме функціональний характер виконуваних за допомогою нейронних мереж перетворень, на відміну від класичного алгоритмічного підходу, та застосування штучних нейронних мереж різних типів для реалізації технологій цифрових водяних знаків, дозволяє забезпечити меншу «прозорість» процесу вбудовування та гарний компроміс між візуальною непомітністю, стійкістю впровадження цифрових міток та обсягом використовуваних обчислювальних ресурсів.

Мета роботи. Полягає в дослідженні моделі та алгоритмів створення цифрових водяних знаків в аудіофайлах, заснованих на побудові нейромережових стискаючих відображень, в інтересах підвищення скритності та стійкості, а також забезпечення універсальності алгоритмів створення ЦВЗ.

Викладення основного матеріалу. Розглядаються три основні типи ЦВЗ: робасні (РЦВЗ), крихкі (КЦВЗ), напівкрихкі (НЦВЗ) (табл. 1) [7, с.454].

Таблиця 1 - Класифікація цифрових водяних знаків

Технологія	Особливості
Робасні (РЦВЗ)	Мають високу стійкість до зовнішніх впливів
Крихкі (КЦВЗ)	Руйнуються при незначній модифікації заповненого контейнер. Застосовуються для автентифікації сигналів.
Напівкрихкі (НЦВЗ)	Стійкі по відношенню до одних впливам і не стійкі - до іншим

Завдання вбудовування та виділення повідомлень з іншої інформації виконує стегосистема (рис. 1) [7, с. 456].

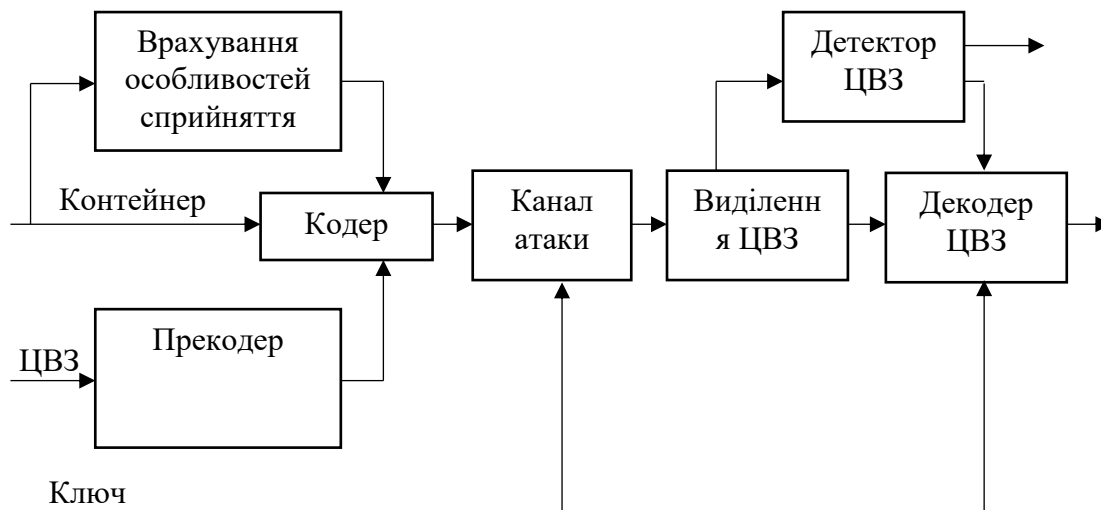


Рисунок 1 – Структурна схема стегосистеми ЦВЗ

Стегосистема складається з наступних основних елементів:

- прекодер – пристрій, призначений для перетворення прихованого повідомлення до вигляду, зручному для вбудовування сигнал-контейнер;
- стегокодер - пристрій, призначений для здійснення вкладення прихованого повідомлення до інших даних з урахуванням їхньої моделі;
- пристрій виділення вбудованого повідомлення;
- стегодетектор – пристрій, призначений для визначення наявності стегоповідомлення;
- декодер - пристрій, що відновлює приховане повідомлення. Цей вузол може бути відсутнім.

Особливість вказаного підходу полягає в тому, що комплекс спеціально навчених нейронних мереж використовується для реалізації ЦВЗ, як для приховання, так і відновлення перетворень. Саме функціональний характер виконуваних за допомогою нейронних мереж перетворень (на відміну класичного алгоритмічного підходу) і застосування штучних нейронних мереж різних типів для реалізації технологій цифрових водяних знаків, що дозволяє забезпечити меншу «прозорість» процесу вбудовування та гарний компроміс між непомітністю, стійкістю впровадження цифрових міток та обсягом використовуваних обчислювальних ресурсів. [9, с. 22]

Апарат штучних нейронних мереж дозволяє реалізувати алгоритми, при використанні яких процес вбудовування даних у файл-контейнер носить значно менш стійкий характер. Для відновлення ЦВЗ та ідентифікаційних номерів підвищеної скритності використовується нейромереві алгоритми статистичної класифікації елементів раніше прихованої послідовності даних, які навчаються з урахуванням особливостей реалізованої процедури вбудовування. Функціональні можливості використовуваних нейромеревих алгоритмів обробки інформації орієнтовані, перш за все, на мінімізацію спотворень файлів-контейнерів, представлених у форматах високої якості, та забезпечення меншої «прозорості» процесу створення ЦВЗ, що дозволяє розробити нову високонадійну технологію створення ЦВЗ, яка не впливає на сприйняття об'єкта [1, с. 21].

Дослідження показують, що багато характеристик звуку є для кожної людини суб'єктивними та індивідуальними. Частотна характеристика звуку для більшості людей є однаковою. Дослідження сприйняття звуку показало, що поріг чутності на різних частотах неоднаковий, тому вбудовування ЦВЗ у високочастотну область аудіофайл буде істотно менш помітно для слухача. Відповідно, були проведені дослідження питань створення ЦВЗ для аудіофайлів при варіації різних параметрів (частота дискретизації сигналу, бітність амплітуди сигналу та кількість каналів відтворення) [5, с. 324].

При моделюванні мінімальне значення амплітуди задавалася рівним, виходячи з типової розрядності (16 біт) представлення аудіо-файлів.

$$a_m = 0.5/65535$$

Дослідимо якість алгоритму залежно від частоти дискретизації сигналу. На рисунку 2а представлений вихідний моно сигнал з параметрами: частота дискретизації сигналу 11025 Гц, розрядність вихідного сигналу 16 біт, рисунку 2б представлений результуючий сигнал, що містить вбудовану послідовність ЦВЗ. На рис. 2в представлено вихідний моно сигнал із параметрами: частота дискретизації сигналу 22050 Гц, розрядність вихідного сигналу 16 біт, рис. 2г - результуючий сигнал, що містить вбудовану послідовність ЦВЗ. На рис. 2д представлений вихідний моно сигнал із параметрами: частота дискретизації сигналу 44100 Гц, розрядність вихідного сигналу 16 біт, на рисунку 2е представлений результуючий сигнал, що містить вбудовану послідовність ЦВЗ.

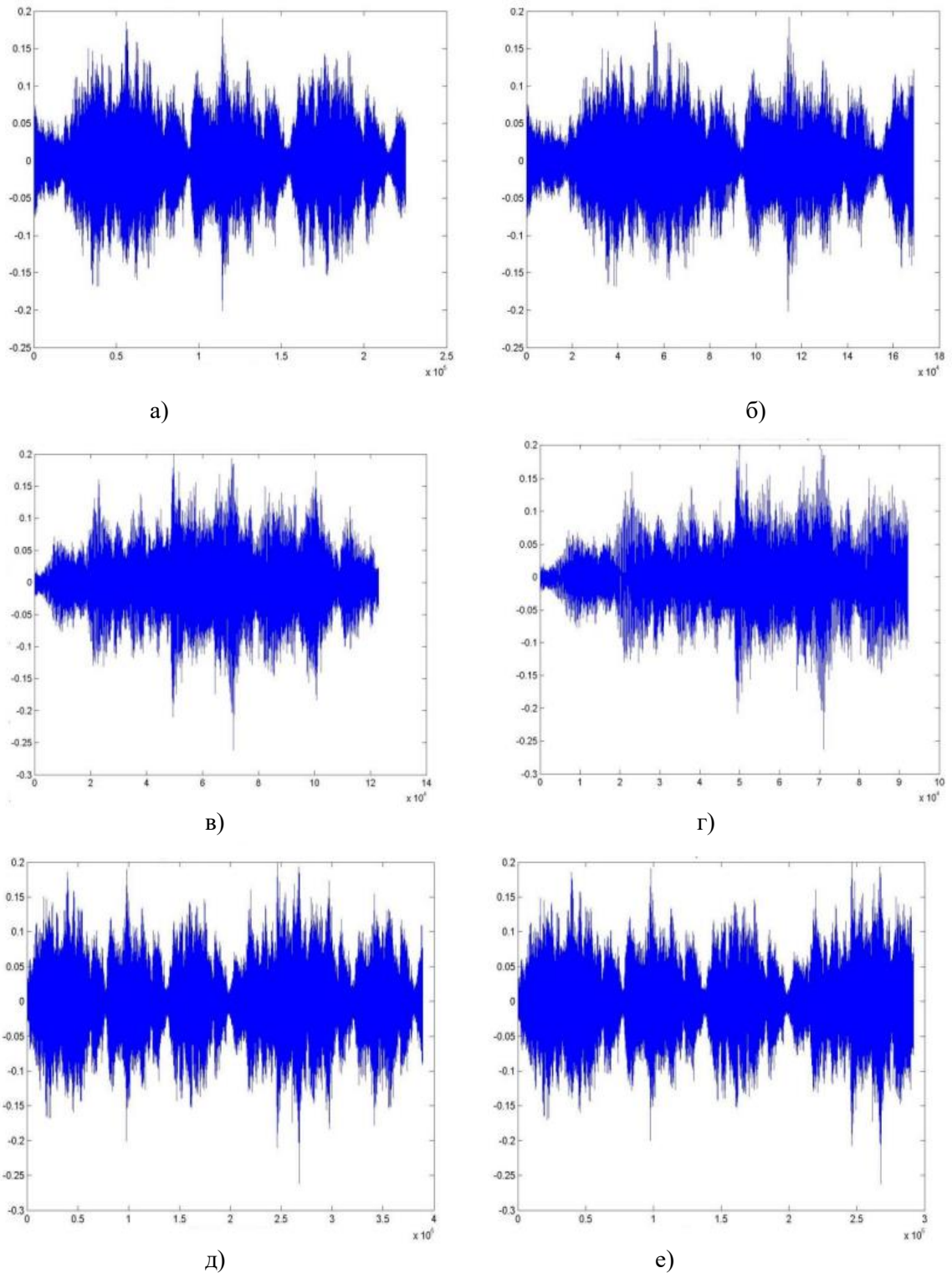


Рисунок 2 – Вихідний сигнал та результуючий сигнал 11025 Гц (а,б); вихідний аудіо-сигнал та результуючий сигнал 22050 Гц (в, г) вихідний аудіо-сигнал та результуючий сигнал 44100 Гц (д,е)

На рисунку 3 наведено залежності середньої квадратичної та абсолютної похибок спотворення контейнера та ймовірності похибки відновлення контейнера від амплітуди вбудовуваної послідовності, отримані для вихідних аудіофайлів з різними частотами дискретизації сигналу.

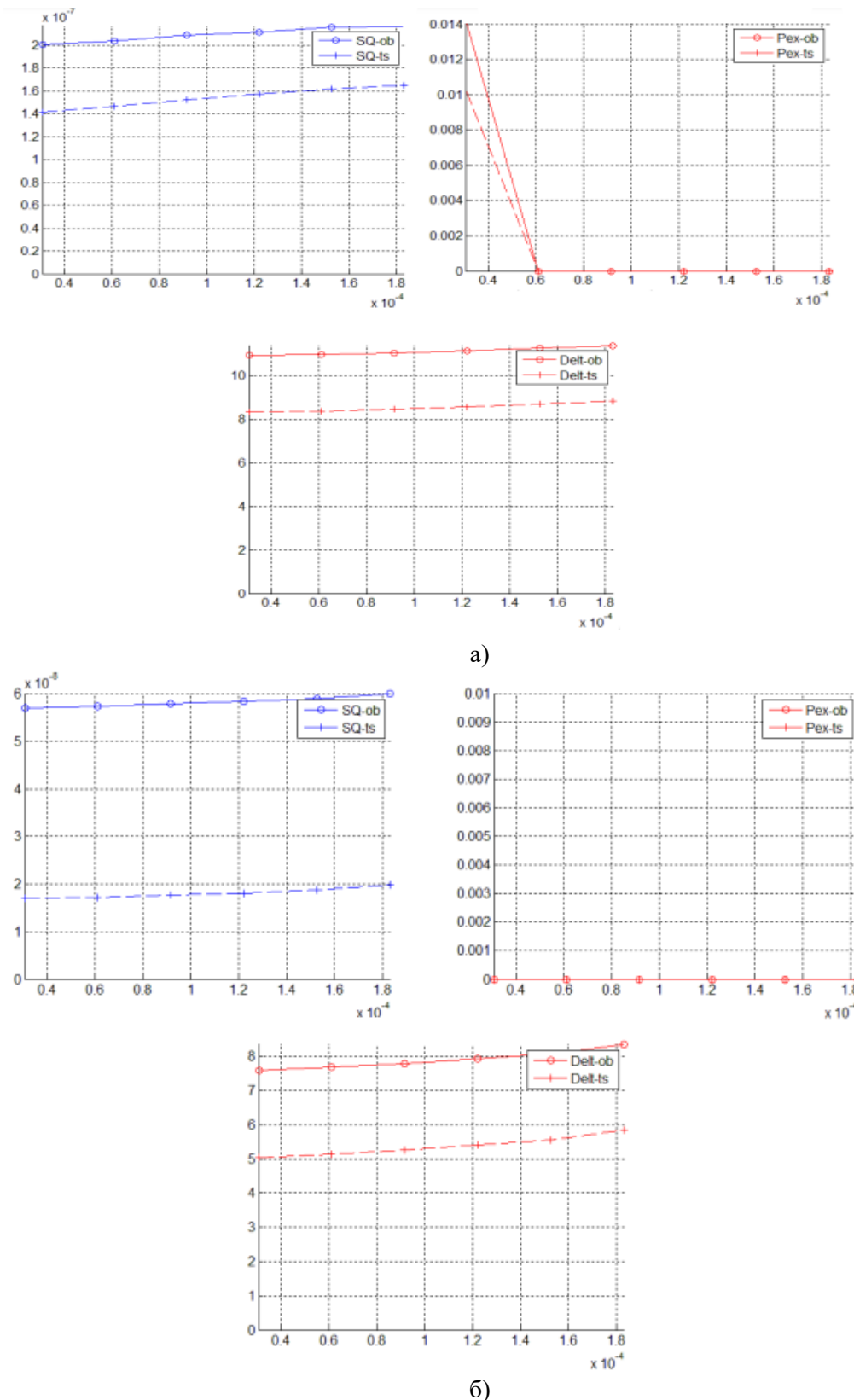


Рисунок 3 – Залежність середньоквадратичної похибки спотворення контейнера, ймовірності похибки відновлення ЦВЗ, абсолютної помилки спотворення контейнера для аудіофайлів з різними частотами дискретизації сигналу 11025 Гц (а); 22050 Гц (б);

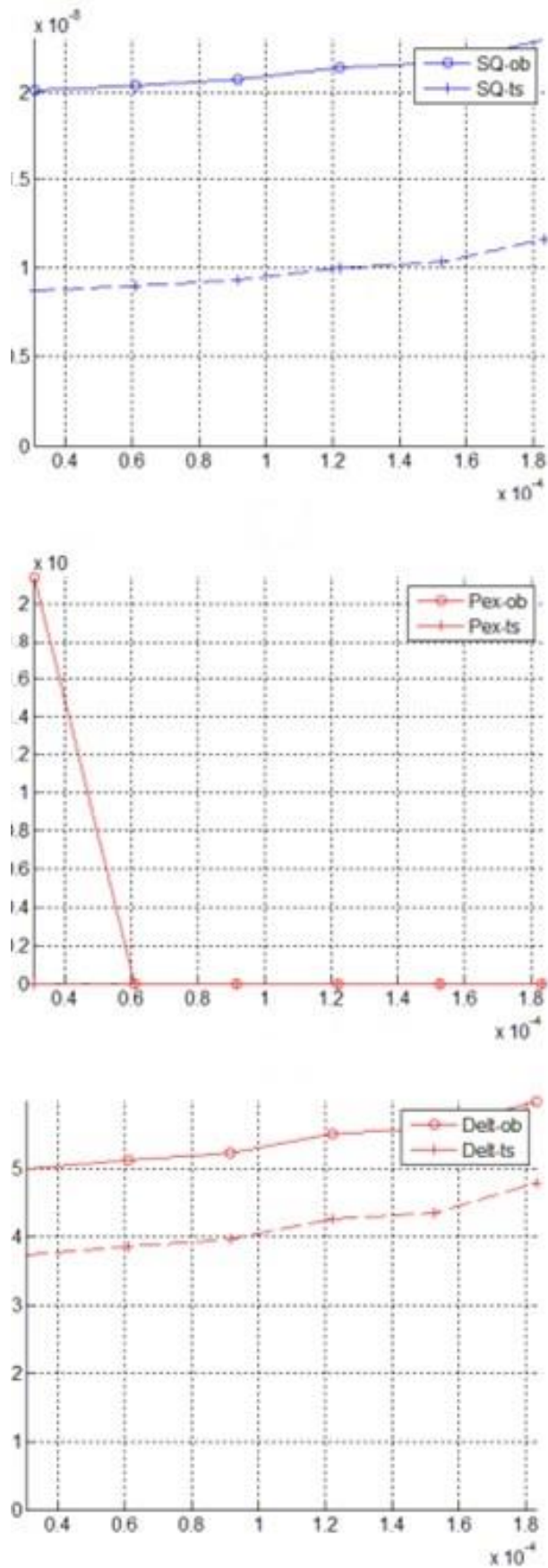


Рисунок 4 – Залежність середньоквадратичної похибки спотворення контейнера, ймовірності похибки відновлення ЦВЗ, абсолютної похибки спотворення контейнера для аудіофайлів з частотою дискретизації сигналу 44100 Гц

При роботі з аудіо-контентом часто зустрічається не тільки моносигнал, який передає один канал звучання, а й більше каналів. Серед часто використовуваних варіацій кількості каналів передачі аудіо сигналу використовується стерео сигнал, який включає 2 канали.

На рисунку 5 наведено залежність середньої квадратичної та абсолютної помилок спотворення контейнера та ймовірності помилки відновлення контейнера від амплітуди вбудовуваної послідовності для вихідного сигналу з параметрами 22050 Гц, 16 біт, сигнал стерео.

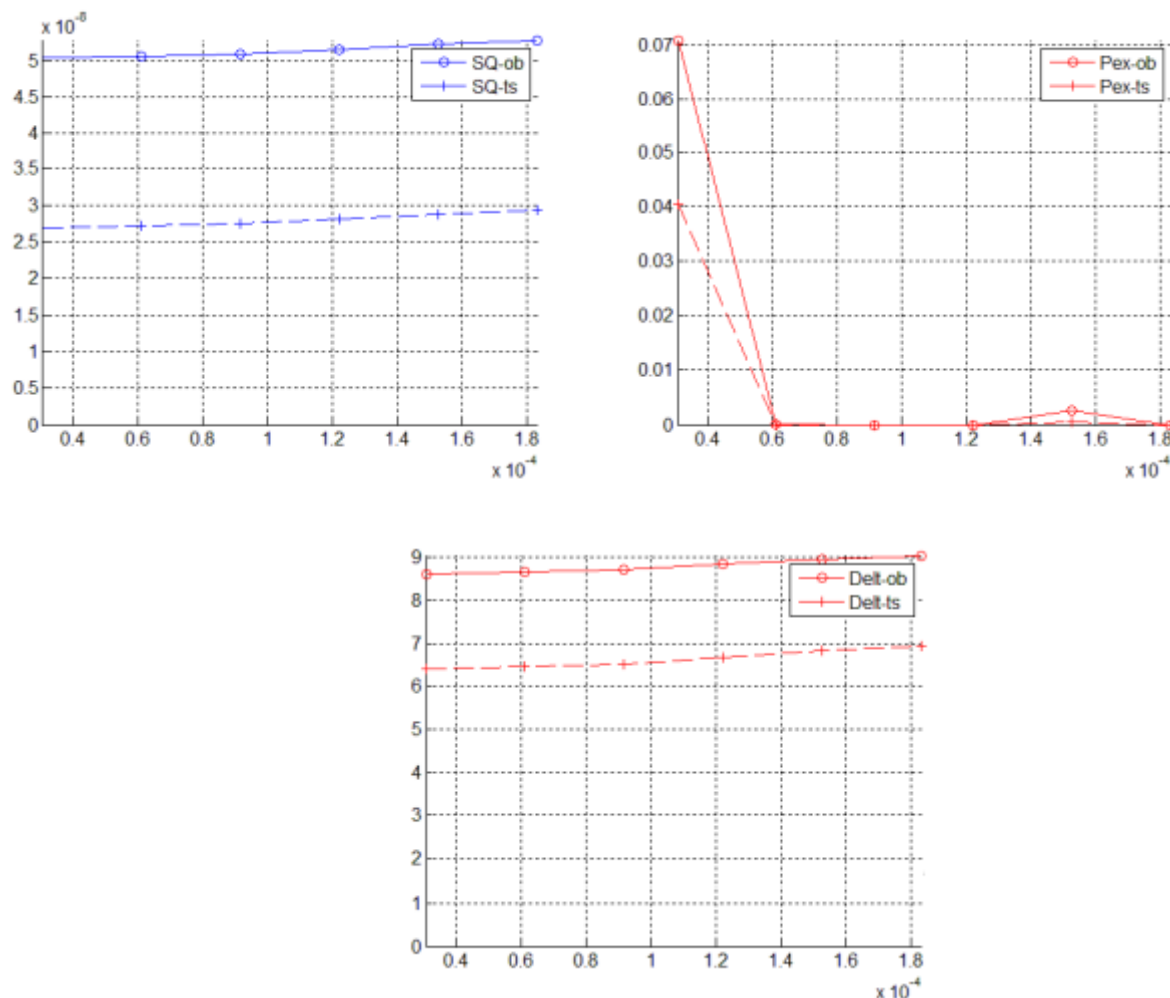


Рисунок 5 – Залежність середньої квадратичної, абсолютної помилок спотворення контейнера та ймовірності помилки відновлення контейнера від амплітуди вбудовуваної послідовності для вихідного сигналу з параметрами 22050 Гц, 16 біт, сигнал стерео

Як показали результати експериментів, алгоритми для аудіо-файлів продемонстрували хороші результати з мінімізації спотворень при створенні маркованих контейнерів (алгоритм функціонального вбудовування та нейронетичний алгоритм модифікації усередненого значення блоків), а також при відновленні ЦВЗ.

Висновки. Результати проведених експериментальних досліджень для аудіо-файлів (WAV формату) показують можливість приховування великих обсягів інформації, за рахунок того, що вибрані формати не передбачають попередньої декомпресії та наступного після приховування стиснення (наприклад, MPEG), при цьому проведено дослідження для сигналів різної бітності та частоти дискретизації. При реалізації вказаного підходу до створення ЦВЗ для аудіо-файлів забезпечується відносна середня квадратична помилка спотворення фрагментів контейнера порядку $10^{-7} \dots 10^{-8}$ при ймовірності помилки відновлення елементів двійкової послідовності ЦВЗ порядку $10^{-1} \dots 10^{-2}$ залежно від частоти дискретизації сигналу.

Інформаційні джерела

1. Бабич І. В. Огляд стеганографічних методів перетворення інформації. Захист інформації. 2022. № 1. С. 18-24
2. Навроцький Д. О. Дослідження результатів стеганографічного приховування повідомлень у файлах як засобу забезпечення захисту інформації. Вісник Національного технічного університету України «КПІ». 2022. №50. С. 121-128.
3. Куц С. Алгоритм формування стеганограм на основі LSB-методу. Захист інформації і безпека інформаційних систем. Л. 2021. С. 110-111.
4. Anderson, R. J. Stretching the Limits of Steganography. Information Hiding Springer Lecture Notes in Computer Science. 2016. P. 39-48.
5. Bender, W. Techniques for Data Hiding. IBM Systems Journal. 2016. Vol. 35. P. 313-336.
6. Fridrich, J. Steganalysis of LSB Encoding in Color Images. Proceedings of ICME. 2020. Vol. 3. P. 1279-1282.
7. Gustavus, J. Simmons. The History of Subliminal Channels. II IEEE Journal on Selected Areas of Communications. 2018. Vol. 16. №4. P. 452-461.
8. Johnson, N. F. Information Hiding: Steganography and Watermarking - Attacks and Countermeasures. Springer. 2021. 137 p.
9. Popa, R. An Analysis of Steganographic Techniques. The Polytechnic University of Timisoara. Faculty of Automatics and Computers. Department of Computer Science and Software Engineering. 2021. 59 pp.
10. Schneier, B. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C. John Wiley and Sons. 2016. 784 p.

Svitlovskiy Y.

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

MODELS AND ALGORITHMS FOR CREATING DIGITAL WATERMARKS FOR AUDIO FILES

To justify and investigate models and algorithms for creating digital watermarks in audio files based on the construction of neural network compressive maps, in the interests of increasing stealth and stability, as well as ensuring the universality of algorithms for creating CVZ. The methods and approaches of the modern theory of information processes and systems were used, namely: methods of the theory of statistical solutions; methods of probability theory and mathematical statistics; technologies of object-oriented programming; theory of random processes and fields, methods and technologies of statistical simulation modeling; methods of digital processing and recognition of signals and images; apparatus of artificial neural networks; methods of computer steganography, as well as the technology of direct computer experiment, which is performed in relation to real objects of digital content.

Algorithms for creating digital watermarks for audio format objects have been obtained. Algorithms for creating digital watermarks for objects, the format of data presentation, as well as researching their possibility for the use of sound format files. Methods and results of the analysis of statistical visibility and the possibility of restoring the built-in sequence of TVS by a third-party observer for assessing the quality of TVS in objects of sound formats. The expediency of building and using universal compressive transformations for steganographic embedding of CVZ into container objects of various types with a minimum level of dispersion of distortions on the basis of artificial two-layer forward propagation neural networks has been established. The results of the research are of practical importance for the development of special mathematical and software in the interests of creating digital watermarks as means of hidden marking of digital content objects, which provide effective control of the use of intellectual property objects, as well as for audio data diagnostics.

Key words: digital watermark, audio file, neural network, algorithm, marking, digital content, audio data, root mean square error.

ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!

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

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

2. Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

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

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

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

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

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

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

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

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

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

Основні наукові спеціальності:

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

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

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

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

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

Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:

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

Статті приймаються українською або англійською мовами. Вартість публікації становить **70 грн.** за 1 сторінку.

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

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

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

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

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

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

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

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Здано у виробн. 10.05.2024 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 14. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.