МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2022-21

Збірник наукових праць

Випуск 21
(грудень, 2022)

Луцьк 2022

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 5 від 27 грудня 2022р.

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

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк, грудень 2022р. – Луцьк: ЛНТУ, 2022.-148с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, особливості експлуатації та повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та 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

© Луцький національний технічний університет, 2022р.

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, проректор з науково-педагогічної роботи та досліджень, 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, Словаччина.
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, Польща.
10	**Богуш Вісніцкі (Bogusz Wisnicki),** PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща.
11	**Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek)**, PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецінська морська академія, Польща.
12	**Станіслав Іван (Stanislaw Iwan)**, доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща.
13	**Збігнев Матущак (Zbigniew Matuszak)**, доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща.
14	**Андрущак Ігор Євгенович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Луцький національний технічний університет, Україна.
15	**Ткачук Анатолій Анатолійович,** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
16	**Гулай Любомир Дмитрович**, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
17	**Денисюк Віктор Юрійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
18	**Коломієць Леонід Володимирович**, доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна.
19	**Куц Юрій Васильович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
20	**Лапченко Юрій Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
21	**Марчук Ірина Вікторівна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
22	**Луців Ігор Володимирович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
23	**Марек Опеляк (Marek Opielak),** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчового машинобудування, Люблінська політехніка, Польща.

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

ЗМІСТ

Borys SEREDA, Irina KRUGLYAK, Dmytro SEREDA, Irina PALEHOVA THERMODYNAMIC MODELING OF OBTAINING WEAR-RESISTANT COATINGS USING COMPOSITE POWDER CHARGESЯ	**6**
Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А. МЕТОД ВИЗНАЧЕНННЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ В БУДІВЛЯХ ІСТОРИЧНОЇ ЗАБУДОВИ	**13**
Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОХИБОК МЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕМІЩЕНЬ ОБ'ЄКТІВ	**20**
Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М. РАДІОЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ	**27**
Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ТРУБОПОРШНЕВИХ ПОВІРОЧНИХ УСТАНОВОК ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПАКТ-ПРУВЕРА З КОМПАРАТОРОМ	**32**
Kruglyak I., Sereda B., Palehova I., Sereda D., Kiphoruk D. OBTAINING COMPLEX CHROME COATINGS USING COMPOSITE POWDER CHARGE	**38**
Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В., КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ 3D-ПРИНТЕРА МОДУЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ НА БАЗІ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	**43**
Лапченко Ю.С., Мельник М.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НЕРІВНОСТЕЙ ПОВЕРХНІ	**51**
Малісевич В.В., Середюк О.Є. МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ВИЗНАЧЕННІ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА	**59**
Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОДАВАЧІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ТЕРМОМЕТРІВ	**70**
Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А. СЕНСОРИ ВИГИНУ НА ОСНОВІ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ З МОДИФІКОВАНОЮ ГІДРОФОБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ	**76**
Пастущин Л.Б. ВАЛІДАЦІЯ НЕСТАНДАРТИЗОАНИХ МЕТОДИК КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	**84**
Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	**90**
Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ СТРУМУ В ПЛАСТИНЦІ КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОРА	**95**
Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П. ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТОРЦЕШЛІФУВАЛЬНИХ АВТОМАТІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ОПЕРАЦІЙНУ ТОЧНІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ПІДШИПНИКОВОЇ СТАЛІ ШХ15	**103**
Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М. ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ ПЛОСКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ	**108**
Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А. ДО АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ	**113**
Смолянкін О.О., Федік Л.Ю. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КАРБАМІДУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	**119**
Станько А.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛАСТИЧНИХ ЩІТКОПОДІБНИХ ГВИНТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ	**125**
Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б. ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ВІД ДІАМЕТРА ПРОХІДНОГО ОТВОРУ ГОДИННИКОВИХ КАМЕНІВ ЯК ЗВУЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ МІКРОВИТРАТОМІРІВ ГАЗУ	**132**
Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О. СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВИХ НАНОНИТОК, ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ МЕТАЛО-СТИМУЛЬОВАНОГО ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ	**137**

УДК: 621.793.6
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-01
Borys SEREDA, Irina KRUGLYAK, Dmytro SEREDA, Irina PALEHOVA
Dnipro State Technical University

THERMODYNAMIC MODELING OF OBTAINING WEAR-RESISTANT COATINGS USING COMPOSITE POWDER CHARGES

Abstract. *The article provides an overview and analysis of obtaining wear-resistant coatings for parts working in aggressive environments of metallurgical production. The solution of these problems is associated with the hardening of the surface layers of products. Their role in the durability of machines and mechanisms has especially increased at the present time, since the development of most industries is associated with an increase in loads, temperatures, and the aggressiveness of the environments in which the part operates. The titanizing process is an effective method of increasing the reliability and durability of machine parts, tools and technological equipment due to the creation of titanized layers on the surface of the machined parts, which have a unique set of physical and chemical properties. The results of thermodynamic modeling for the production of wear-resistant titanium-based coatings for the determination of rational composite powder charges are presented. The use of thermodynamic modeling makes it possible to quantitatively model and predict the composition and properties of complex heterogeneous, multi-element, multi-phase systems in a wide range of temperatures and pressures, taking into account chemical and phase transformations. The results of research on wear resistance revealed that, when tested under friction-sliding conditions, the best wear resistance among the considered alloyed titanium coatings was achieved by coatings alloyed with chromium and silicon. Their wear resistance is 1.7-1.9 times higher than that of coatings obtained under isothermal conditions.*

Key words: thermodynamics, modeling, wear resistance, coating, composite powder charges.

Formulation of the problem. Obtaining wear-resistant coatings for parts working in aggressive environments of metallurgical production is relevant, as it allows to increase the reliability and durability of parts of machines, devices, installations, increase their efficiency and, consequently, the issues of metal economy, combating corrosion and wear of machine parts, increase resource of metallurgical equipment before overhaul. The solution of these problems is associated with the hardening of the surface layers of products. Their role in the durability of machines and mechanisms has especially increased at the present time, since the development of most industries is associated with an increase in loads, temperatures, and the aggressiveness of the environments in which the part operates. The titanizing process is an effective method for increasing the reliability and durability of machine parts, tools, and technological equipment due to the creation of chromium-plated layers on the surface of the machined parts, which have a unique set of physical and chemical properties [1]. Titanium coatings on steels and alloys can significantly improve corrosion resistance, heat resistance, hardness and wear resistance, and often obtain the required combinations of them. However, all known powder methods are energy intensive and time consuming. In this regard, the development of new composite powder charges is an urgent development of new technologies that allow you to control the composition and structure of coatings, provide the necessary performance characteristics with a minimum time of their formation. This paper considers the technology of chemical-thermal treatment of steels using composite powder charges for obtaining complex diffusion layers [2–3].

Analysis of recent research and publications. You can change the surface properties in the required direction in various ways. They can be conditionally divided into two types: 1) applying a new material with the necessary properties to the surface; 2) change in the composition of the surface layer of the metal, providing the desired change in properties. In the first case, such well-known coatings as galvanic, chemical, etc. are used. Non-metallic materials, such as enamel, paint, and various synthetic materials, are also applied to the surface of metal alloys. In the second case, the surface layers of the metal are subjected to diffusion chemical-thermal treatment (CHT), as a result of which a new alloy, different from the core, is formed on the surface of the product. CHT allows to obtain an alloy of almost any composition in the surface layer of the product, and to provide a set of necessary properties - physical, chemical, mechanical, etc. Among the methods of surface hardening, titanium coatings obtained by various methods are widely used [4–5]. Titanium coatings on steels and alloys can significantly improve corrosion resistance, heat resistance, hardness and wear resistance, and often obtain the required combinations of them.

© Borys SEREDA, Irina KRUGLYAK, Dmytro SEREDA, Irina PALEHOVA

For the processing of mills from carbon alloy steels, methods for creating various functional coatings are widely used. Coating - locally changes the surface ball, which is characterized by the same chemical and structural-phase warehouse, which is similar to the base material.

Classification of the main methods and methods of modifying surface materials induced in robots . In this way, the classification of covers is given according to the technological principle. Methods for applying coatings in robots are classified according to the type of application of the coating material on the surface of the base material and are divided into two great groups: contact methods, in some cases, the contact of the base material with the elements of the coating, which may be in a phase (gas, solid, rare) ; non-contact or chemical methods, with which materials are covered, they arrive at the connected person. The classification is given for the demonstration of the limiting process of forming the coating, as well as for the kinetic assessment of the concentration of the coating element in the surface ball of the lining.

When choosing a method or a method of applying coatings, the main factors are reaching the tasks of optimal authority, warehouse and structure of coating, its density (homogeneity, number of defects), dimensions of parts, serialization of manufacturing, economic efficiency.

Setting objectives. Our task is to conduct thermodynamic modeling of obtaining wear-resistant titanium-based coatings to determine rational composite powder charges. The use of thermodynamic modeling makes it possible to quantitatively model and predict the composition and properties of complex heterogeneous, multi-element, multi-phase systems in a wide range of temperatures and pressures, considering chemical and phase transformations [6,7]. This makes it possible to effectively study thermochemical processes in existing high-temperature installations and to optimize the conditions for their implementation, to predict the results of high-temperature interactions, to sharply shorten the terms and reduce the cost of research, to successfully systematize theoretical and experimental information.

Presenting main material. Calculation of the thermodynamic equilibrium of arbitrary systems (determination of all equilibrium parameters, thermodynamic properties, chemical and phase composition) is carried out by minimizing the isobaric-isothermal potential or maximizing the entropy of the system while considering all potentially possible individual substances q in equilibrium. Calculation methods developed on the basis of variational principles of thermodynamics [8] allow us to assume that:

1. Of all the permissible values of moles Mq of individual substances in a thermodynamic system, those that minimize the thermodynamic potential of the system correspond to the equilibrium values;

2. Of all the permissible values of the energy Ui contributed by each independent component (atom), those that maximize the total energy contribution of individual atoms to the system correspond to the equilibrium values.

The constituent parts of the system are all possible and existing substances in various states of aggregation, formed from the elements included in the composition of the studied system. Components of a thermodynamic system are substances that are minimally necessary for the assembly of this system. The number of components is equal to the number of substances present in the system, minus the number of independent reactions connecting these substances. In thermodynamic modeling, condensed individual substances are taken to be compounds with a multiple of the atoms that form them.

Substances with fractional stoichiometric coefficients are considered solutions. Condensed phases include compounds in solid (crystalline or amorphous) and liquid states. Individual substances that have the same chemical formula, but are included in different phases, are considered to have different constituent substances. The constituent parts of the gas phase are molecules, radicals, atoms, ions and electron gas.

Calculation of the thermodynamic equilibrium of arbitrary systems (determination of all equilibrium parameters, thermodynamic properties, chemical and phase composition) is carried out by minimizing the isobaric-isothermal potential or maximizing the entropy of the system while taking into account all potentially possible individual substances q in equilibrium. Calculation methods developed on the basis of variational principles of thermodynamics allow us to assume that:

1. Of all the permissible values of moles Mq of individual substances in a thermodynamic system, those that minimize the thermodynamic potential of the system correspond to the equilibrium values;

2. Of all the permissible values of the energy Ui contributed by each independent component (atom), those that maximize the total energy contribution of individual atoms to the system correspond to the equilibrium values.

The constituent parts of the system are all possible and existing substances in various states of aggregation, formed from the elements included in the composition of the studied system. Components of a thermodynamic system are substances that are minimally necessary for the assembly of this system. The number of components is equal to the number of substances present in the system, minus the number of

independent reactions connecting these substances. In thermodynamic modeling, condensed individual substances are taken to be compounds with a multiple of the atoms that form them.

Substances with fractional stoichiometric coefficients are considered solutions. Condensed phases include compounds in solid (crystalline or amorphous) and liquid states. Individual substances that have the same chemical formula, but are included in different phases, are considered to have different constituent substances. The constituent parts of the gas phase are molecules, radicals, atoms, ions and electron gas.

Extensive thermodynamic parameters of the system, that is, proportional to the amount or mass of the substance in the system, are the volume V, entropy S, internal energy U, enthalpy H, Helmholtz energy F (F = U - T · S), Gibbs energy G (G = H - T · S); intensive thermodynamic parameters, i.e. independent of the quantity or mass of the system, are pressure P, thermodynamic temperature T, concentration, molar and specific thermodynamic quantities. Thus, to determine the specific parameters of the system state, it is necessary to specify two of its characteristics (for example: P and T, V and T; I and P, etc.), the mass content of chemical elements in the working body, a list of potentially possible individual substances in equilibrium with their thermodynamic functions - entropy and enthalpy. The ASTRA.4 software package also provides for the possibility of considering some non-ideal conditions: exclusion of any individual substances from the number of equilibrium components; the possibility of assigning (fixing) concentrations of one or more substances with subsequent calculation of the balance for the rest of the system; consideration of non-ideal condensed solutions by the problem of excess Gibbs energy; accounting of the own volume occupied by condensed substances.

When performing the thermodynamic modeling procedure in the direction of determining technical and economic characteristics, in addition to regression equations, it is necessary to use additional coupling equations based on the use of the second law of thermodynamics, as well as heat and energy balance equations [9].

Equations based on the use of the second law of thermodynamics include:

The equation of the specific entropy of air at the end of the adiabatic compression process ($S_{2'}$):

$$S_{2'} = s_1 + R_B \cdot \ln(\pi_к), \tag{1}$$

where R_B– technical gas constant air, kJ/kg; combustion in the exhaust tract of the gas turbine installation;

Equation of specific entropy of fuel at the end of the adiabatic expansion process ($S_{4'(T)'}$):

$$S_{4'(T)} = s_{3(T)} - R_T \cdot \ln(\pi_T), \tag{2}$$

where R_T – technical gas constant of fuel, kJ/kg;

The balance equations include: the equation of the coefficient of excess air in the combustion chamber:

$$\alpha = L_0^{-1} \cdot [Q_н - (h_{3'(T)} - h_{1(T)}) / (h_{3'(B)} - h_2)], \tag{3}$$

where L_0 *and* Q_H– stoichiometric coefficient and lower calorific value of calculated fuel (kJ / kg);
$h_{3'(T)}$ and $h_{1(T)}$ – specific enthalpies of fuel at the exit and entrance to the combustion chamber;
$h_{3'(B)}$ and $h_{2(K)}$ – specific enthalpies of air at the exit and entrance to the combustion chamber, kJ / kg;

The equation of the specific enthalpy of the mixture of air and fuel at nodal points:

$$h_i = h_{iк} + d_T \cdot h_{iT}, \tag{4}$$

where *i* - where and - the index of the corresponding nodal point;

The equation of the average temperature of the mixture of components at the nodal point:

$$T_2 = h_2 / (h_{2K} / T_{2к} + d_T \cdot h_{1(T)} / T_{1T}); \tag{5}$$

The equation of the average temperature of the mixture of components at nodal points:

$$T_i = h_i / (h_{i(B)} / T_{i(B)} + d_T \cdot h_{i(T)} / T_{iT}), \tag{6}$$

where *i* - index of the corresponding nodal point.

Research on the mechanism of formation of protective titanium coatings on structural materials was carried out using the method of thermodynamic analysis of possible chemical reactions between the components of the system. For this purpose, the calculation of the interaction of the gas saturating medium, which is formed in the process of thermal self-ignition of the SBC charge, was performed.

© Borys Sereda, Irina Kruglyak, Dmytro Sereda, Irina Palehova

As can be seen from figures 1-4, at 700–1500 K, the decomposition products of the activators I2 and NH_4Cl react with the components of the charge to form gaseous compounds: AlCl, $AlCl_2$, Al_2Cl_6, AlI, AlI_2, AlI_3,Al_2I_6, AlHCl, AlH_2Cl, AlOCl, SiCl, $SiCl_2$, $SiCl_3$, $SiCl_4$, SiHCl, SiI, SiI_2, SiI_3, SiI_4, CrCl, $CrCl_2$, $CrCl_3$, CrI_2, CrI_3, TiCl, $TiCl_2$, $TiCl_3$, TiOCl, $TiOCl_2$, $TiCl_4$, TiI, TiI_2, TiI_3,TiI_4

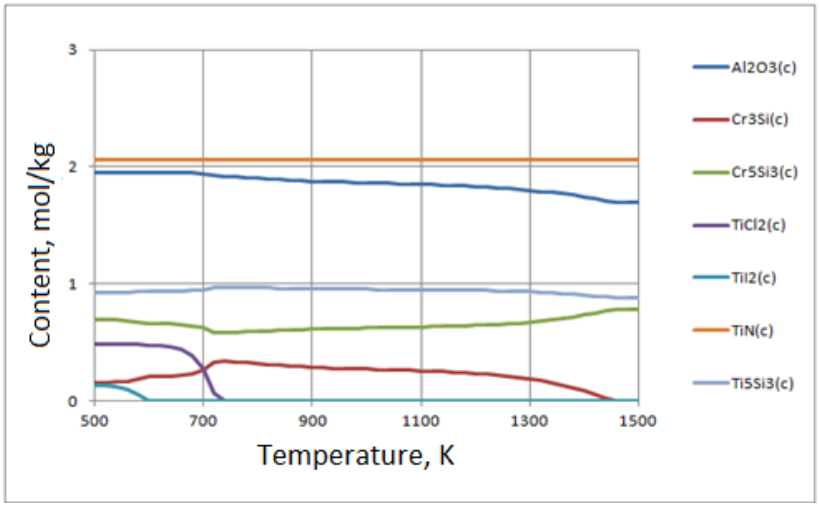


Fig. 1 – The content of condensed products in the reactor in the mode of thermal self-ignition of SHS- charge for the system:
23% XC + 20% Ti + 8% Si + 43% Al_2O_3 + 2% I_2 + 4% NH_4Cl

As the temperature increases, the number of products in the gaseous phase increases (for Ti compounds from 10^{-16} to 10^{-4} 4 mol/kg, for Al compounds from 10^{-19} to 10^{-1} mol/kg, for Si compounds from 10^{-18} to 10^{-6} mol/kg, for Cr compounds from 10^{-16} to 10^{-3} mol/kg) and condensed products are released.

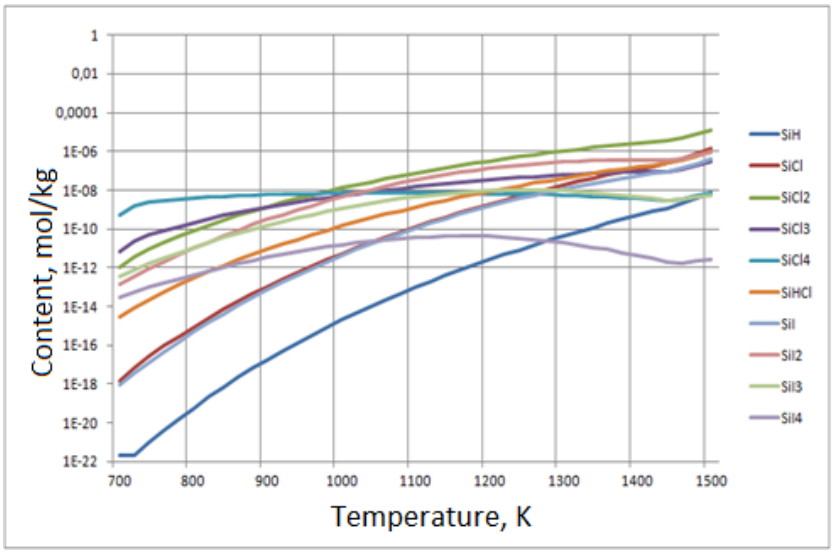


Fig. 2 – The content of gaseous compounds of silicon in the reactor in the mode of thermal self-ignition of SHS - charges for the system:
23% XC + 20% Ti + 8% Si + 43% Al_2O_3 + 2% I_2 + 4% NH_4Cl

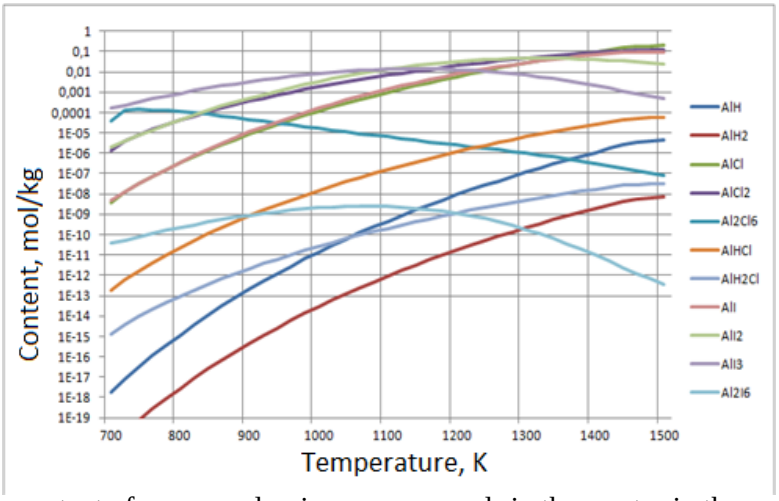


Fig. 3 –The content of gaseous aluminum compounds in the reactor in the mode of thermal self-ignition of SHS- charge for the system:
23% XC + 20% Ti + 8% Si + 43% Al_2O_3+ 2% I_2 + 4% NH_4Cl

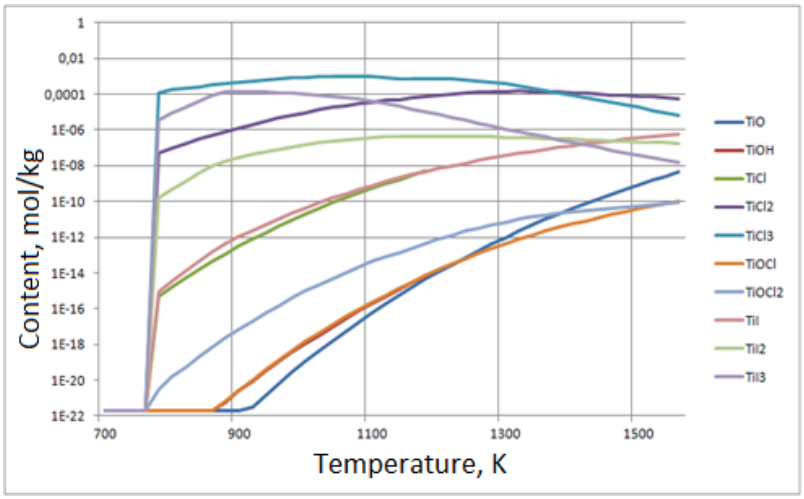


Fig. 4 –The content of gaseous compounds of titanium in the reactor in the mode of thermal self-ignition of SHS - charge for the system:
23% XC + 20% Ti + 8% Si + 43% Al_2O_3+ 2% I_2 + 4% NH_4Cl

Starting from a temperature of 700 ºK, the reaction products decompose, which confirms the appearance of decomposition products and a sharp increase in the number of moles of gas. Gaseous products interact with the elements of the powder system (Al, Si, Ti, and Cr) and convert them into the gaseous phase.

To calculate the equilibrium of chemical reactions in the system being studied, as well as to determine the equal mass compositions of the components involved in these reactions, the equilibrium constants of all independent reactions possible in the given charges are determined.

With the determination of the concentration of gaseous products for the calculation of equal-mass compositions of powder SVS charges in the mode of thermal self-ignition, there are data on two thermodynamic properties: enthalpy Ht and Gibbs energy GT. Enthalpy is chosen in order to determine the thermal effect of the considered chemical reactions; at $\Delta H<0$, the reaction takes place with heat release, and at $\Delta H>0$ – with heat absorption [10–13].

Gaseous products interact with the elements of the powder system (Al, Si, Ti, Cr) and are transferred to the gas phase (appear AlCl, $AlCl_2$, Al_2Cl_6, AlI, AlI_2, AlI_3, Al_2I_6, AlHCl, AlH_2Cl, AlOCl, SiCl, $SiCl_2$, $SiCl_3$, $SiCl_4$, SiHCl, SiI, SiI_2, SiI_3, SiI_4, CrCl, $CrCl_2$, $CrCl_3$, CrI_2, CrI_3, TiCl, $TiCl_2$, $TiCl_3$, TiOCl, $TiOCl_2$, $TiCl_4$, TiI, TiI_2, TiI_3, TiI_4 etc.). At temperatures above 700 K, the proportion of the condensed phase practically does not change. This fact gives reason to assume that in the temperature range of 700–1500 K reactions occur with the release of a condensed phase, but without a change in the number of moles, that is, there is a chemical transport of elements to the processed part.

For the system: 23% XC + 20% Ti + 8% Si + 43% Al_2O_3+ 2% I_2 + 4% NH_4Cl, in the temperature range of 700–1500 K, the content of gaseous compounds of silicon, aluminum and titanium in the reactor, in the mode of thermal self-ignition – charge consists of: SiH, SiCl, $SiCl_2$, $SiCl_3$, $SiCl_4$, SIHCl, SiI, SiI_2, SiI_3, SiI_4; AlH, Al_2, AlCl, $AlCl_2$, Al_2Cl_6, AlHCl, AlH_2Cl, AlI, AlI_2, AlI_3, Al_2I_6; SiH, SiCl, $SiCl_2$, $SiCl_3$, $SiCl_4$, SIHCl, SiI, SiI_2, SiI_3, SiI_4, as well as the content of condensed products: Al_2O_3(c), Cr_3Si(c), Cr_5Si_3(c), $TiCl_2$(c), TiI_2(c), TiN(c), Ti_5Si_3(c).

The results of the test on the SMT-1 friction machine in friction-sliding conditions are shown in figura 5.

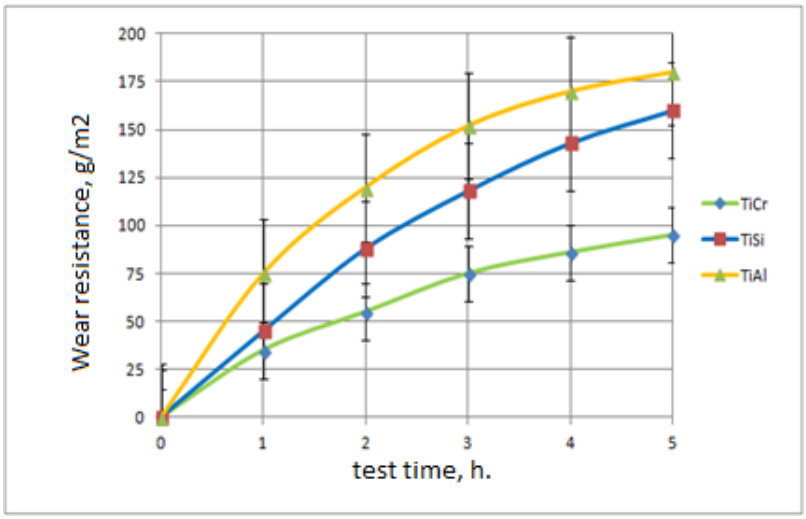


Fig. 5 –The rate of wear of protective coatings on steel 45 when tested on the SMT-1 friction machine ($t_{pr.}$=1050°C, $\tau_{drying\ time}$ =60 min.)

The results of the tests revealed that, when tested under friction-sliding conditions, the best wear resistance among the considered alloyed titanium coatings was achieved by coatings alloyed with chromium and silicon (Fig. 5). Their wear resistance is 1.7-1.9 times higher than that of coatings obtained under isothermal conditions.

Conclusions. The conducted thermodynamic modeling of the production of wear-resistant titanium-based coatings made it possible to determine the rational gas environment of composite powder charges. The use of thermodynamic modeling made it possible to quantitatively model and predict the composition and properties of complex heterogeneous, multi-element, multi-phase systems in a wide range of temperatures and pressures, considering chemical and phase transformations.

References

1. Підвищення експлуатаційної стійкості та ефективності роботи промислового транспорту в умовах металургійного підприємства : монографія. Б. П. Середа, С. М. Турпак, І. В. Кругляк, О. О. Острогляд, Д. Я. Муковська, Д. Б. Середа, Д. О. Кругляк. – Кам'янське : ДДТУ, 2021. – 272 с.

2. Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Б.П. Середа, Л.П. Банніков, С.В. Нестеренко, І.В. Кругляк, О.С. Гайдаєнко, Д.Б. Середа – 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. Sereda B., Palehova I., Sereda D. Modeling of phase transformation in the production of self-propagating high-temperature synthesis of wear-resistant coatings/ Material science and technology 2018. Columbus, Ohio, USA – P. 206–211.

5. Sereda B., Sereda D., Sereda I. Surface coatings improve the characteristics of materials obtained under SHS conditions/ Material science and technology – 2019. Portland, Orgon, USA. – P. 403-408.

6. Sereda B., Belokon Y., Sereda D., Kruglyak I. Modeling of processes for the production of bassed TiAl and NiAl in the conditions of SHS for aerospace applications, Materials Science and Technology. Portland, 2019, 137–142.

© Borys Sereda, Irina Kruglyak, Dmytro Sereda, , Irina Palehova

7. Sereda D. Obtaining surface titanium coatings for enhance the material performance in SHS conditions /Sereda, B., Sereda, D., Palehova, I. Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 82–87**.**

8. Kruhliak I., Sereda B., Palehova I., Bilozor I., Prolomov A., Kiforuk D., Stasevich O., Krivko R. Modeling and optimization of chromium alloyed coatings production using CPS. Mathematical modeling. 2022. №. 2 (47). P. 98–104.

9. Sereda B., Palehova I., Sereda D. Modeling of phase transformation intheproduction of self-propagating high-temperature synthesis of wear-resistant coatings. *Material science and technology*. Columbus. Ohio, USA. 2018. P.216–221.

10. Sereda B.P., Maksymenko P.M., Haydayenko O.S., Sereda D.B. Modeling of the gaseous environment to obtain aluminized coating doped with chromium under non-stationary temperature conditions. Mathematical modeling. 2019. №. 2 (41). P. 159–165.

11. Sereda B.P., Palekhova I.V. Thermodynamic modeling of the formation of multicomponent titanium coatings under the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. Mathematical modeling. 2019. № 1 (40). P. 202–207.

12. Sereda B.P., Palekhova I.V., Haydayenko O.S., Sereda D.B. Modeling of the process of titanium coating on designing materials in powdered environments. Mathematical modeling. 2018. № 2 (39). P. 147–153.

13. Sereda B., Khina B., Kruglyak I, Sereda D. Modeling of temperature fields obtained during the formation of coatings under non-stationary temperature conditions. *Mathematical modeling.* 2021. №. 1 (44). P. 68–75.

Борис Середа, Ірина Кругляк, Дмитро Середа, Ірина Палехова
Дніпровський державний технічний університет

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. У статті наведено огляд та аналіз отримання зносостійких покриттів для деталей, що працюють в агресивних середовищах металургійного виробництва. Вирішення цих завдань пов'язане із зміцненням поверхневих шарів виробів. Особливо зросла їх роль в довговічності машин і механізмів в даний час, оскільки розвиток більшості галузей промисловості пов'язаний зі збільшенням навантажень, температур і агресивності середовищ, в яких працює деталь.

Процес титанування є ефективним методом підвищення надійності та довговічності деталей машин, інструментів і технологічного обладнання за рахунок створення на поверхні оброблюваних деталей титанованих шарів, які мають унікальний комплекс фізико-хімічних властивостей. Наведено результати термодинамічного моделювання виробництва зносостійких покриттів на основі титану. Використання термодинамічного моделювання дає змогу кількісно моделювати та прогнозувати склад і властивості складних гетерогенних, багатоелементних, багатофазних систем у широкому діапазоні температур і тисків з урахуванням хімічних і фазових перетворень. Результати досліджень зносостійкості показали, що при випробуванні в умовах тертя-ковзання найкращу зносостійкість серед розглянутих легованих титанових покриттів досягають покриття, леговані хромом і кремнієм. Їх зносостійкість в 1,7-1,9 разів вище, ніж у покриттів, отриманих в ізотермічних умовах.

Ключові слова: *термодинаміка, моделювання, зносостійкість, покриття.*

© Borys SEREDA, Irina KRUGLYAK, Dmytro SEREDA, Irina PALEHOVA

УДК 658.328.3
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-02
Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

МЕТОД ВИЗНАЧЕНННЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ В БУДІВЛЯХ ІСТОРИЧНОЇ ЗАБУДОВИ

Проведений аналіз аварійної роботи електромереж в будівлях історичної забудови міст, в яких дуже збільшилась насиченість приміщень технічними системами життєзабезпечення, в результаті чого збільшилось навантаження електричних мереж і виділення теплової енергії в ділянках з великими перехідними опорами (ВПО). Елементи захисту від ВПО в таких електромережах не передбачаються.

Запропонований метод дозволяє визначити аварійні електромережі з ВПО, які перетворюють частину електричної енергії в теплову, що приводить до займання електричних кабелів. Він оснований на порівняні величини напруги, поданої на вхід електромережі, яка досліджується, з величиною напруги на електричному приладі даної електромережі. Це дозволяє завчасно виявити можливе електричне джерело займання, електромережу з ділянками ВПО, завчасно її відремонтувати, або замінити на нову. Це зменшить ризик виникнення пожежі по причині теплової дії електричної енергії.

Ключові слова: *Пожежа, пожежна безпека, електричне джерело займання, електромережа, оцінка технічного стану електромережі, великі перехідні опори.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах серед проблем державного будівництва особливого значення набувають питання забезпечення безпеки особи від загроз соціального, природного та техногенного характеру. Однією зі складових суспільної безпеки є пожежна безпека, що передбачає захист особи, майна, суспільства та держави від пожеж.

У зв'язку зі значним зростанням електричних потужностей апаратури, якою користуються в навчальних та адміністративних закладах, розміщених в багатоповерхових будинках історичної забудови міст, останнім часом особливу актуальність та гостроту проблеми набуває стан їхньої пожежної безпеки.

Згідно зі статистикою, з початку 2019 року в Україні сталося 95 тисяч 819 пожеж, з них понад 29 тисяч сталися у житловому секторі. Ці пожежі забрали життя 1 тисячі 697 людей [1]. Основними джерелами виникнення пожеж в історичних будівлях, в більшості випадків, є аварійна робота прихованої внутрішньо будинкової електромережі, прокладеної під оздоблювальними матеріалами, та порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок [2].

У прихованих мережах внутрішньо будинкового електропостачання електричний струм протікає через велику кількість з'єднань з ВПО, які часто виконуються забороненим методом «скрутки», що підвищує ймовірність загорання ізоляції провідників в місті з'єднання. Тепловий вплив електричного струму на ізоляцію проводів на ділянках з ВПО різко знижує її механічні та діелектричні властивості. При перетіканні електричного струму по пошкодженій ділянці електромережі з ВПО через великий опір струму на з'єднаннях падає напруга, збільшується втрата потужності і виділяється теплова енергія, котра призводить до перегрівання провідників електромережі. Якщо розігріті ділянки провідників стикаються з горючими матеріалами, виникає спалахування або загорання ізоляції проводів, що може призвести до появи полум'я.

Особливо небезпечні такі аварійні режими для будинків історичної забудови, в яких розташовуються адміністративні та навчальні заклади, де від однієї мережі живиться багато споживачів електроенергії, а з'єднання, відгалуження й окінцювання жил дротів і кабелів як раніше, так і зараз не завжди здійснюється за допомогою опресування, зварювання або паяння, що приводить до збільшення ВПО окремих ділянок електромережі та стає причиною виникнення пожежі. При наявності ВПО окремих ділянок електромережі апарати захисту не спрацьовують, тому що величина струму в провідниках не збільшується, а навпаки падає. Виділення тепла від ділянки електромережі з ВПО продовжується значний проміжок часу. У зв'язку з тривалими аварійними режимами роботи електромережі з ВПО є більш пожежонебезпечними, ніж електромережі з короткими замиканнями.

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

Місця з'єднання жил проводів і кабелів, а також з'єднувальні та відгалуджувальні затискачі повинні мати мінімальний перехідний опір, щоб уникнути їх перегрівання і пошкодження ізоляції стиків. Важливість зменшення виділення тепла в окремих ділянках електромереж із ВПО для зниження ризику виникнення пожежі вважається загальноприйнятим.

Аналіз літературних даних. Як показують дослідження, реальні значення опору струмопровідного кола електромережі з ділянками ВПО становлять від 150% до 300% значень струмопровідного кола без ділянок з ВПО, тому для підвищення пожежної безпеки будівель необхідно контролювати величину перехідного опору струмопровідного кола та якість провідників. Особливу увагу слід звертати на приховані електромережі історичних будівель.

Втрата потужності на ділянках підвищення опору з'єднань повинна бути не більше втрати потужності в неушкоджених жилах цих проводів і кабелів. В даний час в чинних нормативно-технічних документах, питання контролю під час експлуатації стану електричних мереж напругою до 1000 В, а саме: величини перехідного опору внутрішньо будинкових електромереж , до останнього часу не розглядаються.

В роботах [1, 2, 3] наведений звіт про основні результати діяльності у 2019 році центрального органу виконавчої влади, Державної служби України з надзвичайних році, діяльність якої спрямовується і координується Кабінетом Міністрів України, для реалізації державної політики у сфері цивільного захисту, захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій та запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятувальної справи, гасіння пожеж, пожежної та техногенної безпеки, діяльності аварійно-рятувальних служб, а також гідрометеорологічної діяльності.

З метою оцінювання рівня пожежної небезпеки в роботах [4, 5] наведені результати порівняння величин електричного опору ідеальних ділянок електромереж низької напруги та реального електричного опору електромереж при наявності ділянок з ВПО. Запропоновано нормувати значення опору струмопровідного кола, що дозволяє кількісно оцінити показники пожежної безпеки побутових електромереж, матеріалів та монтажу під час їх експлуатації. Робота підтверджує, що реальний перехідний опір значно перевищує розрахунковий.

В роботі [6] надана методика вимірювання електричного опору струмопровідних жил і провідників та наведені рекомендації по його корекції у випадку розрахункової похибки, яка перевищує 2%.

В роботі [7] проаналізований стандартизований метод оцінки пожежної небезпеки електроустановок та досліджено його застосування для розрахунку імовірності виникнення пожежі внаслідок зростання перехідного опору контактних з'єднань. На підставі цього розроблені методологічні засади та технічні засоби контролю стану електричних мереж житлових та громадських будівель.

В роботі [8] проведений аналіз вимог щодо вогнестійкості кабельних ліній систем протипожежного захисту, встановлених у міжнародних, європейських та національних нормативних документах. Виявлено, що в закордонних стандартах не визначені вимоги щодо вогнестійкості таких елементів кабельних ліній, як кабельні короби, лотки і драбини. За результатами аналізу сформульовані вимоги щодо вогнестійкості кабельних ліній та їхніх елементів.

У роботі [9] проводиться удосконалення вимог до вогнестійкості кабельних ліній живлення та управління систем протипожежного захисту будинків і споруд для подальшої їх реалізації в національних стандартах та будівельних нормах України. Якщо такі кабелі мають функціонувати в умовах пожежі протягом більше ніж 1 хв, то вони повинні бути вогнестійкими в умовах випробування за стандартом температурного режиму.

У дослідженнях [10] запропоновано структурну схему універсального точного аналізатора опору електричних мереж до 1000В із можливістю цифрової обробки та легкої видозміни його структури для реалізації необхідних функціональних і сервісних властивостей, шляхом включення до його структури відповідних вузлів. Запропонована структура приладу дозволяє виявити потенційно пожежонебезпечні ділянки електричних мереж низької напруги у процесі їх експлуатації.

В статті [11] проводяться дослідження надійності пожежної безпеки електричних мереж, які полягають у розробці методологічних засад та технічних засобів контролю електричних мереж житлових та громадських будівель. За результатами досліджень рекомендується здійснювати контроль опору побутових електромереж не лише на стадії введення в

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

експлуатацію, а й періодично під час їх експлуатації. Такий підхід дозволяє здійснювати діагностику та контроль стану електромереж з використанням неруйнівних методів.

В статті [12] наведені результати вимірювань опору ділянок електромереж низької напруги та аналіз їх сумарного опору з метою використання даних результатів при оцінюванні рівня пожежної небезпеки. На підставі цього запропоновано нормувати значення опору струмопровідного кола, що дозволяє кількісно оцінити показники безпеки побутових електромереж під час експлуатації.

В [13] удосконалено метод вимірювання опору та метод випробування кабелів і проводів у складі електричної мережі, застосування яких дозволяє збільшити ефективність виявлення пожежонебезпечних ділянок мережі та виробів. Розроблено алгоритм визначення місць зростання перехідних опорів контактних з'єднань, з використанням якого удосконалено метод випробувань ділянок електромереж низької напруги під час експлуатації. Створено універсальний точний аналізатор опору двопровідних електричних мереж з можливістю легкої видозміни його структури для реалізації необхідних функціональних і сервісних властивостей шляхом включення до її складу відповідних вузлів.

Існує безліч методик оцінки технічного стану електричної мережі будівель та споруд, проте оцінку протипожежного стану електромережі напругою до 1000 В, як правило, проводять тільки за рахунок вимірювання опору ізоляції кабелів [2]. Такі вимірювання не дають змогу визначити електромережі з осередками ВПО, які в відповідних умовах можуть призвести до виникнення пожежі [3, 4].

Вимірювання перехідного опору мережі дозволяє проконтролювати якість з'єднання і виключити експлуатацію електромереж з ділянками ВПО і, як наслідок, попередити можливість виникнення пожежі.

Визначення протипожежної надійності електромережі виконується різними методами та засобами, а саме: вимірювання опору ізоляції провідників відносно нейтралі; вимірювання сумарного опору всієї електромережі та порівняння з еталонним опором, розрахованим математично та інші [4]. Кожна методика має певні переваги та недоліки. Проте жодна з методик, що наведена вище, не дозволяє розрахувати ймовірність виникнення пожежі.

Постановка задачі та її розв'язання. Тому було проведено ряд досліджень з метою удосконалення існуючих методик у даному напрямі. Як показують статистичні дані, однією з основних причин виникнення пожежі в історичних багатоповерхових будівлях, пов'язаних з експлуатацією електромережі, є присутність ВПО в електричному колі, і завчасне прогнозування аварійного стану кабелю дозволяє попередити виникнення пожежі та зменшити ризик її виникнення [5, 6]. Тому розробка методу та засобу прогнозування наявності ВПО у прихованій будинковій електричній мережі історичних будівель дозволить понизити рівень ризику виникнення пожежі. Вимірювання перехідного опору є обов'язковим тільки для контактів збірних шин, струмопроводів і ошиновки відкритих розподільчих пристроїв тільки для електромережі напругою вище 1000 Вольт.

Для визначення ВПО в прихованих електромережах низької напруги (нижче 1000 В) пропонується метод, оснований на порівнянні величини потужності витраченої на забезпечення споживача $P_{вх}$, з потужністю, використаною електричним споживачем $P_{вих}$**.**

Частина вхідної витраченої потужності $P_{вх}$ розподіляється між потужністю, яка споживається електроприладами споживача ($P_{вих}$**)**, та втраченою потужністю в провідниках електромережі ($P_{пр}$), яка перетворюється в теплову енергію та витрачається на їх нагрівання та потужністю окремих ділянок провідників з ВПО ($P_{ВПО}$**)**. Величину корисної потужності поглинутої навантаженням споживача ($P_{вих}$) можна визначити по формулі (1):

$$P_{вих} = P_{вх} - \left(P_{пр} + P_{ВПО}\right). \quad (1)$$

Вхідна потужність визначається формулою (2):

$$P_{вх} = U_{вх} \times I_{мер}, \quad (2)$$

де: $U_{вх}$ – вхідна напруга електромережі, $I_{мер}$ **–** сила струму електромережі.

Вихідна потужність визначається формулою (3):

$$P_{вих} = U_{вих} \times I_{мер}, \quad (3)$$

де $U_{вих}$ вихідна напруга електромережі на навантаженні споживача.

При аварійному режимі роботи електромережі, а саме: надмірній втраті потужності в електричних провідниках $P_{пр}$ та з'єднаннях з наявними ділянками ВПО $P_{ВПО}$, виникає недопустиме перегрівання провідників; плавлення ізоляційної оболонки кабелю; виникає

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

коротке замикання та перевантаження електромережі і, як наслідок, запалювання оточуючих горючих будівельних конструкцій та виникнення пожежі. Втрата потужності в електричній мережі приводить до зменшення величини використаної потужності $P_{вих}$ в порівняні з величиною витраченої потужності $P_{вх}$**.** Опираючись на вищевказане, в якості критерію оцінки пожежобезпечності електромережі, введемо коефіцієнт пожежобезпечності електромережі *K***,** який показує частку вхідної потужності, що марно втрачається на нагрівання електричної мережі:

$$K = P_{вх} / P_{вих}. \quad (4)$$

Підставляючи в формулу (4) формули (2) та (3), отримаємо вираз визначення величини коефіцієнта пожежобезпечності *K*, як відношення вхідної напруги $U_{вх}$ до вихідної $U_{вих}$, формула (5):

$$K = P_{вх} / P_{вих} = U_{вх} \times I_{мер} / U_{вих} \times I_{мер} = U_{вх} / U_{вих}. \quad (5)$$

Відповідно до (5), для ідеального провідника електромережі вихідна напруга $U_{вих}$ повинна дорівнювати вхідній $U_{вх}$, а величина $K = 1$. Збільшення величини *K* свідчить про збільшення втрат потужності в електромережі за рахунок збільшення величини опору електричної мережі в наслідок наявності ділянок з ВПО, зменшення поперечного перерізу провідників, та інших причин.

Таким чином електромережа буде пожежобезпечною, якщо величина відношення вхідної напруги до вихідної напруги буде наближатися до 1.

Коефіцієнт *K* показує, яку частку електричної потужності поглинає прихована електромережа з ділянками ВПО. Так, при $K = 1$, електромережа зовсім не поглинає потужності (тобто являє собою ідеальний провідник), а при $K = 10$ потужність, поглинута електромережею з ділянками ВПО, в 10 разів перевищує корисну потужність, поглинуту споживачем.

Вимірювання коефіцієнту *K* дозволяє контролювати якість провідників електромережі і своєчасно виключити аварійний режим роботи електромережі з наявними ділянками ВПО та попередити можливість виникнення пожежі внаслідок теплової дії електричної енергії.

Згідно нормативним документам величина перехідного опору ділянки шин в місці контактного з'єднання не повинна перевищувати значення опору ділянки шини без контактного з'єднання такої ж довжини більш ніж в 1,2 рази.

Відповідно до вимог нормативних документів ПУЕ І ПТЕЕС електричну мережу можна признати безаварійною, якщо величина поглинутої потужності не перевищує 20%, або виконується умова

$$K<1,2.$$

Для підтвердження можливості використання запропонованого методу визначення електромережі з наявними ділянками ВПО були проведені експериментальні дослідження. Електрична принципіальна схема для експериментального дослідження електричного кола з ділянками ВПО показана на рис. 1.

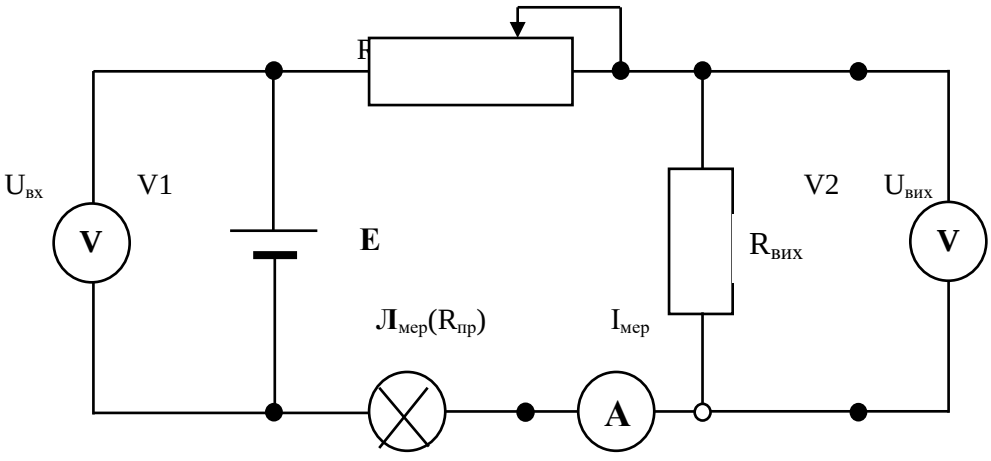


Рис. 1. Електрична принципіальна схема для експериментального визначення параметрів електричного кола з ділянками ВПО.

$U_{вх}$– еталонне джерело живлення; **Л**$_{мер}$- електрична лампочка для імітації опору провідника $R_{пр.}$; потенціометр $R_{ВПО}$ – імітує опір ділянки з ВПО; резистор $R_{вих}$ – імітує навантаження споживача; V1, V2 - вольтметри**,** **А** – амперметр.

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

Послідовно підключені елементи формують замкнуте електричне коло. Вольтметр V2, підключений паралельно до резистора навантаження електромережі для вимірювання величини вихідної напруги електромережі $U_{вих} = U_{Rвих.}$.

Фотосхеми з'єднань елементів експериментальної установки для оцінки ВПО представлені на рис. 2.

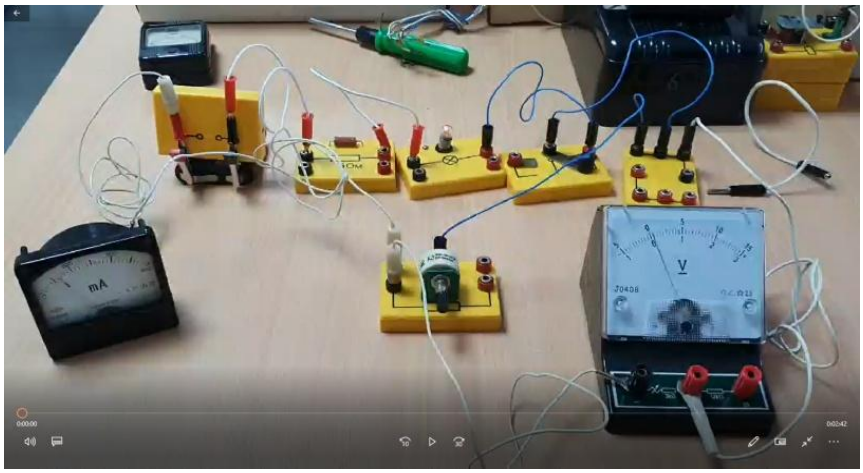


Рис. 2. Фото експериментальної установки для визначення аварійного стану скритої електричної мережі**.**

Для вимірювання використовуються: 1. – міліамперметр (А) діапазон вимірювання 1 – 600 мА для виміру величини електричного струму електромережі (ланцюга); 2 – джерело електроживлення **(Е)** електрична батарея напругою $U_{вх}$ = 5 В; 3 – потенціометр **($R_{ВПО}$)**, імітуює опір ділянки електромережі з ВПО; 4 – електрична лампочка ($Л_{мер}$), на напругу 3.5 В, яка імітує опір провідника $R_{пр}$ та візуально демонструє зміну сили струму електромережі $I_{мер}$; 5 – електричний перемикач (К1) для комутації електричного ланцюга; 6 – розмножувач електричних провідників; 7 – вольтметр V2 для вимірювання напруги $U_{вих}$ на резисторі $R_{вих}$ діапазон вимірювання (1 – 3 В).

Хід випробування. Від сухо зарядженої батареї (джерела напруги $U_{вх}$), яке імітує стабілізоване джерело електроживлення, на вхід електричної мережі (контакти 1, 2) подається постійна напруга $U_{вх..}$*=2,5 В*. Сила електричного струму ($I_{мер}$), протікаючого по електричному колу, вимірюється амперметром А. Напруга $U_{вих}$ (контакти 3, 4) на еталонному резисторі ($R_{вих}$). вимірюється вольтметром V2 по шкалі 5 В.

Для зміни величини опору ($R_{ВПО}$) ділянки мережі з ВПО використовувався потенціометр. При збільшенні величини опору $R_{ВПО}$ величина напруги $U_{вих}$ на резисторі $R_{вих}$ зменшується. Напруга $U_{вих}$ на еталонному резисторі ($R_{вих}$). вимірюється вольтметром V2. Після одержання даних розраховувались значення коефіцієнта $K = U_{вх} / U_{вих}$. Результати вимірювання наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань коефіцієнтів пожежонебезпеки електричної мережі (ланцюга)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	9	10
$I_{мер}$, струм мережі, А	0.125	0.124	0.110	0.10	0.09	0.08	0.065	0.06
$U_{вх}$, вхідна напруга, В,	2,5	2,5	2,5	2,5	2.5	2,5	2,5	2,5
$U_{вих}$, вихідна напруга, В,	0.025	0.375	0.625	1.25	2.133	2.10	2.25	2.5
$K = U_{вх.}/U_{вих.}$	100.8	6.667	4.00	2.0	1.198	1.19	1.11	1.00
Наявність недопустимо великих перехідних опорів	**так**	**так**	**так**	**так**	**ні, *межа***	**ні**	**ні**	**ні**

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

Аналіз результатів випробувань підтверджує, що даним методом вимірювання можливо визначити аварійні електромережі з наявними в них ділянками з великими перехідними опорами.

Висновки. Основні причини виникнення пожеж — порушення правил пожежної безпеки під час влаштування електромереж (28%) та експлуатації електроустановок (35,7%). Значна кількість пожеж особливо в історичних будівлях виникає через аварійний режим роботи електричних мереж та обладнання, а саме: наявність ділянок електромережі з великими перехідними опорами.

До останнього часу в чинних нормативно-технічних документах не розглядаються питання контролю стану електричних мереж напругою до 1000В під час експлуатації, та, зокрема, визначення аварійних прихованих внутрібудинкових електромереж з ділянками ВПО, що перевищують допустимі значення. Використання такої діагностики дозволяє своєчасно виявити пожежонебезпечний стан електромережі.

Запропонований метод визначення аварійних електромереж з ВПО, які споживають надлишкову потужність електроенергії, оснований на розрахунку відношення величини напруги поданої на вхід досліджуваної електромережі до величини напруги на підключеному до мережі електричному приладі дозволяє завчасно попередити виникнення пожежі у внутрішньо будинкових електромережах та зменшити ризик виникнення пожеж за рахунок теплової дії електричної енергії насамперед в будівлях історичної забудови міст України.

Інформаційні джерела

1. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році.

2. ДСНС України. ГУДСНС України з НС в Одеській обл. Рішення колегії №9 від 21 жовтня 2020 р. Про проведену роботу органів державного нагляду (контролю) у сфері цивільного захисту, техногенної та пожежної безпеки за 9-ть місяців 2020 року.

3. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. [Введ. 30.12.2014].

4. Ю. І. Рудик. Вимірювання опору електропроводок як метод визначення їх пожежної небезпеки. Зб. наук. праць *Методи та прилади контролю якості*, №23, 2009. Л: Державний університет безпеки життєдіяльності.

5. ДСТУ ГОСТ 12393:2017. Арматура контактної мережі залізної дороги лінійна. [Введ. 11.04.2017]. К.: ДП «УкрНДНЦ» − 42 с.

6. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 169 с.

7. Ю.І. Рудик, П.Г. Столярчук. Оцінка пожежної безпеки зростання перехідного опору контактних з'єднань електроустановок., 2010.

8. Р.І.Кравченко, П.О. Іллюченко. Удосконалення вимог щодо вогнестійкості кабельних ліній живлення та управління систем протипожежного захисту будинків і споруд. Науковий вісник. Укр НДІПБ, 2015, №1 (31). С. 83-92.

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

10. В.И. Гудим, П.Г. Столярчук, В.М. Ванько, Ю.И. Рудик. Технічне забезпечення нормативного рівня безпеки побутових електромереж. *Пожежна безпека,* №14, 2009. С. 40-46.

11. В.І. Гудим, Ю.І.Рудик, П.Г. Столярчук. Обґрунтування необхідності контролю стану електричних мереж при наявності апаратів захисту. *Пожежна безпека*, №9, 2006. С. 142-146.

12. Ю. І. Рудик. Вимірювання опору електропроводок як метод визначення їх пожежної небезпеки. *Методи та прилади контролю якості*, № 23, 2009.

13. Удосконалення нормативної бази для забезпечення якості електромереж низької напруги: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.01.02 / Ю.І. Рудик; Л.: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2007. 20 с.

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

A. Bespalova, V. Romanyuk, O. Dashkovskaya, O. Knysh, O. Faizulina
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

METHOD FOR DETERMINATION OF FIRE-HAZARDOUS ELECTRIC SYSTEMS IN HISTORICAL BUILDINGS

Annotation. *The analysis of the emergency operation of electrical systems in buildings of historical urban development, in which the saturation of premises with technical life support systems has greatly increased, as a result of which the load of electrical systems and the release of thermal energy in areas with high transient resistances, has increased. Elements of protection against high transient resistances in electrical systems are not provided.*

The proposed method makes it possible to determine an emergency electrical systems with a high transient resistance, which converts part of the electrical energy into heat, which leads to the ignition of electrical cables. It is based on comparing the magnitude of the voltage that is supplied to the input of the electrical systems under study, with the magnitude of the voltage at the output of this electrical systems at the terminals of the consumer's electrical appliance. This makes it possible to timely identify a possible electrical source of ignition, an electrical systems with high transient resistances sections, repair it in a timely manner or replace it with a new one, which will reduce the risk of a fire due to the thermal effect of electrical energy.

Key words*. Fire, fire safety, electrical source of ignition, electrical systems, assessment of the technical condition of the electrical systems, high transient resistances.*

© Беспалова А.В., Романюк В.П., Дашковська О.П., Книш О.І., Файзуліна О.А.

УДК 621.09: 681.5
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-03
Денисюк В.Ю., *к.т.н.,* **Пташенчук В.В.,** *к.т.н.*
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОХИБОК МЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕМІЩЕНЬ ОБ'ЄКТІВ

В статті розглядаються високоточні засоби контролю, що дозволяють безконтактним методом проводити вимірювання похибок лінійних переміщень об'єктів при їх значному діапазоні і в складних умовах експлуатації, в тому числі при наявності вібрацій. Здійснено огляд основних напрямів розробки методів і створення нових високоточних безконтактних вимірювальних приладів для контролю похибок лінійних переміщень об'єктів, обумовлених відступом від прямолінійності і кутовими зміщеннями об'єктів. Розглянуто принципи дії і схеми вимірювальних оптико-електронних приладів, в яких використовується сучасна елементна база, а також засоби цифрової обробки сигналів, в яких реалізуються ефективні алгоритми.

Ключові слова: *оптико-електронний прилад, похибка, переміщення, контроль, сигнал, лазерний вимірювач.*

Постановка проблеми. У різних областях техніки, в тому числі в приладобудуванні, верстатобудуванні, машинобудуванні, існує завдання вимірювання координат об’єктів, які переміщуються механічними пристроями уздовж заданих напрямів. Такими механічними пристроями можуть бути, наприклад, координатні столи. При цьому, крім вимірювання значень переміщень уздовж координатних осей, потрібно визначати похибки траєкторії руху об’єктів у вигляді поперечних переміщень, які характеризують відхилення від прямолінійності. Складність завдання подібного контролю обумовлена тим, що в більшості випадків потрібно вимірювати зазначені похибки переміщень в системі координат, яка пов’язана з конструктивними базами механізмів переміщення. Наприклад, при контролі похибок взаємного положення робочих органів механообробних верстатів і оброблюваної деталі потрібно проводити вимірювання відносно конструктивних баз, які пов’язані зі станиною верстата.

Для здійснення оперативного контролю похибок переміщення об’єктів відповідно до поставленого вище завдання, необхідні засоби, які також задовольняють вимогам за точністю, безконтактністю з об’єктом контролю і швидкодією. Найбільшою мірою цим вимогам задовольняють оптико-електронні засоби контролю, що працюють за різними фізичними принципами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу інформаційних джерел встановлено, що існують схемні рішення приладів, які дозволяють виконувати контроль похибок поперечних переміщень об’єктів [1, 4, 5]. В тому числі, відомі прилади, що працюють на інтерференційному принципі, які забезпечують проведення вимірювань з похибкою до десятих часток мікрометра [2, 3, 6].

Недоліком таких приладів є нестійкість впливу вібрацій, а також необхідність задання початку відліку вимірюваних величин переміщень. Відома функціональна схема лазерного вимірювача поперечних переміщень, який немає цих недоліків. Робота вимірювача заснована на фазовому методі вимірювання переміщень. Недоліком даного вимірювача є відносно висока похибка, яка складає десятки мікрометрів, а також малий діапазон вимірювань, що становить десяті частки метра, що обмежує можливості застосування цього приладу.

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

Викладення основного матеріалу. Металорізальні верстати повинні забезпечувати необхідну траєкторію взаємного переміщення оброблюваної заготовки і інструмента. Однак внаслідок недосконалості механічних вузлів, їх недостатньої жорсткості в умовах силових впливів при механічній обробці, а також впливу вібрацій механізмів верстата і фундаменту, температурних деформацій та інших факторів, реальна траєкторія взаємного переміщення заготовки та інструменту відрізняється від розрахункової. Всі ці фактори призводять до похибок виготовлення деталей. Верстати в залежності від точності роботи підрозділяються на

© Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

класи. Кожен верстат після виготовлення атестується на відповідність встановленим нормам точності. В процесі експлуатації початкова точність верстата змінюється, тому проводять регулярну атестацію і при необхідності – регламентні роботи для підтримання паспортних характеристик точності верстатного обладнання.

Крім цього, однією з тенденцій вдосконалення металорізального верстатного обладнання з ЧПК є використання методу активного контролю, що дозволяє коригувати параметри налаштувань верстата в технологічному процесі для отримання необхідної точності виготовлення деталей. Для реалізації цього методу верстати з ЧПК забезпечуються пристроями для оперативного контролю та управління переміщеннями механізмів і вузлів верстата.

Точність верстатів в значній мірі залежить від їх геометричних параметрів. Для вимірювання геометричних параметрів можливе використання різних методів і засобів. Переважна більшість методів заснована на механічному контакті з об'єктом контролю. Але для деяких параметрів передбачені методи вимірювання з використанням оптичних та оптико-електронних засобів. Зокрема, для оцінки точності координат лінійних переміщень використовується лазерний інтерферометр [4].

Крім цього, контроль прямолінійності переміщень робочих органів верстата може проводитися відповідно до схем, представленими на рис. 1 і рис. 2.

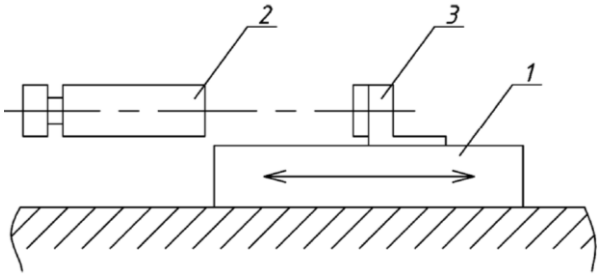


Рис. 1. Схема контролю прямолінійності переміщень робочих вузлів верстата з використанням зорової труби: 1 – зорова труба; 2 – контрольований робочий вузол; 3 – тест-об'єкт з маркою

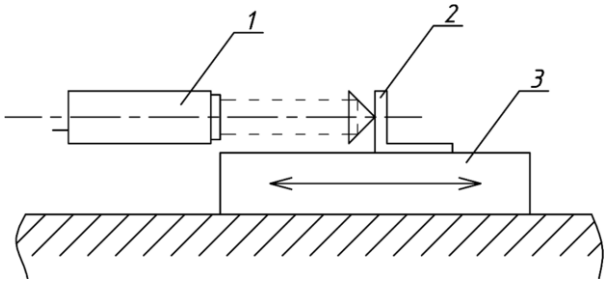


Рис. 2. Схема контролю прямолінійності переміщень робочих вузлів верстата з використанням лазера: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – контрольований робочий вузол

Відповідно до рис. 1 у схемі для контролю прямолінійності переміщень робочого вузла 2 використовується зорова труба 1 і тест-об'єкт з маркою 3, який кріпиться на робочому вузлі. Візирна вісь зорової труби орієнтується паралельно напрямку переміщення, при якому в крайніх положеннях робочого вузла збігаються покази, що характеризують положення зображення марки відносно нерухомої сітки. З певним кроком проводиться переміщення робочого вузла і реєструються покази. Вимірювання виконуються у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

В іншій схемі, відповідно до рис. 2, використовується лазер 1, фотоприймач 2, що встановлюється на контрольованому робочому вузлі. В даній схемі використовується координатно-чутливий фотоприймач, сигнал з якого містить інформацію про відносне переміщення лазерної точки відносно його центру. Вісь пучка лазерного випромінювання орієнтується вздовж напрямку переміщення по крайніх положеннях робочого вузла. Після цього проводять вимірювання при переміщенні робочого вузла із заданим кроком.

Контроль взаємної перпендикулярності і прямолінійності напрямків переміщень робочих вузлів може проводитися відповідно до схеми, представленої на рис. 3.

Лазер 3 встановлюється на робочий вузол 1 таким чином, щоб вісь його пучка була паралельна напрямку переміщення робочого вузла 1. На робочому вузлі 2 встановлюється позиційно-чутливий фотоприймач. Пента-призма 4 змінює напрямок лазерного пучка на 90^0, що відповідає номінальному напрямку переміщення робочого вузла 2. Виконується реєстрація сигналу з фотоприймача для двох випадків: у першому випадку робочий вузол 1 переміщається з певним кроком в межах всього діапазону переміщень, а робочий вузол 2 знаходиться в середньому положенні; у другому випадку робочий вузол 1 знаходиться в середньому положенні, а робочий вузол 2 переміщається з певним кроком в межах всього діапазону переміщень. За результатами вимірювань обчислюють відхилення від прямолінійності і перпендикулярності переміщень робочих вузлів 1 і 2.

Контроль сталості кутового позиціонування робочих вузлів верстата може проводитися

© Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

відповідно до схеми, представленої на рис. 4. У цій схемі для контролю сталості кутового позиціонування робочого вузла 2 використовується автоколіматори 1 і плоске дзеркало 3, яке кріпиться перпендикулярно напрямку переміщення. Візирна вісь коліматора орієнтується паралельно напрямку переміщення, при якому в крайніх положеннях робочого вузла збігаються покази, які характеризують положення автоколімаційного зображення відносно нерухомою сітки. З визначеним кроком проводиться переміщення робочого вузла і реєструються покази. Вимірювання проводяться у двох взаємно перпендикулярних напрямках, за результатами яких визначається зміна кутового положення робочого вузла при його переміщеннях.

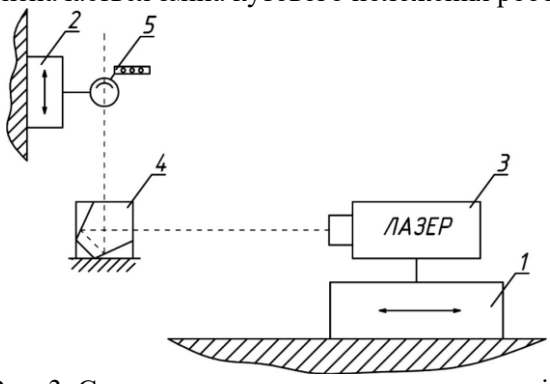


Рис. 3. Схема контролю перпендикулярності і прямолінійності напрямків переміщення робочих вузлів верстата: 1, 2 – контрольовані робочі вузли; 3 – лазер; 4 – пента-призма; 5 – фотоприймач

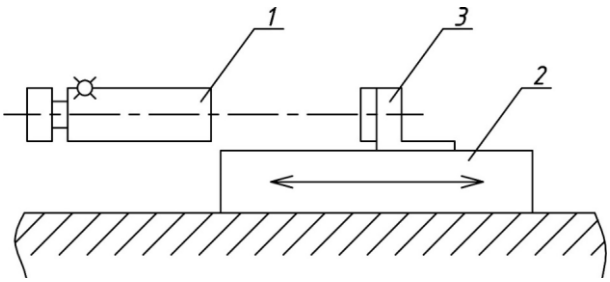


Рис. 4. Схема контролю сталості кутового позиціонування робочих вузлів верстата: 1 – автоколіматори; 2 – контрольований робочий вузол; 3 – плоске дзеркало

Існують методи, що дозволяють при атестації верстатів виконувати контроль безконтактним способом лінійних і кутових похибок переміщень при роботі механізмів, але вони передбачають використання в основному стандартного устаткування. У зв'язку з цим виникають обмеження на використання цих методів і схем вимірювання при рішенні задач, що виходять за рамки атестації геометричних параметрів верстатів, зокрема, задач оперативного автоматичного контролю параметрів переміщень механізмів в умовах їх експлуатації.

Для вимірювання значень робочих переміщень уздовж заданих напрямів використовуються різні оптико-електронні пристрої. В тому числі, для вимірювання переміщень з нанометровою точністю при атестації верстатів використовуються лазерні інтерферометри. У сучасному верстатному обладнанні широкого поширення набули вимірювачі лінійних переміщень фірми HEIDENHAIN, що дозволяють здійснювати контроль з точністю до 0,2 мкм.

У схемі інтерферометра для вимірювання поперечних переміщень (рис. 5) випромінювання від когерентного джерела 1 формується телескопічною системою 2 і діафрагмою 3 у вигляді паралельного пучка.

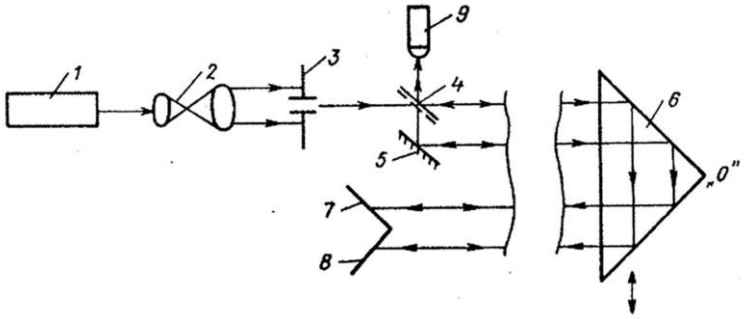


Рис. 5. Схема інтерферометра для вимірювання поперечних переміщень: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – телескопічна система; 3 – діафрагма; 4 – світлодільник; 5 – плоске дзеркало; 6 – прямокутна рівнобедрена призма; 7 і 8 – дифракційні решітки; 9 – фотоприймач

Світлодільником 4 і плоским дзеркалом формується два паралельних пучка, що утворюють плечі інтерферометра. Обидва пучка направляються на прямокутну рівнобедрену призму 6. Обидва відбиті від катетних граней прямокутної рівнобедреної призми 6 світлових

© Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

пучки потрапляють на дифракційні решітки 7 і 8, кожна з яких встановлена під автоколімаційним кутом до напрямку пучків. Після відбиття від дифракційних решіток лазерні пучки повертаються по тому ж оптичному шляху на світлодільник 4 і утворюють на фотоприймачі 9 інтерференційну картину. При поперечному переміщенні об'єкта з встановленою на ньому прямокутною рівнобедреною призмою 6 світлові промені переміщаються по дифракційних решітках 7 і 8. При цьому оптична довжина одного плеча інтерферометра зменшується, а другого – збільшується на таку ж величину, що підвищує чутливість до поперечних переміщень в два рази. Крім того, оптична різниця ходу залишається незмінною при поздовжньому переміщенні призми і її поворотах навколо осі, перпендикулярної площині головного перерізу призми [4].

Так як пристрій працює на принципі інтерференції світла, то необхідно задавати позначку «0» для початку відліку поперечних переміщень об'єкта, на якому кріпиться призма. Недоліком описаного пристрою також є обмеження по використанню в умовах дії вібрацій.

Недоліками пристрою інтерференційного типу є необхідність задання нульового положення відліку і нестійкість впливу вібрацій. Описаний пристрій придатний для використання, наприклад, в електронно-променевих літографах, де потрібні відносно невеликі переміщення столика і відсутні вібрації.

У пропонованому варіанті оптико-електронного приладу для контролю похибок лінійних переміщень, відмічені недоліки прототипу були усунені. Функціональна схема цього варіанту приладу, яка прийнята як базова, представлена на рис. 6. На відміну від прототипу – лазерного вимірювача поперечних переміщень у схемі базового варіанту замість тест-об'єкта у вигляді обертової радіальної міри використовується нерухомий транспарант 3, а замість аналізуючих діафрагм – цифрова телевізійна камера 6.

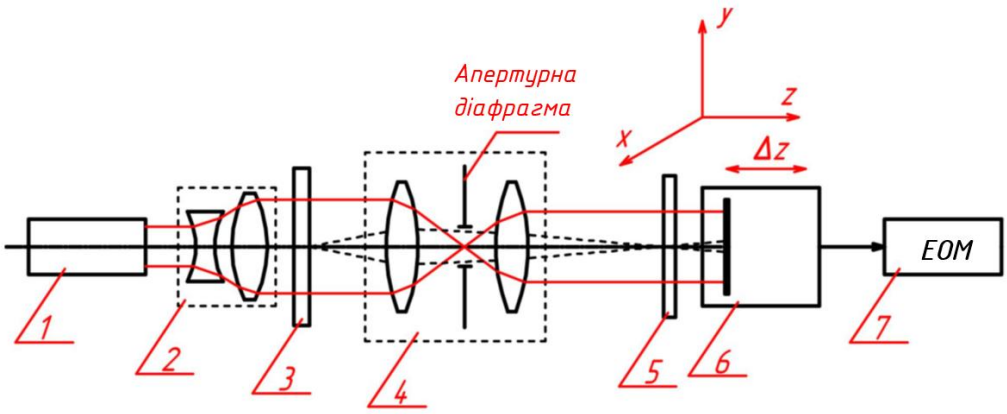


Рис. 6. Функціональна схема базового варіанту оптико-електронного приладу для контролю лінійних переміщень об'єктів: 1 – лазер; 2 – ОС формування пучка; 3 – транспарант; 4 – афокальна репродукційна ОС; 5 – оптичний фільтр; 6 – цифрова телевізійна камера; 7 – ЕОМ

Прилад складається з передавальної і приймальної частин, причому передавальна частина встановлюється нерухомо, а приймальна частина кріпиться на рухомому об'єкті, який може переміщатися уздовж оптичної осі (на рис. 6 – це вісь *Z*) на значні відстані і при цьому зміщуватися в поперечних напрямках (вздовж осей *X* і *Y*).

До складу передавальної частини входять: гелій-неоновий лазер 1, оптична система (ОС) формування пучка 2, транспарант 3 і афокальна репродукційна ОС 4. До складу приймальної частини входять: оптичний фільтр 5, цифрова телевізійна камера 6, сигнал з виходу якої передається в ЕОМ 7.

Принцип дії приладу полягає в наступному: зображення транспаранта 3, що підсвічується колімірованим пучком лазерного випромінювання, проєктується афокальною репродукційною ОС 4 типу Кеплера в простір предметів, де розташована приймальня частина приладу. Перед площиною чутливих елементів матричного приймача випромінювання (МПВ) цифрової телевізійної камери 6 встановлений оптичний інтерференційний фільтр 5, який призначений для придушення зовнішніх фонових засвічень. Так як приймальня частина приладу закріплена на об'єкті, то при переміщенні об'єкта уздовж осей *X* і *Y* зображення транспаранта буде зміщуватися відносно чутливих елементів МПВ. Координати X_0 і Y_0 зображення транспаранта визначаються в процесі реалізації алгоритмів цифрової обробки зображення в ЕОМ.

© Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

Однією з переваг цього приладу є можливість вимірювання поперечних зміщень об'єктів при їх значному поздовжньому переміщенні. Якщо переміщення прямолінійне, як у випадку лінійних механічних трансляторів, то пропонований прилад дозволить контролювати відступ від прямолінійності. У зв'язку з цим виникає питання про діапазон лінійних переміщень, в межах якого зберігається можливість контролю прямолінійності траєкторії переміщення.

Припустимо, що, як і в приладі-прототипі, в якості тест-об'єкта використовується транспарант з синусоїдальним коефіцієнтом пропускання по амплітуді, рівним:

$$\tau_\alpha(x,y)=\frac{1}{2}\left(1+\cos 2\pi\frac{x}{T_x}\right). \tag{1}$$

Крім цього, приймемо такі припущення:

- транспарант підсвічується плоскою хвилею від когерентного джерела з амплітудою A_0 і довжиною хвилі λ;
- афокальна дифракційно-обмежена репродукційна ОС має квадратну апертурну діафрагму розмірами $a\times a$.

Як відомо [4], при таких припущеннях когерентна передавальна функція ОС має вигляд:

$$\bar{h}(\nu_x,\nu_y)=rect\left(\frac{\nu_x}{\nu_M},\frac{\nu_y}{\nu_M}\right)\exp\left[i\frac{\pi\Delta\left(\nu_x^2+\nu_y^2\right)}{\lambda}\right], \tag{2}$$

де $\nu_M=\frac{a}{2\lambda f_1'}$, ΔF – поздовжня дефокусування.

Розподіл інтенсивності в площині зображення, яка зміщена від площини Гауса на величину ΔF, визначається виразом:

$$I(x',y')=\frac{A_0^2}{4\beta^2}\left\{\frac{3}{2}+2\cos\left(\frac{\pi\lambda\Delta F\nu_0^2}{\beta^2}\right)\cos\left(\frac{2\pi(x'-X_0)\nu_0}{\beta}\right)+\frac{1}{2}\cos\left(\frac{4\pi(x'-X_0)\nu_0}{\beta}\right)\right\}, \tag{3}$$

де $\nu_0=\frac{1}{T_x}$ – просторова частота транспаранта, а $\beta=f_2'/f_1'$ – лінійне збільшення афокальної системи.

Як випливає з формули (3), у фазі першої та другої гармонік реєстрованого сигналу міститься інформація про поперечне зміщення об'єкта уздовж осі X'. При цьому амплітуда другої гармоніки в розподілі інтенсивності залишається незмінною при поздовжньому переміщенні ΔF, а амплітуда першої гармоніки при зміні дефокусування буде періодично змінюватися від максимального значення, яке досягається при $\Delta F = 0$ до від'ємного значення, коли настає звернення контрасту. Якщо в алгоритмі вимірювання поперечних зміщень використовувати першу гармоніку, то за умови $a>2\lambda f_1'\nu_0$, діапазон зміни дефокусування ΔF до настання звернення контрасту можна визначити з розв'язку рівняння, яке має вигляд: $\Delta F=\pm\frac{\beta^2T_x^2}{2\lambda}$. На рис. 7 представлена залежність діапазону поздовжнього переміщення – робочого діапазону приладу, від значення просторового періоду транспаранта для випадку, коли λ = 0,632 мкм, $\beta = 2^x$.

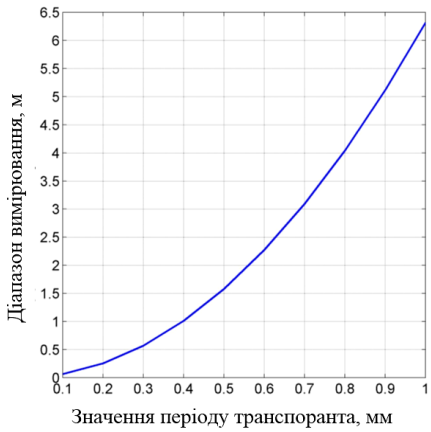


Рис. 7. Графік залежності діапазону вимірювання від значення періоду транспаранта

З графіка цієї залежності випливає, що можна задавати діапазон робочих поздовжніх переміщень в межах якого зберігається можливість вимірювання поперечних зміщень уздовж осі X', варіюючи періодом синусоїдального транспаранта або лінійним збільшенням афокальної репродукційної ОС. Однак при цьому похибка вимірювання поперечних переміщень очевидно буде змінюватися.

Використання синусоїдального транспаранта дозволяє виконувати вимірювання поперечних зміщень тільки в одному напрямку. Базова схема дозволяє вибирати транспарант з будь-яким коефіцієнтом пропускання і використовувати різні алгоритми вимірювання переміщень.

Висновки. Оптико-електронні прилади для контролю похибок лінійних переміщень дозволяють з високою точністю вимірювати поперечні переміщення об'єктів від єдиних конструктивних баз при поздовжньому переміщенні цих об'єктів. Розроблені функціональні схеми вимірювальних оптико-електронних приладів можуть знайти застосування в областях техніки, де потрібний високоточний безконтактний автоматичний контроль похибок механізмів лінійних переміщень, зокрема, при реалізації принципів активного контролю на верстатах з ЧПК.

Інформаційні джерела

1. Афанасьєва О.В., Курський Ю.С., Одаренко Є.М. Оптичні вимірювання: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1 – 180 с.

2. 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". Збірник статей. Випуск 16. м. Луцьк, червень 2020 р. – Луцьк: ЛНТУ, 2020. – С. 38–47.

3. Денисюк В.Ю. Інформаційно-вимірювальні технології налагодження та калібрування приладів активного контролю / Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», м. Івано-Франківськ, Україна 13 жовтня 2022 року. – Івано-Франківськ: ІІТ, ІФНТУНГ. – 2022. – С. 124 – 126.

4. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Клочко Т.Р. Т Оптичні вимірювання у механічній обробці деталей: монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 332 с.

5. Шахновський О.М., Денисюк В.Ю. Метрологічне забезпечення контролю похибок переміщення об'єктів оптико-електронними приладами / Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці і промисловості», м. Івано-Франківськ, Україна 8 жовтня 2020 року. – Івано-Франківськ: ІІТ, ІФНТУНГ. – 2020. – С. 123 – 124.

6. Шахновський О.М., Денисюк В.Ю., Кирилюк М.В. Контроль похибок геометричних параметрів металорізальних верстатів оптико-електронними приладами / Матеріали IV-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» 29-30 жовтня 2020 р.) : збірник тез. – Луцьк : ЛНТУ, 2020.– С. 96–97.

V. Denysiuk, V. Ptashenchuk
Lutsk National Technical University

ANALYSIS THE METHODS OF METROLOGICAL SUPPORT OF HIGH-PRECISION ERROR CONTROL OF MECHANICAL DEVICES THE MOVEMENTS OF OBJECTS

The article considers high-precision means of control that allow the non-contact method to measure the errors of linear displacements of objects at their significant range and in difficult operating conditions, including in the presence of vibrations. The review of the main directions of development the methods and creation of new high-precision non-contact measuring devices for control the errors of linear movements of objects caused by deviation from rectilinearity and angular displacements of objects is carried out. The principles of operation and schemes of measuring optoelectronic devices, which use a modern element base, as well as means of digital signal processing, which implement effective algorithms, are considered.

Keywords: *optoelectronic device, error, movement, control, signal, laser meter.*

© Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

УДК 621.317
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-04
[1]**Домініков М.М.,** *к.ф-м.н.,*[1]**Сахновський М.Ю.,** *д.т.н.,*[1]**Стринадко М.Т.,** *к.ф-м.н.,*
[2]**Тимочко Б.М.**, *к.ф-м.н.*
[1]Чернівецький національний університетім. ЮріяФедьковича, м. Чернівці, Україна
[2]Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

РАДІОЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ

В роботі запропонований метод радіочастотної селекції оптичних спектрів, який дозволяє отримати високу роздільну здатність при малому русі рухомого дзеркала інтерферометра. Приведені результати експериментальних вимірювань.
Ключові слова:*Фур'є-спектрометр, оптичний спектр, спектральний аналіз.*

Постановка проблеми. Для практичних задач актуальною проблемою є пошук нових методів спектрального аналізу, які б за спектральними характеристиками відповідали сучасним досягненням і давали переваги перед апаратним представленням компактністю, умовами використання, простотою реалізації тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний розвиток багатьох галузей техніки вимагає використання спектральних приладів великої світлової сили і значної роздільної здатності. Спектральними приладами, що задовольняють цим вимогам, є Фур'є-спектрометри, роздільна здатність яких визначається максимальним рухом рухомого дзеркала [1].

Реалізація портативних Фур'є-спектрометрів обмежена механічними властивостями лінійного приводу рухомого дзеркала спектрометра. Застосування механічно стійких п'єзокерамічних лінійних приводів обмежується малим ходом рухомого дзеркала і, відповідно, малою роздільною здатністю у відомих методах обробки даних [2].

Мета роботи полягає у розробці методу радіочастотної селекції оптичних спектрів, що реалізований на базі модифікованого інтерферометра Майкельсона.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо основи методу радіочастотної селекції оптичних спектрів.

Модифікація інтерферометра передбачає використання рухомих дзеркал. Одне із дворадіальних рухомих дзеркал використовується для налаштування інтерферометра на нульову полосу. Завдяки рівномірному ходудругого дзеркала інтерферометра відбувається фазова модуляція оптичного випромінювання. Таким чином виникає низькочастотний компонент, який реєструється фотоелектричною системою [3].

Частота модуляції електричного сигналу визначається співвідношенням 1

$$f = \frac{V}{\lambda} = V\sigma, \tag{1}$$

де V – зміна різниці швидкості ходу, $\Delta(t) = Vt$, λ – довжина хвилі, $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ – хвильове число.

Квазімонохромне випромінювання $B_{0,\lambda}$створює змінний у часі сигнал

$$F(t) = B_{0,\lambda}(1+\cos 2\pi ft). \tag{2}$$

При рівномірній зміні різниці ходу у фотоприймальній системі дворадіального інтерферометра формується часовий імпульс. Його форма повністю залежить від спектрального складу оптичного випромінювання $B(\sigma)$ [1].

Проведемо спектральний аналіз отриманих $2n+1$ часових імпульсів, розташувавши їх симетрично часу , як показано на рис. 1.

Вибір початкового відліку години в даній точці спрощує процедуру аналізу і не впливає на отриманий результат.

Наявність сигналу на інтервалі швидкого зворотного ходу дзеркала не є обов'язковою умовою аналізу спектру. Зсув смуги спектру в область високих частот і спотворення необхідного спектру, що виникають, усуваються смугопропускним обмеженням електронного тракту.

© Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

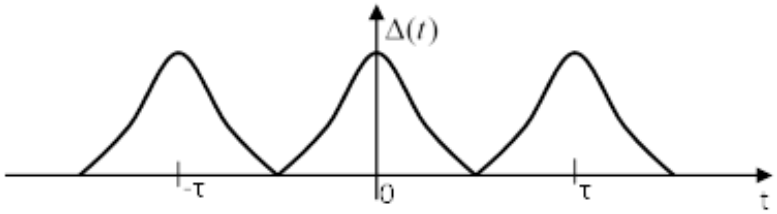


Рис.1 Характерний вигляд періодичної інтерферограми

Фур'є-перетворення періодичної часової залежності різниці ходу випромінювання в інтерферометрі є функцією апаратного процесу.

Найбільші максимуми даної функції знаходяться в точках з частотами $f = \frac{k}{\tau} = kf_0$,

де $f_0 = \frac{1}{\tau}$ – частота фазової модуляції, τ – період сканування.

Напівширина цих максимумів $\Delta f = \frac{f_0}{2n+1}$ залежить від часу спостереження $\tau(2n+1)$.

При великому часу сканування $F_n(2\pi f)$ переходить у функцію. Дана апаратна функція може бути представлена набором функцій $Z_k(f,n)$, аналогічних функцій підрахунку. Їх максимум знаходиться на частоті $f = kf_0$.

Відповідно до визначення функції підрахунку (5) буде наступним:

$$F(2\pi f) = \sum_{k=0}^{\infty} F_0(2\pi f) Z_k(f,n). \quad (3)$$

Вираз (3) представляє $F(2\pi f)$ розкладання функції в ряд за функціями лічильника. Набір функцій $Z_k(f,n)$ має повноту, а при великих значеннях $n >> 1$ є ортогональним набором. Визначимо залежність екстремумів функції $F_n(2\pi f)$ з оптичним масштабом (λ, σ) і зміною часу різниці ходу. Як показано в [1], значення радіочастотного сигналу f_λ для довжини хвилі λ буде таким:

$f_\lambda = \frac{\Delta_{\max}}{\tau_1 \lambda}$ де τ_1 – час збільшення різниці ходу.

Відповідно частота f_λ збігається з частотою kf_0, коли

$$\frac{\pi \Delta_{\max}}{\tau_1 \lambda} = k\pi, \text{ or } \Delta_{\max} = k\lambda\tau_1 f_0. \quad (4)$$

Якщо час збільшення різниці ходу значно більше, ніж при зворотному русі дзеркала, великі максимуми функції $F_n(2\pi f)$ відповідають умові $\Delta_{\max} = k\lambda$.

Таким чином, часова селекція оптичних спектрів має деякі математичні аналогії з просторовою селекцією, яка формується за допомогою дифракційної решітки.

Інтенсивність спектральних гармоній, що вибираються за рахунок радіочастотної селекції в околицях частоти f_λ, буде пропорційна величині спектральної яскравості оптичного спектру $\overline{B}_{\Delta f}(\sigma)$, яка усереднена по смузі радіочастот Δf.

Перетворення спектральних інтервалів радіо- і оптичного сигналу дотримується правила:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta f \lambda^2}{V}, \ \Delta\sigma = \frac{\Delta f}{V}. \quad (5)$$

Аналіз радіочастотного спектру в області частот f_λ, що забезпечує роздільну здатність $\Delta f = f_0 << f_\lambda$, необхідно проводити протягом часу $t = \tau(2n+1)$. Тобто роздільна здатність оптичного спектра $\Delta\lambda$ визначається мінімальним часом спостереження.

© Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Обговорюваний метод аналізу оптичного спектру використовує вимірювання його дискретних значень у точках з частотою kf_0.

Задача відновлення континуального спектру розв'язується згідно з теоремою Котельникова з використанням функції $Z_k(f,n)$ як функції відліку.

Зауважимо, що зміна амплітуди флуктуації п'єзокераміки без зміни частоти дозволяє змістити спектр оптичного випромінювання таким чином, що амплітуда радіосигналу на одному вузько смуговому фільтрі починає реагувати на змінене значення оптичної спектральної узгодженості [3].

Цей факт дозволяє значно спростити аналізатор оптичного спектру, що використовує метод накопичення сигналу часу.

Нехай переміщення дзеркала інтерферометра здійснюється за пилкоподібним законом:

$$\Delta(t)=\begin{cases} Vt, & nT<t<\dfrac{T}{2}(1+2n) \\ -Vt, & (2n+1)\dfrac{T}{2}<t<(n+1)T \end{cases} \tag{6}$$

де $n=0,1,2...$, T- період ходу дзеркала, швидкість якого постійна та рівна V .

Зміна різниці ходу згідно співвідношення (6) може бути реалізована п'єзокерамічним елементом з пилкоподібним живленням, така зміна різниці ходу $\Delta(t)$ променів інтерферометра в часі зображена на рис. 2.

Зрозуміло, що зміна швидкості ходу дзеркала, при незмінній величині його переміщення, забезпечується зміною часу наростання напруги, що підводиться до п'єзокерамічного двигуна.

Будемо вважати, при відсутності напруги на п'єзокераміці різниця ходу в інтерферометрі має значення $\Delta_0=0,(\Delta_0\ll\lambda.)$ Це здійснюється як за рахунок механічної підстройки, так і за рахунок подачі на п'єзокерамічний елемент компенсуючої постійної напруги. Амплітудне значення переміщення дзеркала 4 $\Delta_M=\lambda_0/2$ досягається прикладанням до двигуна максимальної напруги ΔU.

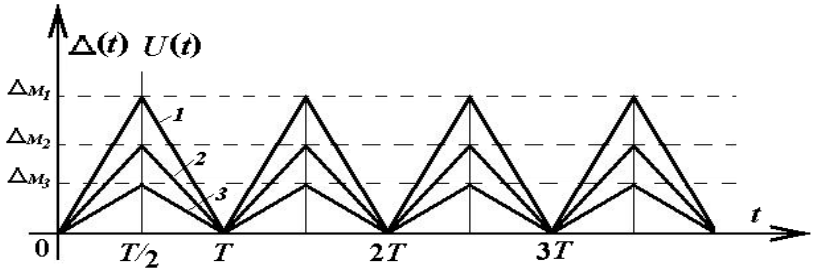


Рис.2. Зміна різниці ходу $\Delta(t)$ променів

T-період ходу дзеркала. $\Delta_{Mi}(t)$ - зміщення рухомого дзеркала, що відповідає довжині хвиліλ_i.

Змінна складова різниці ходу променів інтерферометра, в процесі переміщення дзеркала описується виразом:

$$\Delta(t)=2f_0\Delta_M\cdot t\ ; \tag{7}$$

при цьому кожна спектральна гармоніка із довжиною хвилі λ отримає частоту модуляції інтенсивності згідно (7): $\omega_\lambda=2\pi f_0\,\lambda_0/\lambda$.

Змінна складова інтенсивності на виході інтерферометра при подачі на його вхід випромінювання зі спектральною густиною $B(\lambda)$, буде описуватись виразом:

$$I(t)=\int_0^\infty B(\lambda)\cos\left(2\pi f_0\frac{\lambda_0}{\lambda}t\right)d\lambda \tag{8}$$

Максимальне значення селективного підсилення електричного сигналу на частоті f відповідає виділенню та підсиленню оптичного сигналу, створеного оптичним випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda=2\cdot\Delta_M$. Тобто використання селективного підсилювача з заданими незмінними параметрами виділення та підсилення сигналів, що відповідають різні по величині швидкості рухомого дзеркала, не вносить помилку вимірювання спектрів, пов'язану з різним значенням настройки системи вимірювання. Тобто вузько смуговий селективний підсилювач електричних сигналів можна розглядати, при його застосуванні у двопроменевому інтерферометрі, як селектор оптичного випромінювання. Зміна амплітуд різниці ходу Δ_M при постійній частоті f_0 перестроює селектор на іншу довжину хвилі $\lambda=2\cdot\Delta_M$.

© Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Результати роботи. Експериментальні вимірювання проводились у схемі інтерферометра приведеного на рис. 3. У вхідний круглий отвір 1 проектувалось зображення джерела із спектральним розподілом $B(\lambda)$. В інтерферометр завдяки об'єктиву 2 збирається випромінювання з тілесного кута $\Delta\Omega$. Дзеркалом 3 проводиться налаштування інтерферометра на нульову полосу. Дзеркало 4 в процесі вимірювання здійснює поступально зворотні рухи по пилкоподібному закону. Початкове положення дзеркала знаходиться в середині інтервалу, в межах якого рухається дзеркало. Вихідний об'єктив, в фокальній площині якого знаходиться фотоприймач 7, фіксує інтерферографу $I(\Delta)$ в межах тілесного кута $\Delta\Omega$, перетворюючи її в електричний сигнал $I(t)$.

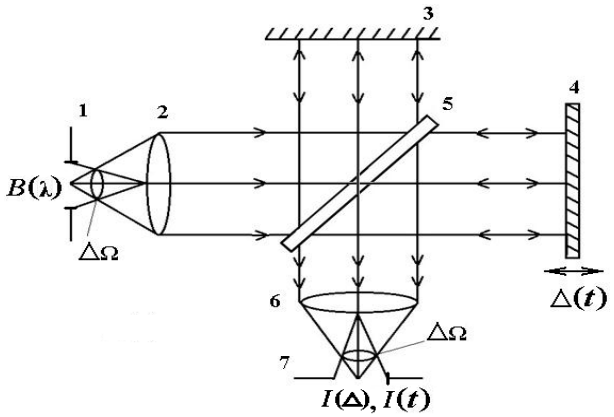


Рис 3. Принципова оптична схема низькочастотної фільтрації електричних сигналів

Відомо, що при рівномірному русі одного із дзеркал 4 двопроменевого інтерферометра при освітленні стаціонарним випромінюванням спектр якого досліджується, на оптичному приймачі 7 виникає змінна складова інтенсивності. Частота цієї складової визначається відношенням швидкості зміни різниці ходу променів інтерферометра до довжини відповідної складової оптичного випромінювання. Як правило переміщення рухомого дзеркала здійснюється на відстаньпорядку довжину хвилі оптичного випромінювання, а інтенсивність електричного сигналу фотоприймача фіксується широкосмуговим підсилювачем.

Осцилограми зареєстрованого сигналу $I(t)$ приведені на рис. 3-4.

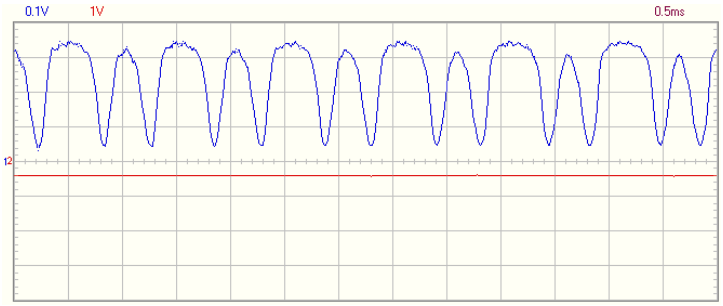


Рис. 3. Осцилограма сигналу при переміщенні рухомого дзеркала на відстань, що перевищує довжину хвилі оптичного випромінювання

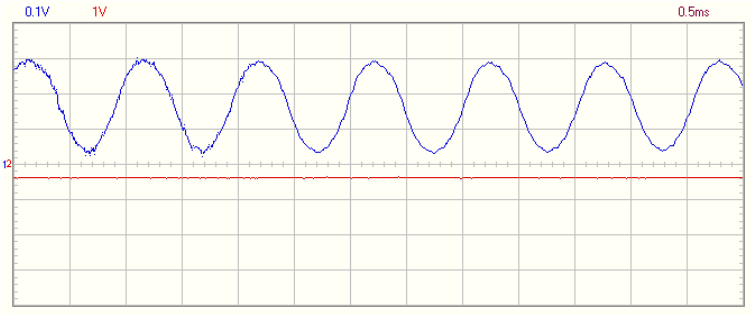


Рис. 4. Осцилограма сигналу при переміщенні рухомого дзеркала в межах довжини хвилі оптичного випромінювання

© Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Висновки. Запропонований метод накопичення та відповідної обробки інтерферограм дозволяє створювати портативні Фур'є-спектрометри, роздільна здатність яких визначається часом сканування. Запропонована спектральна система не дозволяє отримати одночасно усю інформацію про спектр, як це здійснюється у Фур'є - спектрометрах. Інформація про спектральний розподіл в даному випадку здійснюється шляхом задання дискретних значень амплітуди пилкоподібної напруги, що відповідає певному значенню різниці ходу $\lambda/2$. Тобто даний пристрій можна використовувати лише для спектрального аналізу стаціонарних потоків.

В порівнянні із традиційними спектральними приладами дана спектральна система має істотні переваги, які пов'язані із істотним збільшенням світлосили. Дійсно, за рахунок інтерференційного принципу формування сигналу тілесний кут $\Delta\Omega$, під яким спостерігається круглий вхідний отвір із центру об'єктива коліматора, буде значно більшим, у порівнянні із вхідним отвором щілинного спектрометра.

Використання малогабаритного вузько смугового підсилювача електричного сигналу, отриманого із фотоприймача двопроменевого інтерферометра з одним рухомим дзеркалом, що періодично рівномірно рухається біля середньої точки, дозволяє створити малогабаритний спектрометр великої світлосили, здатний вимірювати спектри стаціонарних потоків з великою роздільною здатністю.

Інформаційні джерела

1. Конончук Г. Л., Прокопець В. М., Стукаленко В. В. Вступ до Фур'є-оптики: навч. посібник. – Київ: КНУ, 2010. – 320 с.

2 Jan Tichy, Jiry Erhart, Erwin Kittinger, Jana Privratska. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics .- Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010.

3. M. Yu. Sakhnovskyj,B. M. Tymochko, M. T. Strinadko, M. M. DominikovAnalysis of optical spectra by the radio frequency method// Proc. SPIE. - 2019. - V. 7008 0I [7008-18]. – P. 168–171.

[1]Sakhnovskyj M.Yu., [1]Dominikov M.M.,[1]StrinadkoM.T.,[2]TymochkoB.M.

[1]Chernivtsi National University,Chernivtsi, Ukraine
[2]Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

RADIO FREQUENCY ANALYSIS OF THE OPTICAL SPECTRUM

In the paper, a method of radio frequency selection of optical spectra is proposed, which allows obtaining a high resolution with small movement of the movable mirror of the interferometer. The results of experimental measurements are presented.

Key words: *Fourier spectrometer, optical spectrum, spectral analysis.*

© Домініков М.М., Сахновський М.Ю., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

УДК 006.91:681.121
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-05
Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.
Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», м. Івано-Франківськ, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ТРУБОПОРШНЕВИХ ПОВІРОЧНИХ УСТАНОВОК ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПАКТ-ПРУВЕРА З КОМПАРАТОРОМ

У роботі відмічено, що калібрування вимірювального обладнання (засобів вимірювальної техніки, еталонів), як один із видів метрологічних робіт, що відносяться до метрологічного контролю, безпосередньо пов'язана зі встановленням та контролем метрологічних характеристик ЗВТ та еталонів. Калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології. Калібруванню також підлягають вторинні та робочі еталони. Калібрування та оформлення його результатів проводяться відповідно до методик калібрування. Розглянуто вимоги до побудови, викладення, оформлення та змісту методик калібрування. Розроблено методику калібрування трубопошневої повірочної установки (ТПУ) з застосуванням еталонного компакт-прувера з компаратором, що пройшла апробацію та застосовується при калібруванні еталонних трубопоршневих установок, які експлуатуються на об'єктах АТ «Укртранснафта». Застосування вказаної методики калібрування дало можливість забезпечити метрологічну простежуваність від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються для обліку нафти та нафтопродуктів.

Ключові слова: *методики калібрування, трубопоршневі повірочні установки, засоби вимірювальної техніки, еталони, невизначеність вимірювання.*

Постановка проблеми. Калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та еталонів, як один із видів метрологічних робіт, що відносяться до метрологічного контролю, безпосередньо пов'язана зі встановленням та контролем метрологічних характеристик вимірювального обладнання. Процедура проведення калібрування залежить від прийнятих в країні на законодавчому рівні вимог [1].

Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» калібрування - сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу. Калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології. Калібруванню також підлягають вторинні та робочі еталони. Калібрування та оформлення його результатів проводяться відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології [2].

Загалом вимоги до вибирання, верифікації та валідації методик калібрування встановлює ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [3]. Відповідно до даного стандарту ці вимоги можна звести до наступних:

- рекомендовано застосовувати методики, які встановлені в міжнародних, регіональних чи національних стандартах. Також застосовуються методики, які рекомендовані авторитетними технічними організаціями, або описані у відповідній науковій літературі чи журналах, або ті, що зазначає виробник обладнання. Однак калібрувальна лабораторія повинна підтвердити, що вона може правильно застосовувати такі методики;
- калібрувальна лабораторія може самостійно розробляти або модифікувати методики калібрування, проте для застосування нестандартизованих методик необхідно підтвердити, що вони придатні і оцінені, тобто проведена процедура їх валідації.

Також відповідно до п. 7.2.1.4 ДСТУ EN ISO/IEC 17025 якщо замовник не зазначає методику калібрування, тоді калібрувальна лабораторія вибирає відповідну методику та інформує про це замовника.

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

Враховуюче те, що на велику кількість ЗВТ та еталонів на даний час відсутні методики калібрування, які встановлені у національних стандартах, питання щодо розроблення таких методик є досить актуальним.

Мета роботи – розробити методику калібрування еталонних трубопоршневих повірочних установок, що дасть можливість забезпечити метрологічну простежуваність від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки.

Основний текст статті. Загальні вимоги до побудови, викладення, оформлення та змісту методик калібрування встановлені документами регіональних метрологічних організацій, зокрема COOMET R/GM/31[4].

Під час калібрування відповідно ДСТУ ISO/IEC 17025 калібрувальна лабораторія повинна ідентифікувати складові та оцінювати невизначеність вимірювання при проведенні калібрування обладнання. На даний час відсутні національні стандарти, що регламентують процедуру оцінювання невизначеності вимірювання при калібруванні більшості категорій та груп ЗВТ.

Потребує розроблення процедура оцінювання невизначеності вимірювань при розробленні методик калібрування. Основою для цього може бути документ Європейської кооперація з акредитації EA 4/02 [5], у якому наведено алгоритми оцінювання невизначеності при калібруванні конкретних груп ЗВТ: гир, еталонного резистора, комплекту мір довжини, термопари, давача потужності, коаксіального ступінчатого атенюатора, цифрового мультиметра, кронциркуля з ноніусом, калібратора температурного блоку, побутового лічильника води та кільцевої міри. Окрім того, у EA 4/02 наведено також рекомендації щодо оцінювання невизначеності за типами А та В, обліку кореляції вхідних величин тощо.

З урахуваннях вищенаведеного у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» було розроблено методики калібрування різних груп ЗВТ, випробувального обладнання та еталонних засобів, в тому числі трубопоршневої повірочної установки (ТПУ).

Компакт-прувер, в основному, застосовується для калібрування трубопоршневої повірочної установки, остання, в свою чергу, застосовується для повірки перетворювачів витрати (турбінних чи масових витратомірів), що встановлені на вузлах обліку енергоресурсів, зокрема нафти та нафтопродуктів.

Методика калібрування трубопоршневої повірочної установки складається з наступних розділів:

- сфера застосування;
- нормативні посилання;
- операції калібрування;
- засоби калібрування;
- умови проведення калібрування;
- вимоги безпеки;
- підготовка до калібрування;
- проведення калібрування;
- оцінювання невизначеності результату вимірювання;
- оформлення результатів калібрування.

Наведемо коротку характеристику основних розділів розробленої методики калібрування.

У розділі **«Операції калібрування»** наведено перелік операцій калібрування: підготовка до калібрування, проведення калібрування, оцінювання невизначеності результату вимірювання, оформлення результатів калібрування.

У розділі **«Засоби калібрування»** наведено перелік технічних засобів, що застосовуються при калібруванні: еталони, ЗВТ, допоміжне обладнання, а також їх основні технічні та метрологічні характеристики. Зокрема, при калібруванні трубопоршневої повірочної установки застосовується компакт-прувер з розширеною невизначеністю вимірювання об’єму 0,014%, компаратор – турбінний перетворювач витрати (ТПВ), перетворювачі температури та тиску, термометри, манометри, засоби для вимірювання густини та в’язкості нафти, секундомір, барометр, психрометр аспіраційний. Наведено позначення нормативно-технічних документів, що регламентують метрологічні і основні технічні характеристики цих засобів.

Розділ **«Умови проведення калібрування»** містить вимоги щодо параметрів навколишнього середовища, температури калібрувальної рідини (нафти), витрат рідини, при яких буде проводитися калібрування.

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

У розділі **«Вимоги безпеки»** наведено вимоги, що забезпечують при проведенні калібрування безпеку праці, охорону навколишнього середовища, виробничу санітарію.

При проведенні калібрування ТПУ необхідно дотримуватися вимог наступних документів:

- правил безпеки при експлуатації компакт-прувера/ТПУ;
- правил безпеки при експлуатації засобів калібрування, наведеними в експлуатаційній документації;
- правил технічної експлуатації електроустановок;
- правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів;
- правил безпеки праці, діючими на об'єкті.

Окрім того, у розділі містяться вимоги щодо освітленості на об'єкті, де проводиться калібрування, доступу персоналу до еталонів, ЗВТ та обладнання, допуску осіб, що проводять калібрування, а також умови, при яких калібрування припиняється.

Розділ **«Підготовка до калібрування»** містить перелік робіт, що проводяться перед калібруванням та способи їх виконання. Зокрема, при підготовці до калібрування ТПУ проводяться наступні роботи:

- перевіряється наявність еталонів і допоміжних засобів калібрування, діючих свідоцтв/сертифікатів калібрування даних засобів;
- встановлюються ЗВТ, що дозволяють контролювати умови проведення калібрування (температури, атмосферного тиску, вологості);
- підготовлюються до роботи еталони, допоміжні засоби калібрування та засоби, що калібруються, у відповідності до вимог експлуатаційних документів;
- виконується зовнішній огляд еталонів, допоміжних засобів калібрування та засобів, що калібруються;
- перевіряється правильність трубопровідної обв'язки еталонів, та засобів, що калібруються;
- перевіряється герметичність еталонів, допоміжних засобів калібрування та засобів, що калібруються, кранів, клапанів і з'єднувальних трубопроводів;
- перевіряється герметичність ущільнень поршня компакт-прувера/ТПУ, кранів, вузла переключення направлення руху робочої рідини;
- перевіряється працездатність калібрувальної системи в робочому режимі та відсутність повітря (газу) в компакт-прувері /ТПУ;
- перевіряється стабільність температури робочої рідини (нафти), що застосовується при калібруванні ТПУ.

Розділ **«Проведення калібрування»** встановлює методи визначення (контролю) метрологічних характеристик засобу, що калібрується, та містить процедуру проведення калібрування, схеми підключення, рисунки, вказівки про порядок проведення операцій калібрування, формули, таблиці тощо.

При калібруванні трубопоршневої повірочної установки за допомогою компакт-прувера метод калібрування полягає у визначенні невідомої місткості каліброваної ділянки ТПУ з відомою місткістю каліброваної ділянки компакт-прувера з застосуванням компаратора за робочих умов. У якості робочого середовища застосовується робоча рідина (нафта)

Структурна схема калібрування ТПУ за допомогою компакт-прувера та компаратора наведена на рис. 1.

ТПУ, що калібрується, компакт-прувер та компаратор з'єднуються послідовно (рис.1). Робоча рідина (нафта) поступає на ВОН, пройшовши компаратор - ТПВ надходить на ТПУ, що калібрується. Після ТПУ нафта поступає на компакт-прувер і через вузол регулювання тиску поступає на вихід з вузла обліку. Операції по визначенню місткості ТПУ проводяться при постійному значенні витрати робочої рідини.

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

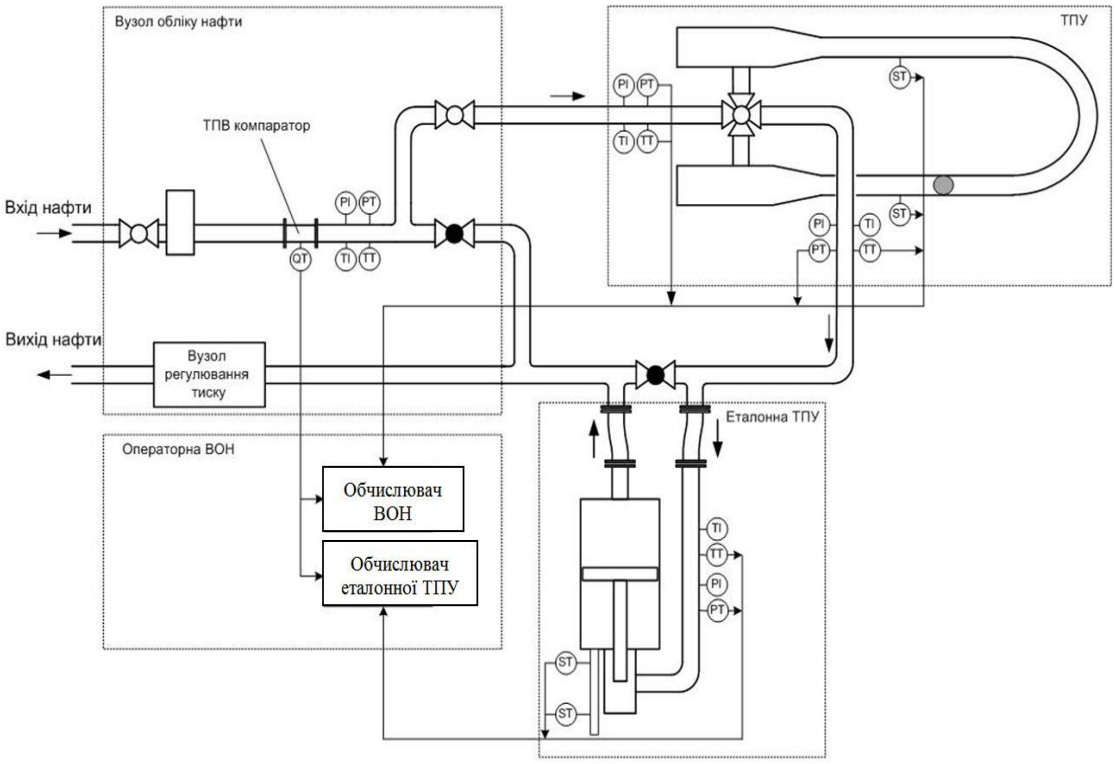


Рис. 1. Структурна схема калібрування ТПУ за допомогою компакт-прувера та компаратора

ВОН - вузол обліку нафти; ТПВ – турбінний перетворювач витрати; ТІ – термометри; ТТ – перетворювачі температури: РІ – манометри; РТ – перетворювачі тиску; QT – перетворювач витрати; ST – оптичні перемикачі.

Під час калібрування запускається поршень компакт-прувера і вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором за один прохід поршня каліброваною ділянкою компакт-прувера. Аналогічно вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором за один прохід кульового поршня каліброваною ділянкою ТПУ, що калібрується.

Кількість повторних спостережень (калібрувальних проходів) при визначенні місткості компакт-прувера/ТПУ в досліджуваних точках - не менше десяти.

Під час кожного калібрувального проходу вимірюються та реєструються значення температури та тиску. При калібруванні ТПУ за допомогою компакт-прувера з компаратором застосовуються засоби для визначення густини та в'язкості робочого середовища – нафти.

Розділ **«Оцінювання невизначеності результату вимірювання»** містить процедуру обробки результатів калібрування. У розділі наведено математичну модель вимірювання з врахуванням впливових факторів та алгоритмів їх оцінювання, бюджет невизначеності та алгоритм оцінювання невизначеності вимірювання місткості ТПУ при її калібруванні.

Значення місткості ТПУ, що калібрується, (V_p, м^3) за нормальних умов відповідно до [6, 7] можна визначати за наступним виразом:

$$V_p = V_{cp} \cdot \frac{N_m^p}{N_m^{cp}} \cdot \frac{K_{tscp} \cdot K_{tsInv} \cdot K_{pscp} \cdot K_{tlcp} \cdot K_{plcp}}{K_{tsp} \cdot K_{psp} \cdot K_{tlp} \cdot K_{plp}}, \quad (1)$$

де V_{cp} - значення місткості компакт-прувера за нормальних умов (зі сертифікату/свідоцтва про калібрування компакт-прувера), м^3;

N_m^p – кількість імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня каліброваною ділянкою ТПУ, що калібрується;

де N_m^{cp} – кількість імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня каліброваною ділянкою компакт-прувера;

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

K_{tscp} - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення матеріалу компакт-прувера;

K_{tsInv} - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення інварового стержня;

K_{pscp} - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на матеріал компакт-прувера;

K_{tlcp} - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення рідини в компакт-прувері;

K_{plcp} - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на рідину в компакт-прувера;

K_{tsp} - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення матеріалу ТПУ, що калібрується;

K_{psp} - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на матеріал ТПУ, що калібрується;

K_{tlp} - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення рідини в ТПУ, що калібрується;

K_{plp} - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на рідину в ТПУ, що калібрується.

Розширена невизначеність вимірювання місткості ТПУ, що калібрується, за нормальних умов в кожній калібрувальній точці відповідно до [5, 7, 8, 9] визначається за формулою:

$$U\left(V\right)=k\cdot u\left(V\right), \tag{2}$$

де k – коефіцієнт охоплення (k=2 з рівнем довіри 95%);

$u\left(V\right)$ – сумарна невизначеність вимірювань в кожній калібрувальній точці.

Розділ **«Оформлення результатів калібрування»** містить вимоги до оформлення його результатів.

Результати калібрування заносяться до протоколу та засвідчуються сертифікатом калібрування.

Звіти (протоколи) та сертифікати калібрування повинні відповідати вимогам ДСТУ EN ISO/IEC 17025 (п. 7.8.2 та п. 7.8.4, відповідно).

У сертифікаті калібрування міжкалібрувальний інтервал вказується тільки на вимогу замовника.

Розроблена методика калібрування була валідована відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025, пройшла апробацію та застосовується при калібруванні тробопошневих повірочних установок, що експлуатуються на підприємствах нафтогазової галузі України. Зокрема, із застосуванням вказаної методики здійснюється калібрування еталонних трубопоршневих повірочних установок ВНР -1100 фірми "VEGYEPSZER", що експлуатуються на об’єктах ПАТ «Укртранснафта».

Процедури та результати калібрування вищевказаних еталонних трубопоршневих повірочних установок, складання математичної моделі вимірювань, алгоритмів оцінювання невизначеності вимірювань, визначення складових бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювання детально розглянуто в [7].

Висновки. У статті розглянуто основні вимоги до розроблення методик калібрування, їх побудови, викладення та змісту. Відмічено, що до теперішнього часу практично відсутні національні нормативні документи, що регламентують методики калібрування та процедури оцінювання невизначеності для конкретних груп ЗВТ. У зв’язку з цим, наукові метрологічні центри, калібрувальні лабораторії розробляють методики калібрування.

Розроблено методику калібрування трубопоршневої повірочної установки за допомогою компакт-прувера з компаратором. Розроблена методика калібрування пройшли апробацію та застосовується при калібруванні ТПУ, що експлуатуються на об’єктах нафтогазової галузі України. Застосування вказаної методики калібрування дало можливість забезпечити метрологічну простежуваність від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються для обліку нафти та нафтопродуктів. Забезпечення єдності вимірювання, достовірного обліку нафти та нафтопродуктів є особливо важливим в умовах воєнного стану, зростання їх вартості та дефіциту.

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

Інформаційні джерела

1. Малецька О.Е. Методики калібрування: досвід розроблення та проблеми//Метрологія та прилади. -2012. – С.35-38.
2. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 30, ст.1008.
3. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). Чинний з 01.01.2021 – Київ, 2020. – 24 с.
4. *COOMET R/GM/31*:2016 Методики калибровки средств измерений. Общие требования. Утвержден. 21.04.2016. - ВНИФТРИ, 2016. – 9 с.
5. EA-4/02 M:2021 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration. - Date of Implementation. 05.11.2021. – EA Laboratory Committee, 2021- 78 p.
6. Paul Martin, IMASS. Realistic Pipe Prover Volume Uncertainty//27th International North Sea Flow Measurement Workshop 20 – 23 October 2009, Tønsberg, Norway.
7. Кепещук Т.В. Визначення метрологічних характеристик трубопоршневих повірочних установок на основі концепції невизначеності//Методи та прилади контролю якості.-2021.-№2.-С.34-45.
8. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений при проведении калибровок//Метрологія та прилади. -2007.-№1.-С. 31-42.
9. ISO 5168:2005 Measurement of fluid flow - Procedures for the evaluation of uncertainties.

Kepeshchuk T.V., Kepeshchuk D.T.

State Enterprise „Ivano-Frankivsk scientific and production center for standartization, metrology and certification", Ivano-Frankivsk, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALIBRATION OF PIPE-PROVER USING A COMPACT-PROVER WITH A COMPARATOR

In this paper noted that the calibration of measuring equipment (measuring equipment, standards), as one of the types of metrological work related to metrological control, is directly related to the establishment and control of metrological characteristics of measuring equipment. Measuring equipment used in the field and/or outside the field of legally regulated metrology may be subject to voluntary calibration. Secondary and working standards are also subject to calibration. Calibration and registration of its results are carried out in accordance with methods of calibration. The requirements for the construction, presentation, design and content methods of calibration. were considered. The method of calibrating the pipe-proper test unit (TPU) using a reference compact prover with a comparator has been developed and is used in the calibration of reference pipe-piston units operated at the facilities of JSC "Ukrtransnafta". The application of the specified method of calibration made it possible to ensure metrological traceability from standards to working means of measuring equipment used for accounting for oil and oil products.

Keywords: *methods of calibration, pipe-provers, measuring equipments, standards, measurement uncertainty.*

© Кепещук Т.В., Кепещук Д.Т.

УДК 621.793.6
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-06
I. KRUGLYAK, B. SEREDA, I. PALEHOVA, D. SEREDA, D. KIPHORUK
Dnipro State Technical University

OBTAINING COMPLEX CHROME COATINGS USING COMPOSITE POWDER CHARGE

In the work the methods of obtaining protective wear-resistant coatings on steels in the mode of thermal self-ignition are considered. The results of studies of the structure and properties of coatings obtained by different methods of processing (simultaneous and sequential) are shown. With the use of mathematical modeling methods, optimal charge compositions for applying wear-resistant coatings on machine parts using composite powder media have been developed. The analysis of significant parameters affecting the structure and operational properties of coatings obtained by different processing methods is given. The study of wear resistance of the obtained layers on carbon steels is carried out.

Key words: *heat resistance, coating, steel, aluminum, chrome, composite powder charges.*

Formulation of the problem. In difficult operating conditions of machine parts, units, equipment and tools, the physical and mechanical properties of their surface layer, its hardness, wear resistance and corrosion resistance are of great importance. The most widely used for surface hardening are various methods and methods of chemical-thermal treatment (CHT). One of the effective CHT methods used to increase the surface hardness, corrosion and wear resistance of iron-carbon alloys is diffusion saturation with one or more carbide-forming elements. At the same time, the known methods of saturation are characterized by a significant duration of the technological process (up to 10–16 h) [1,2] and energy intensity. In this regard, it is important to develop technologies that allow coatings to be applied with a minimum time of their formation. One of such technologies is the method of composite powder charge using gas-transport chemical reactions [3–6].

The essence of the composite powder charge method lies in the implementation of exothermic reactions in the mode of propagation of combustion waves. The process is characterized by intensive coating due to the presence of a temperature gradient in the product-powder medium system, which allows mass transfer of saturating elements to the surface of the product [7]. Coatings consist of a film of the applied product and a transitional diffusion gradient zone. It is known that when saturated with several carbide-forming elements, their joint diffusion is possible only in a certain, rather narrow concentration range, while it is impossible to obtain coatings of considerable thickness and high concentrations of all saturating elements in the surface layer [8–9]. In this case, it may be effective to apply a sequential processing method.

Analysis of recent research and publications. The purpose of this work is to model the processes of chromium plating and titanium-chromium plating under composite powder charge conditions, develop compositions of composite powder charge powder mixtures for deposition of wear-resistant coatings, comparative analysis and optimization of technological parameters of the composite powder charges process. The study of the structure, phase, and chemical composition of coatings obtained by various deposition methods (simultaneous and sequential), as well as the evaluation of the effectiveness of the use of the sequential technology of the composite powder charges process in the case of competition of diffusing elements during the formation of layers.

Presenting main material. Coatings were applied on samples of steels for mass use (steel 20, steel 45, U8). The processes of CPC chromium plating and titanium chromium plating were carried out in open type reactors (P = 105 Pa) in the mode of thermal autoignition. The operating temperature range varied in the range of 950÷1200 ºC, the total duration of isothermal exposure was 120 minutes (both with simultaneous and sequential saturation methods). Powders of oxides of chromium and aluminum, titanium, chromium, aluminum, technical purity, metallic iodine with a dispersion of 200–350 μm were used as reaction agents. The surface preparation of the samples included successive stages of grinding, polishing, and degreasing in acetone. The saturation process was initiated by preheating in a resistance furnace to the temperature of the onset of self-ignition (heating rate 0,5°C/s). The temperatures of the composite powder charges mixture were controlled by a chromel-alumel thermocouple in a protective case, introduced directly into the batch volume and connected to a KSP series potentiometer. The thickness of the hardened layers was studied using a Neophot-21 light microscope at x500 magnification. The microstructure was revealed by etching in a 3% alcohol

© I. KRUGLYAK, B. SEREDA, I. PALEHOVA, D. SEREDA, D. KIPHORUK

solution of picric acid [10]. A 4% alcoholic solution of nitric acid was used to identify ferrite grain boundaries. The analysis of the phase composition of the coatings was carried out on a DRON-3M X-ray diffractometer. The elemental composition was studied by X-ray microanalysis using a JEOL Superprob-733 microanalyzer. The locality of analysis is 1 μm^2, the depth of analysis is 1 μm.

The microhardness of the coatings was determined on a PMT-3 device at a load of 0.098 N and 0.196 N. The wear resistance was assessed by friction against loosely fixed abrasive particles using an SMT-1 installation. Heat resistance tests were carried out on cylindrical samples with a diameter of 10,0±0,2 mm and a height of 20.0±0.5 mm and isothermal conditions, followed by weighing on an analytical balance. The corrosion resistance of coated specimens was evaluated in a 10% H_2SO_4 solution at a temperature of 20°C. ASTRA4 and Recalc software packages [11-14] were used to calculate the equilibrium composition of the system products. When developing the optimal compositions of composite powder charges powder reaction mixtures that provide sufficient coating thickness and high wear resistance, we used the methods of mathematical planning of the experiment with the implementation of full factorial analysis according to plan 2^3 and fractional factorial experiment 2^{4-1}.

The kinetic regularities of the occurrence of chemical processes in composite powder charges depend on both temperature and diffusion factors. Assuming that at the heating stage the slowdown of diffusion processes in the gas phase is small, and the rate of temperature change is small compared to the rate of gas-phase chemical reactions, we can assume that at each temperature the equilibrium composition of the reaction products is determined. In this case, by calculating the equilibrium composition of the reaction products for a number of temperatures, one can follow the chemical picture of the development of the process.

The efficiency of processing under non-stationary temperature conditions is determined by the time parameters of the process and the thermophysical characteristics of the exothermic composite powder charges. The formation of coatings in the mode of thermal self-ignition can be conditionally divided into five stages:

1 - inert heating of the reaction mixture to the ignition temperature;
2 - thermal self-ignition;
3 - heating products;
4 - isothermal exposure;
5 - cooling.

In fig. 1 shows the dependence of the thickness of the chromium-doped titanium coating depending on the duration of isothermal exposure in the mode of thermal self-ignition (process temperature t_p = 1050). An increase in the saturation temperature leads to an increase in the thickness of diffusion layers.

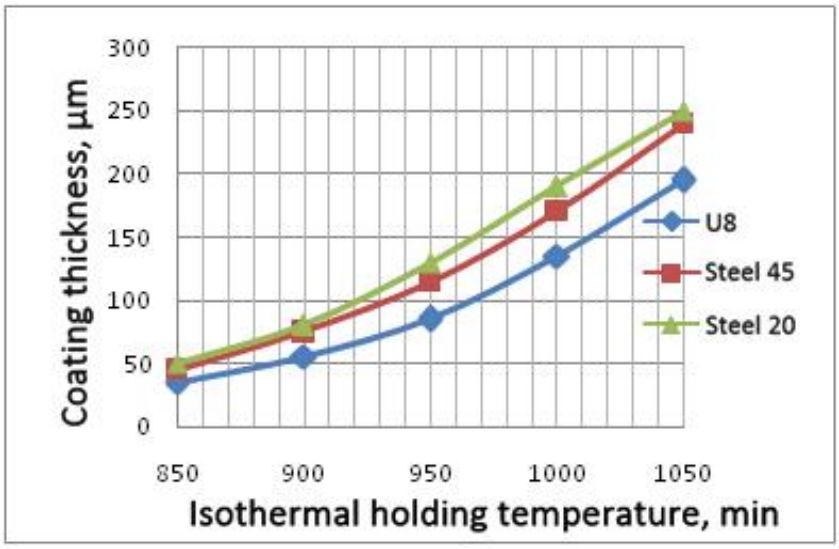


Fig. 1 – Dependence of the thickness of the chromium-doped titanium coating depending on the duration of isothermal exposure in the mode of thermal self-ignition (process temperature $t_п$ = 1050).

The duration of the first stage depends on the composition of the mixture and its thermal characteristics. The second stage is characterized by the occurrence of the main exothermic reactions, as well as the formation of gaseous compounds and the transport of saturating elements to the substrate surface. The thermodynamic analysis of the equilibrium composition of the products of the system indicates that, in the operating temperature range, the main components of the gas phase are I, I_2, AlI_2, CrI_2, CrI_3, TiI_4. It has been established that an increase in the concentration of the gas transport agent (metallic iodine) in the charge up to 2–4% leads not only to an increase in the amount of gaseous iodides, but also to an increase in the ignition reaction rate. At the third stage, the process temperature decreases to the calculated saturation temperature, and the formation of the coating begins. At the fourth stage, the diffusion growth of the coating occurs. At the stage of cooling, the intensity of layer formation decreases, this is due to a decrease in the diffusion coefficients of the charge elements. Two characteristic points are distinguished on the temperature curve, i.e., the ignition onset temperature t* and the maximum heating temperature tm, which depend on the composition of the reaction mixture. With an increase in the concentration of the active exothermic component and the gas transport agent in the mixture, t* decreases and tm increases. The thickness of the formed coatings is affected by the composition of the charge, the duration and temperature of isothermal holding, the chemical composition of the substrate, and the method of saturation.

As a result of the processing of the obtained experimental data, equations characterizing the dependence of the thickness of the alloyed titanium coating on the technological characteristics of the SHS process were obtained, so on steel 20: $y = 0{,}0594e^{0{,}008x}$, on steel 45: $y = 0{,}0513e^{0{,}0081x}$, on steel U8: $y = 0{,}0318e^{0{,}0083x}$. The size of the coating depends on the cooling rate. Studies show that the maximum growth rate of coatings is observed at the initial stages of the CPC process.

Metallographically, coatings are defined as a light zone with a clear separation boundary with the base. Most of the coverage is occupied by a zone with a heterogeneous structure. In U8 steel, a zone of carbides $(Fe,Cr)_{23}C_6$, $(Fe,Cr)_7C_3$, Cr_3C_2. ocated directly on the outer side of the coating. The study of the phase composition of the obtained alloyed titanium coatings (obtained at $\tau_в$ = 60 min., $t_п$ = 1050 °C) was carried out using X-ray units DRON-2 and DRON-3, which work together with the computing complex under the ARFA program. When alloying titanium coatings with chromium on the considered carbon steels, phases $(Fe,Cr)_{23}C_6$, $(Fe,Cr)_7C_3$, Cr_3C_2, as well as phases: Fe_2Ti, Cr_2Ti are formed.

The main alloying elements of all heat-resistant coatings are elements capable of self-passivation, that is, those that form protective oxide membrane. In diffusion coatings, the content of titanium, aluminum, silicon and chromium does not exceed 20–25%. Comparative characteristics of the heat resistance of alloyed titanium protective coatings, obtained in the mode of thermal self-ignition of the CPC process and in isothermal conditions at a test temperature of 900 ºC.

As a result of the research, it was found that with a simultaneous processing method, the main factor affecting the thickness of the coatings is the concentration of saturating elements in the reaction mixture. At the same time, during titanium chromium plating by the composite powder charges method, the supplier of active chromium atoms is both metallic chromium and the chromium component (CS). When saturated in mixtures containing CS and titanium or CS, titanium, chromium (provided that the total amount of chromium in the mixture is identical), a large coating thickness *a*.

Under these conditions of saturation, chromium has a higher diffusion coefficient than titanium, and thanks to a smaller atomic radius, it forms solid solutions of inclusion more easily. Therefore, it penetrates the substrate to a greater depth than titanium. Depending on the chemical composition of the substrate, the formation of $(Cr,Fe)_{23}C_6$ or $(Cr,Fe)_7C_3$ carbides alloyed with titanium is possible in the near-surface zone, and the zone of solid solution of Cr in α-iron is located below. With a two-stage processing method, the phase composition of the coating mainly depends on the sequence of saturation stages. During titanization with subsequent chromium saturation, carbides of the complex composition (Ti, Cr)C are formed on the surface of carbon steels (Ti content – 42%, Cr – 46%). Zones of carbides and α-solid solution are located below. If, at the first stage, saturation is carried out with chromium, and then with titanium, the predominant chroming occurs with the formation of higher carbide Cr_3C_2 with Cr_2Ti inclusions on the steel surface (Cr concentration is 78%, Ti concentration is insignificant).

As a result of X-ray structural and metal graphic analysis, it was established that a continuous, homogeneous, non-abrasive layer is formed on the surface of the steels. Adjacent to it is a transition zone formed as a result of counter diffusion, behind it is a carbon-depleted ferrite zone (Fig. 2), obtained by the SBS method on steel at 45°C, the duration of isothermal exposure – chrome plating;

b – simultaneous titanochromization. The phase composition of the zones depends significantly on the carbon content in the steel and the method of saturation. During simultaneous saturation, compounds of titanium with chromium are formed on the surface of the samples, which are the product of the SBS interaction (with the content of titanium and chromium in the surface layer of 66 and 34%, respectively), as well as carbides of the complex composition (Ti,Cr)C.

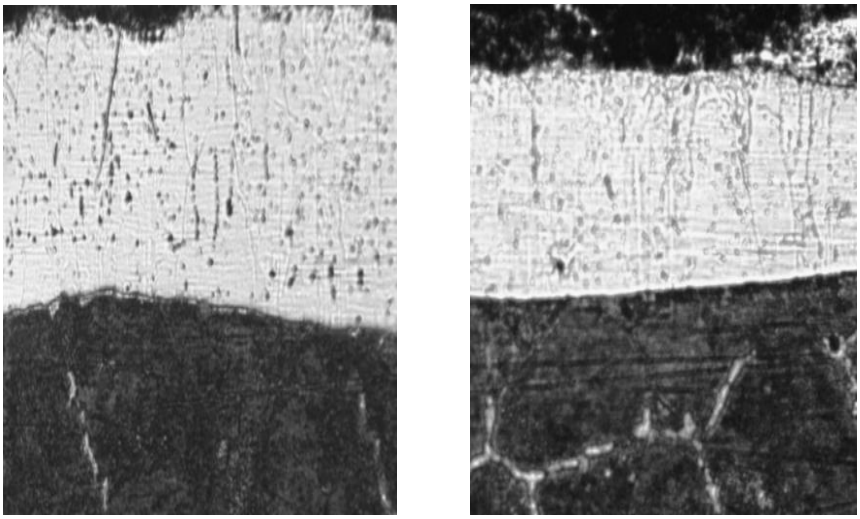


Fig. 2 – Microstructures (x100) of chromium-doped titanium coatings, at different exposure times, on U8 steel ($t_п$ –1000 ^oC): а – $\tau_в$ = 40 min; б – $\tau_в$ = 60 min

When examining the formed layers on the PMT-3 device, it was established that the microhardness of carbides (Ti, Cr)C on the surface of carbon steel varies within 16500–25000 MPa. The evaluation of wear resistance and corrosion resistance was carried out on samples made of steel 45 with chrome and titanium chrome coating obtained by various methods of processing and duration of isothermal exposure of 120 minutes (both for sequential and simultaneous saturation). According to the results of the tests, it was revealed that the best indicators of wear resistance and corrosion resistance are possessed by titanium chrome coatings obtained during two-stage processing (titanization followed by chromium plating.

Conclusions

1.Gas-transport technology with the use of CMP makes it possible to obtain high-quality chromium and titanium-chromium coatings on iron-carbon alloys. At complex saturation with several carbide-forming elements their influence on coating thickness, their phase and chemical composition has been studied. The method of obtaining significantly affects the performance properties of the coatings (sequential or simultaneous).

2. For obtaining coatings of considerable thickness and increasing their performance characteristics the two-stage technology with the use of CPP can be recommended. The sequential saturation with titanium and chromium provides a high concentration of these elements in the surface diffusion layer.

References

1. Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів з використанням композиційних насичуючих середовищ: монографія / Б.П. Середа, І.В. Кругляк, О.С Баскевич, Ю.О. Бєлоконь, Д.О. Кругляк, Д.Б. Середа. – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 242 с.

2. Sereda B., Palehova I., Sereda D. Modeling of phase transformation in the production of self-propagating high-temperature synthesis of wear-resistant coatings/ Material science and technology 2018. Columbus, Ohio, USA – P. 206–211.

3. Sereda B., Gaydaenko A., Kruglyak I., Sereda D. Obtaining surface coatings providing protection against extreme conditions of coke production/ Material science and technology - 2019. Portland, Orgon, USA. – P. 1318–1323.

© I. KRUGLYAK, B. SEREDA, I. PALEHOVA, D. SEREDA, D. KIPHORUK

4. Sereda B., Sereda D. Reduction of the internal and external oxidation of the charge during galvanizing under SHS conditions. Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 100–103.

5. Sereda B., Kruhliak I**.** Modeling and optimization of wear-resistant coatings production using ecd technology Mathematical modeling. 2022. №. 2 (47). P. 49–102.

6. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under composite powder charges Conditions for Car Parts. Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016–1339 p. P. 945–948.

7. Sereda B.P., Belokon Yu.O., Kruglyak I.V., Sereda D.B., Kruglyak D.O. Modeling and thermodynamic analysis of reactions during thermochemical pressing of intermetallic alloy powders. *Mathematical modeling.* 2021. №. 1 (46). P. 71–79.

8. Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Б.П. Середа, Л.П. Банніков, С.В. Нестеренко, І.В. Кругляк, О.С. Гайдаєнко, Д.Б. Середа – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 170с.

9. Sereda B.P., Palekhova I.V., Haydayenko O.S., Sereda D.B. Modeling of the process of titanium coating on designing materials in powdered environments. Mathematical modeling. 2018. № 2 (39). P. 147–153.

10. 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.

11. Sereda B., Palehova I., Sereda D. Modeling of phase transformation in the production of self-propagating high-temperature synthesis of wear-resistant coatings/ Material science and technology 2018. Columbus, Ohio, USA – P. 206–211.

12.Sereda B., Sereda D. Surface coatings improve the characteristics of materials obtained under SHS conditions/ Material science and technology – 2019. Portland, Orgon, USA. – P. 403-408.

13. Sereda B., Belokon Y., Sereda D., Kruglyak I. Modeling of processes for the production of bassed TiAl and NiAl in the conditions of SHS for aerospace applications, *Materials Science and Technology. Portland,* 2019, 137–142.

14. Sereda B.P., Baskevich V.V., Sobolev V.V., Sereda D.B. Modeling the conditions of phase transformations in microregions of metallic materials during ultra-deep penetration of microparticles. Mathematical modeling. 2021. №. 2 (45). P. 31–102.

Кругляк Ірина, Середа Борис, Палехова Ірина, Середа Дмитро, Кіфорук Дмитро
Дніпровський державний технічний університет

ОТРИМАННЯ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКОВИХ СЕРЕДОВИЩ

В роботі розглянуті методи отримання захисних зносостійких покриттів на сталях в режимі теплового самозапалювання. Показано результати досліджень структури та властивостей покриттів, отриманих при різних способах обробки (одночасному та послідовному). Із застосуванням методів математичного моделювання розроблено оптимальні склади шихт для нанесення зносостійких покриттів на деталях машин з використанням композиційних порошкових середовищ. Наведено аналіз значних параметрів, що впливають на структуру та експлуатаційні властивості покриттів, отриманих при різних способах обробки. Проведено дослідження зносостійкості одержаних шарів на вуглецевих сталях.

Ключові слова: *термостійкість, покриття, сталь, алюміній, хром, композиційні порошкові середовища.*

© I. KRUGLYAK, B. SEREDA, I. PALEHOVA, D. SEREDA, D. KIPHORUK

УДК 621.9.06(072):62-231
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-07
Кузнєцов Ю.М., д.т.н., проф., **Солнцев О.В.**, аспірант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ 3D-ПРИНТЕРА МОДУЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ НА БАЗІ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Після структурного аналізу і побудови працездатного 3D-принтера модульного компонуванння з механізмами паралельної структури (МПС) на базі триглайду. виконаний з використанням сучасних програмних продуктів кінематичний аналіз з послідовним покроковим вирішенням оберненої задачі кінематики, як важливої ланки системи керування. Запропонований підхід дозволяє вирішити пряму задачу кінематики і сформулювати рекомендації для подальших досліджень.

Ключові слова: *адитивні технології, кінематичний аналіз, 3D-принтер, пряма і обернена задача кінематики, механізм паралельної структури*

Актуальність дослідження та постановка проблеми. На сьогоднішній день налагодження будь-якого виробництва потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій. Так, крім звичних показників продуктивності, якості та безпеки всесвітньо враховуються додаткові вимоги до оптимізації виробництва з точки зору енергоефективності та екологічності. Такі положення можна втілити тільки за рахунок пошуку нових рішень [2,5,7].

Саме розвиток технологічного обладнання з МПС є одним з шляхів реалізації сучасних підходів, зокрема, використання адитивних технологій [3,10] і застосування модульного принципу [1], що дозволяє підвищити продуктивність виготовлення виробів, зменшити час та витрати на проектування, складання і переналагодження.

Роботи по дослідженню кінематики і динаміки 3D-принтерів з МПС є актуальними і сприяють подальшому удосконаленню адитивних технологій при створенні високопродуктивної і високоточної техніки нових поколінь [7] НН, в тому числі мультифункціональної [13], в умовах викликів четвертої промислової революції «Індустрія 4.0».

Вихідні дані. Спрощена модель 3Д-принтера на базі триглайду, що використовується для демонстрації покрового вирішення оберненої задачі кінематики, показана на рис.1

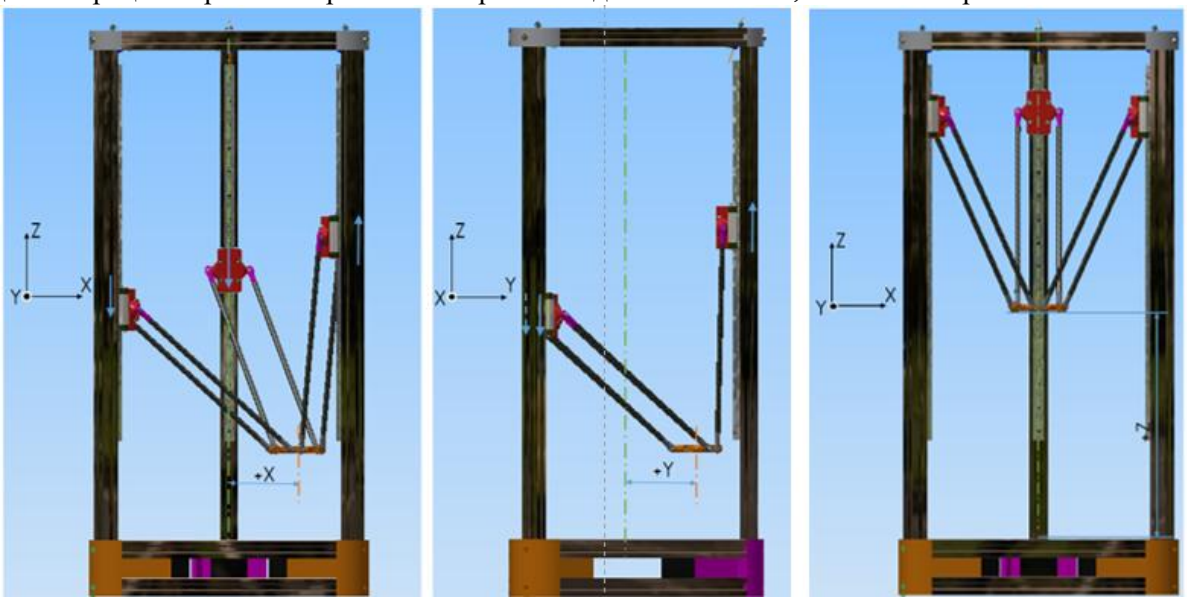


Рис. 1. CAD-модель 3D-принтера на основі триглайду

© Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В.

Розглянемо кінематичну схему (рис.2), де позначені: 1-3 – напрямні координатних переміщень; 4-9 – паралельні штанги постійної довжини; 10 – рухома платформа (вихідна ланка ВЛ).

Аналіз обладнання з МПС потребує розробки додаткових методик та алгоритмів [2,4,8,9,11]. Так для забезпечення працездатності механізму, кінематичну схему було спрощено наступним чином. Модуль паралельних штанг було зведено до однієї штанги постійної довжини. Тоді кінематичні пари (КП), що відповідали попарним сферичним шарнірам зведуться до однієї кінематичної пари (рис.2).

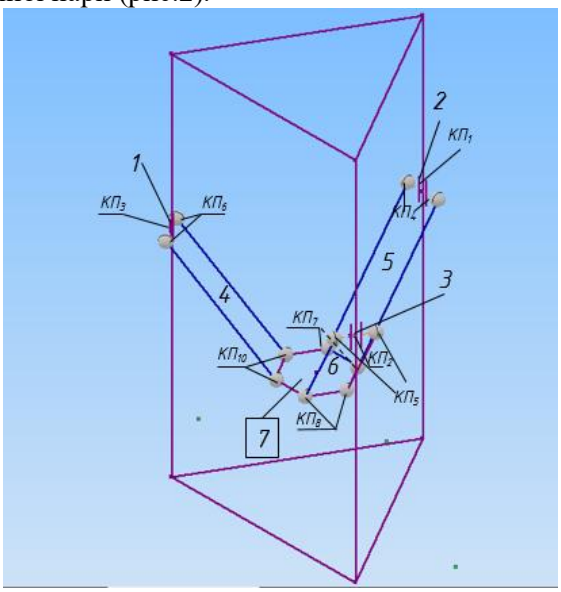


Рис. 2. Кінематична схема 3D-принтера на основі триглайду

Вирішення прямої задачі кінематики 3D-принтера графо-аналітичним методом.

Основні задачі кінематичного аналізу сформульовані наступним чином:

1. Визначення траєкторій руху вихідної ланки за заданими законам руху приводів (*пряма задача кінематики*).
2. Визначення законів переміщення керованих координат приводів, що забезпечують необхідний закон переміщення вихідної ланки механізму.
3. Визначення швидкості ВЛ по заданим швидкостям керованих приводних координат, а також рішення оберненої задачі, тобто визначення швидкостей керованих координат, що забезпечують задані швидкості вихідної ланки.
4. Рішення лінійних рівнянь для розрахунку управління виконавчими приводами забезпечення заданого закону переміщення вихідної ланки.

Проектування 3D-принтера на основі триглайду вимагає формалізації зв'язків між компонентами системи (рис.3) для математичного опису з подальшим візуальним моделюванням, оцінкою очікуваних технічних характеристик, визначення оптимальних значень показників і проектування запропонованих верстатів.

Рис.3. Операції, пов’язані з кінематичним аналізом при проектуванні 3D-принтера

Для отримання математичних залежностей між координатами характерних точок кінематичних ланцюгів і вирішення прямої задачі кінематики про положення робочого органу 3D-принтера на основі триглайду введемо наступні позначення (табл.1).

Таблиця 1

Параметри для кінематичного аналізу та керування 3D-принтером

Позначення	Пояснення	Назва параметру в керуючій програмі	Фактичне значення розміру досліджуваного 3D принтера (мм)
x, y, z	Координати положення ВЛ		
A, B, C	Умовне позначення колон принтера		
A_1, B_1, C_1	Умовні точки, розташовані на платформі робочого органу		
A_2, B_2, C_2	Умовні точки, розташовані на каретках принтера		
z_{max}	Висота робочого простору вздовж координати Z	Z_MAX_LENTH	251
t	Точка, розташована на робочому органі		
l	Довжина штанги	DIAGONAL_ROD_LENGTH	217
p_0	Відстань від центра шарніра штанги до осі робочого органу (ефектора)	DELTA_EFFECTOR_OFFSET	50
a_0	Відстань від умовної вертикалі, яка проходить через шарнір штанги з'єднаного з кареткою до	HORIZONTAL_RADIUS_WHEN_CENTERED	96*
α, β, γ	Відстань до кінцевого вимикача до каретки у «домашньому положенні)	TOWER_CARRIAGE_POSITION _ OFFSETS	По замовченню 0
i	Індекс, що присвоюють параметрам, що будуть змінені після калібрування		

Визначимо положення точок:

$$\begin{vmatrix} A_1\ (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z}) \\ B_1(b_{1x}, b_{1y}, b_{1z}) \\ C_1(c_{1x}, c_{1y}, c_{1z}) \end{vmatrix} \quad (1)$$

Точки A_1 , B_1, C_1, у системі координат пов'язані з основою принтера. Для цього розглянемо схему (рис.4).

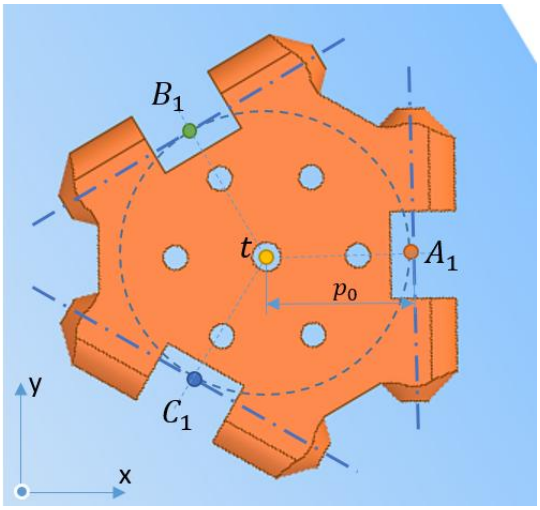


Рис. 4. Схема платформи для кінематичного аналізу

Зведемо у табл.2 математичні залежності для опису положення точок A_1 , B_1, C_1:

Таблиця 2

Визначення положення точок A_1 , B_1, C_1 в загальній системі координат

A_1	B_1	C_1
$a_{1x} = t_x + p_0$	$b_{1x} = t_x + p_0 \cdot \cos(120°)$	$c_{1x} = t_x + p_0 \cdot \cos(240°)$
$a_{1y} = t_y$	$b_{1y} = t_y + p_0 \cdot \sin(120°)$	$c_{1y} = t_y + p_0 \cdot \sin(240°)$
$a_{1z} = t_z + t_0$	$b_{1z} = t_z + t_0$	$c_{1z} = t_z + t_0$

Використаємо математичну залежність між точками на платформі A_1 , B_1, C_1 та відповідними точкам на каретках (рис.5).

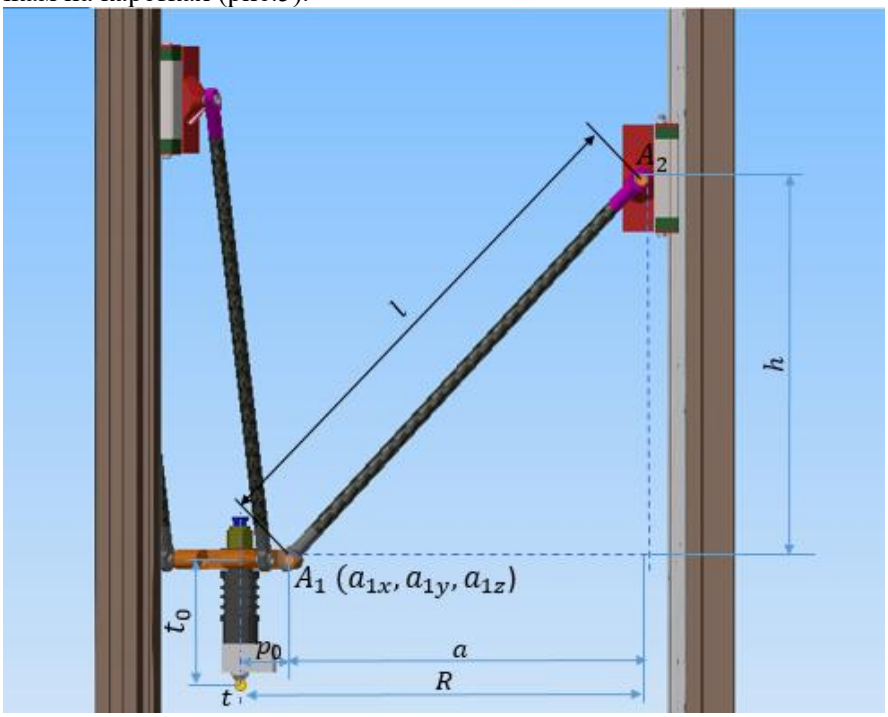


Рис. 5. Опорна кінематична схема 3D-принтера

© Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В.

$$\begin{cases} A_2\ (a_{2x}, a_{2y}, a_{2z}) \\ B_2(b_{2x}, b_{2y}, b_{2z}) \\ C_2(c_{2x}, c_{2y}, c_{2z}) \end{cases} \quad (2)$$

Координати *x* та y для точок A_2, B_2, C_2 в системі координат, що пов'язані з основою принтера, є відомими та постійними величинами. Зміна координати *z* відповідає переміщенню каретки вздовж напрямних. Сформуємо таблицю (табл.3)

Таблиця 3

Положення точок A_2, B_2, C_2 в загальній системі координат

A_2	B_2	C_2
$a_{2x} = R_0$	$b_{2x} = R_0 \cdot \cos(120°)$	$c_{2x} = R_0 \cdot \cos(240°)$
$a_{2y} = 0$	$b_{2y} = R_0 \cdot \sin(120°)$	$c_{2y} = R_0 \cdot \sin(240°)$
$a_{2z} = ?$	$b_{2z} = ?$	$c_{2z} = ?$

Знайдемо рівняння, якими описується зміна відстані від платформи до колон у площині *x-y* (рис. 6):

$$\begin{cases} a_a = \sqrt{(a_{2x} - a_{1x})^2 + (a_{2y} - a_{1y})^2} \\ a_b = \sqrt{(b_{2x} - b_{1x})^2 + (b_{2y} - b_{1y})^2} \\ a_c = \sqrt{(c_{2x} - c_{1x})^2 + (c_{2y} - c_{1y})^2} \end{cases} \quad (3)$$

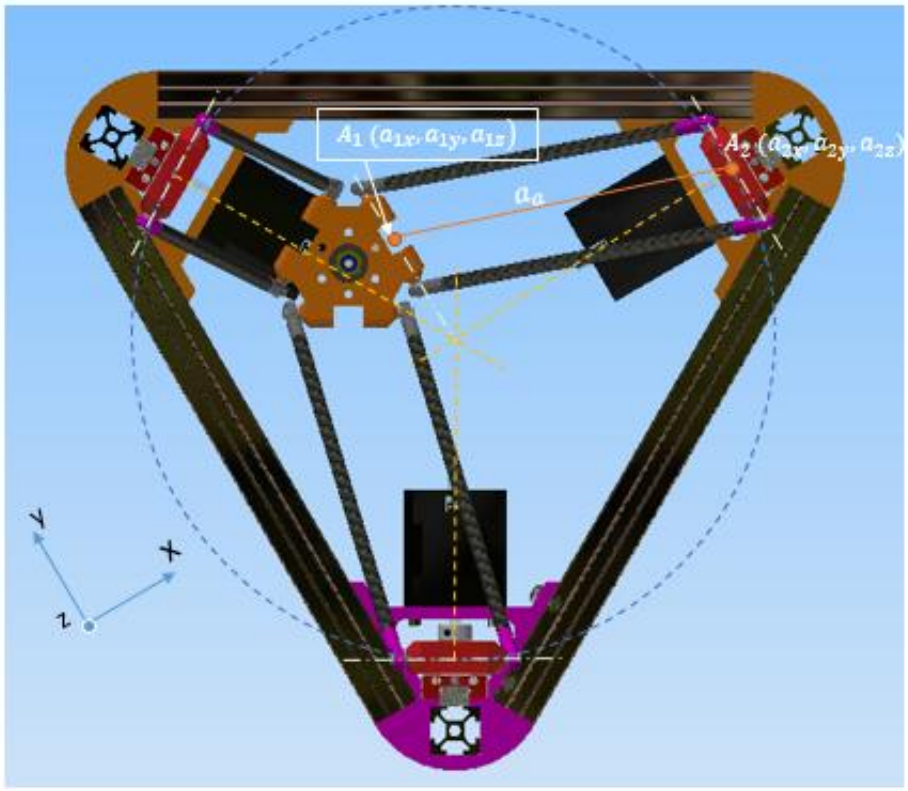


Рис. 6. Опорна схема 3D-принтера, вид зверху

© Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В.

Розрахуємо зміну відстані від платформи до каретки вздовж координати *z*:

$$\begin{cases} h_a = \sqrt{l^2 - {a_a}^2} \\ h_b = \sqrt{l^2 + {a_b}^2} \\ h_c = \sqrt{l^2 + {a_c}^2} \end{cases} \quad (4)$$

Таким чином, шукані величини переміщень кареток вздовж напрямних в залежності від зміни положення робочого органу можна знайти за формулою (рішення оберненої задачі кінематики):

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + h_a \\ b_{2z} = t_z + t_0 + h_b \\ c_{2z} = t_z + t_0 + h_c \end{cases} \quad (5)$$

Або, підставивши у (5) формули (3) та (4), отримаємо:

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 - (a_{2x} - a_{1x})^2 + (a_{2y} - a_{1y})^2} \\ b_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (b_{2x} - b_{1x})^2 + (b_{2y} - b_{1y})^2} \\ c_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (c_{2x} - c_{1x})^2 + (c_{2y} - c_{1y})^2} \end{cases} \quad (6)$$

Зведемо систему рівнянь (6) до вигляду:

$$\begin{cases} a_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \\ b_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \\ c_{2z} = f(t_x; t_y; t_z) \end{cases} \quad (7)$$

В розгорнутому вигляді

$$\begin{cases} a_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 - (R_0 - (t_x + p_0))^2 + {t_y}^2} \\ b_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (R_0 \cdot \cos(120°) - (t_x + p_0 \cdot \cos(120°))^2 + (R_0 \cdot \sin(120°) - (t_y + p_0 \cdot \sin(120°))} \\ c_{2z} = t_z + t_0 + \sqrt{l^2 + (R_0 \cdot \cos(240°) - (t_x + p_0 \cdot \cos(240°))^2 + (R_0 \cdot \sin(240°) - t_y + p_0 \cdot \sin(240°))} \end{cases} \quad (8)$$

Таким чином була отримана залежність (8), яка покладена в основу керуючої програми та буде використана для подальшого аналізу.

Використання САПР MATHCAD для аналізу 3D-принтера на основі Триглайду. Розроблено програму в САПР Mathcad, за допомогою якої можна записувати анімації руху принтера за заданою траєкторією, будувати та аналізувати кінематичні характеристики ланок. Так на рис. 7 наведено графіки швидкості, переміщення та прискорення кареток принтеру при проходженні робочого органу спіралі Архімеда. Ця траєкторія є типовою для 3D-друку, адже всі колові контури заповнюються по спіралі.

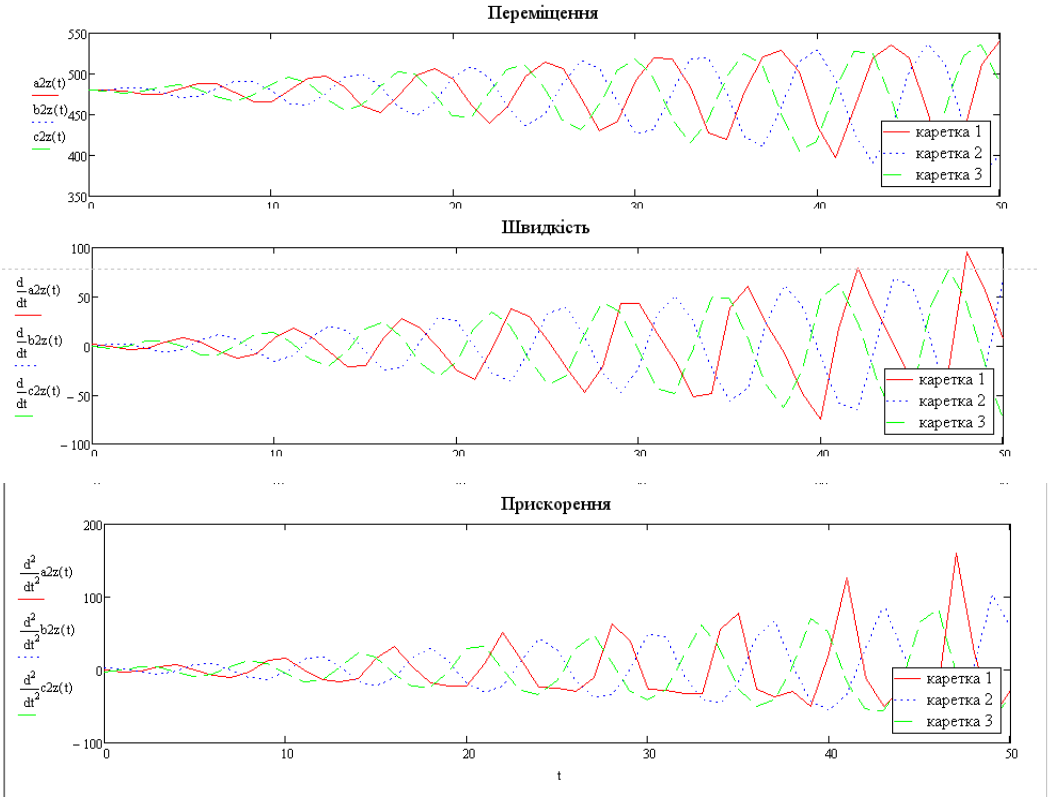


Рис. 7. Аналіз кінематичних характеристик при заданій траєкторії руху робочого органу

Математично вирішення прямої задачі кінематики можна звести до знаходження наступної системи співвідношень:

$$\begin{cases} t_x = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \\ t_y = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \\ t_z = f(a_{2z}; b_{2z}; c_{2z}) \end{cases} \quad (9)$$

Складність вирішення прямої задачі кінематики, полягає в тому що при вирішенні даної задачі виникає математична невизначеність. Тобто вихід в позицію РО з координатами (t_x, t_y, t_z) можна досягти більше як одним способом, тобто за різною траєкторією. Тому дана задача вирішується програмно на основі рівнянь, що були знайдені при вирішенні зворотної задачі.

Висновки. 1.Запропонований підхід з розв'язанням системи рівнянь і САПР MATHCAD дозволяє вирішувати пряму задачу кінематики 3D-принтера з МПС. 2.Результати виконаного кінематичного аналізу з подальшим динамічним аналізом будуть сприяти удосконаленню існуючих 3D-принтерів і створенню принципово нових з розширеними функціональними можливостями.

Інформаційні джерела

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання. Ч.1 / [Під ред. Ю.М. Кузнєцова] – Кіровоград: Імекс ЛТД, 2004. – 442 с.

2. Афонин В.Л. Обрабатывающие оборудование на основе механизмовипараллельной структуры / [Под общ. ред. В.Л. Афонина] В.Л.Афонин, П.В.Подзоров, В.В.Слепцов. – М.: Издательство МГТУ Станкин, Янус–К., 2006. – 452 с.

3. Интегрованные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография. Под ред. Л.Л. Таважнянского, А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель вселенной»,2002. – 140с.

© Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В.

4. Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Валявський І. А., Скляров Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Під ред. Ю. М. Кузнєцова. — Кіровоград, 2004. — 449с.

5. Кузнєцов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Фіранський В.Б., Степаненко О.О. Реалізація концепції каркасних компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // Наукові вісті НТУУ «КПІ»; №1, 2012 с. 104 – 111.

6. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А., Диневич Г.Е. Компоновки станков с механизмами параллельной структуры / Под ред. Ю.Н. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирский В.С., 2010. – 471 с.

7. Мазеин П.Г. Программно-технические комплексы и технологии для подготовки машиностроителей / П.Г. Мазеин, С.С. Панов // VI Международная н/т конф. «Стратегия человечества в промышленности и образовании» (4-11 июня 2010 г., Варна, Болгария, Технический университет). – Варна. 2010. Т2, ч.1. – с. 45-50.

8. Солнцев О.В., Дем'яненко А.С. Реалізація алгоритмів ПІД-Регулювання при управлінні приводами маніпуляторів в середовищі LabView // Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу", випуск 2. Херсон: ХНТУ, 2015.

9. Avriel, Mordecai. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. — Dover Publishing, 2003. — ISBN 0-486-43227-0

10. Charles Bell. 3D Printing with Delta Printers – Apress, 2015

11. Nocedal, Jeorge; Wright, Stephen J. Numerical Optimization. — 2nd edition. USA: Springer, 2006. — ISBN 978-0-387-30303-1

12. Yuri N. Kuznetsov, Dmitriy Dmitriev Realization of frame-configurations conception of machine-tools with mechanisms parallel structure //Journal of Technical University of Gabrovo, vol.54, 2017, p.p.27-31.

13. Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.65, 2022.-p.p.1-6.

Kuznietsov Y.N., Solntsev O.V.
National technical University of Ukraine “Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute”, Ukraine

KINEMATIC ANALYSIS OF A 3D PRINTER WITH MODULAR COMPOSITION BASED ON THE PARALLEL STRUCTURE MECHANISM

After the structural analysis and design of a 3D-printer with modular layout and parallel structure mechanisms, a kinematic analysis was performed using modern software products with a sequential step-by-step solution of the inverse kinematics problem as an important part of the control system. The proposed approach allows solving the direct problem of kinematics and formulating recommendations for further research.

Keywords: *additive technologies, kinematic analysis, 3D printer, direct and inverse kinematics problem, parallel structure mechanism*

© Кузнєцов Ю.М., Солнцев О.В.

УДК 621.822:681.2:369.64
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-08
Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* **Мельник М.В..**
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НЕРІВНОСТЕЙ ПОВЕРХНІ

В статті проведено дослідження технологічного походження нерівностей поверхні шляхом аналізу впливу технологічних факторів на формоутворення нерівностей поверхні доцільно, у всякому разі в першому наближенні, представити їхню сукупність як лінійну систему впливів, що дозволяє на основі теореми суперпозиції розглядати послідовно ефекти впливу окремих факторів, змінюючи одні фактори іншими, їм еквівалентними. Оскільки дія найважливіших формотворних факторів періодична чи майже періодична, то на основі теореми про спектри поверхні можна простежити ефекти впливу кожного з них, розглядаючи спектри поверхонь і їхніх профілів. Такий підхід дозволяє на основі теореми про частотну діагностику судити про причетність тих чи інших факторів до утворення важливих в експлуатаційному відношенні особливостей профілю нерівностей і його складових. У випадку недостатності випадкової складової профілю нерівностей поверхні можна використовувати на основі відповідної теореми довірчу оцінку профілів, застосовуючи розподіл Стьюдента і Фішера.

Дослідження технологічного походження нерівностей поверхні показало що для аналізу спектра нерівностей в разі застосування електронного аналізатора спектрів і частотних характеристик (АСЧХ) необхідно нижню границю вимірювання встановити на 20 Гц. З аналізу аналітичних і експериментальних досліджень точності формоутворення кілець підшипників на операціях точіння і шліфування випливає, що похибки форми від пружних деформацій деталі під дією сил різання складають 80-85% сумарної похибки.

Ключові слова: *відхилення форми, технологічний процес, точність, підшипник, похибка.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

Принципи аналізу технологічного походження нерівностей поверхні за експериментальними даними можна сформулювати на основі фізико-технологічної теорії розмірних параметрів у такий спосіб. При аналізі впливу технологічних факторів на формоутворення нерівностей поверхні доцільно, у всякому разі в першому наближенні, представити їхню сукупність як лінійну систему впливів, що дозволяє на основі теореми суперпозиції розглядати послідовно ефекти впливу окремих факторів, змінюючи одні фактори іншими, їм еквівалентними. Оскільки дія найважливіших формотворних факторів періодична чи майже періодична, то на основі теореми про спектри поверхні можна простежити ефекти впливу кожного з них, розглядаючи спектри поверхонь і їхніх профілів. Такий підхід дозволяє на основі теореми про частотну діагностику судити про причетність тих чи інших факторів до утворення важливих в експлуатаційному відношенні особливостей профілю нерівностей і його складових. У випадку недостатності випадкової складової профілю нерівностей поверхні можна використовувати на основі відповідної теореми довірчу оцінку профілів, застосовуючи розподіл Стьюдента і Фішера.

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

Дослідження в галузі точності технологічних процесів і операцій являються базою та передумовою для створення систем управління якістю виробів, що особливо важливо для умов автоматизованого виробництва. Вимогам сучасного виробництва не задовольняє управління, що обмежується першопочатковим налагоджуванням устаткування, підналагоджуваннями координат розміщення інструменту, або заміною неякісного інструменту. Багато технологічних процесів вимагають використання вдосконалених засобів керування, включаючи самоналагоджувальні системи керування, що забезпечують оптимальний хід технологічного процесу навіть при випадкових коливаннях характеристик оброблюваності матеріалу і інтенсивності зношуваності інструменту, а також при температурних, силових та інших збуреннях. Для створення таких систем управління точністю та якістю виробів необхідне

© © Лапченко Ю.С., Мельник М.В.

математичне описання технологічного процесу з врахуванням наслідків впливу на нього широкого спектру різнорідних зовнішніх та внутрішніх чинників.

Комплексна задача підвищення точності і ефективності обробки вирішується як за рахунок використання традиційних методів підвищення точності, які ґрунтуються на покращенні технологічних характеристик верстатів і проектування технологічних процесів з заданою точністю (конструкторські методи керування точністю та керування положенням розміщення інструменту відносно заготовки), так і за рахунок безпосереднього керування режимами різання, пружною системою, збуреннями, що впливають на процес механообробки. Переваги останнього напряму полягають не тільки в можливості зменшення впливу деяких чинників, що сприяють появі похибок обробки, але і повного їх виключення шляхом використання зворотних зв'язків. Дослідження взаємозв'язків між чинниками, що супроводжують процес формоутворення, являється досить складним завданням багатофакторного аналізу, вирішення якого дозволило виділити домінуючі з них, які і покладені в основу функціонування систем автоматичного та адаптивного керування процесом механічної обробки деталей.

Під точністю в технології машинобудування розуміється ступінь відповідності виробів наперед встановленому зразку. Загально признано [1, 2, 3], що проблема точності в технології машино- та приладобудування повинна розглядатись комплексно для всього технологічного процесу. При цьому похибки залежать не тільки від варіанту технологічного процесу, але і визначаються взаємодією на технологічний процес значної кількості систематичних та випадкових чинників, таких як неточність встановлення інструменту, його зношуваність, неточність вимірювання розмірів і т. п. [4].

Аналіз робіт показує, що в дослідженні точності можливо виділити три основних напрямки [5]: перший напрямок носить геометричний характер, базується на теорії розмірних ланцюгів, розроблений [6]; другий пов'язаний з дослідженням в основному жорсткісних характеристик деталей, технологічного устаткування, спорядження і їх впливу на точність та міцність технологічних систем [7]; третій напрямок базується на поєднанні та врахуванні всього комплексу чинників, в тому числі геометричних і жорсткісних [2, 4].

Мета статті (формулювання цілей статті).

Метою статті є дослідження технологічного походження нерівностей поверхні шляхом аналізу впливу технологічних факторів на формоутворення нерівностей поверхні на базі фізико-технологічної теорії.

Постановка завдання.

Оскільки дія найважливіших формотворних факторів періодична чи майже періодична, то на основі теореми про спектри поверхні можна простежити ефекти впливу кожного з них, розглядаючи спектри поверхонь і їхніх профілів. Такий підхід дозволяє на основі теореми про частотну діагностику судити про причетність тих чи інших факторів до утворення важливих в експлуатаційному відношенні особливостей профілю нерівностей і його складових. У випадку недостатності випадкової складової профілю нерівностей поверхні можна використовувати на основі відповідної теореми довірчу оцінку профілів, застосовуючи розподіл Стьюдента і Фішера.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

В геометричному розмірному аналізі на основі теорії розмірних ланцюгів розроблені правила та принципи, як наприклад принцип єдності баз [6], принцип найкоротшого шляху [7], принцип суміщення та постійності баз [8], умова найменшої похибки [9], котрі дозволяють раціонально вибирати способи базування деталей для забезпечення заданої точності. Розроблена схема формування похибок, що враховує реальні форми деталей, дозволила допуски на положення деталі в машині виразити як функції параметрів, які характеризують відхилення форм від ідеальних. В результаті такого підходу встановлено, що внаслідок криволінійності поверхонь деталі можуть взаємодіяти між собою через комплект опорних точок, котрі розглядаються як матеріалізація системи координат, що зв'язана з деталлю. При цьому до кожної деталі прив'язуються системи координат, що побудовані на основних і допоміжних базах, та система координат машини. Складові переносу і відносного повороту координатних систем дозволяють судити про відносне положення як поверхонь деталей, так і деталі в цілому. Цей підхід віддзеркалився в ГОСТ 21495-76 згідно з яким при базуванні деталей досягається співпадіння координатних систем опорних точок, побудованих на

© Лапченко Ю.С., Мельник М.В.

елементах пристроїв і на основних базах деталей. Деталі розглядаються як абсолютно тверді тіла, форма яких не змінюється від зусиль закріплення та різання, що має підґрунтя при обробці жорстких деталей.

Такий аналіз можна здійснювати за допомогою механічних і електронних аналізаторів, а також застосовуючи розповсюджені в даний час електронне обчислювальні машини (ЕОМ). Механічні аналізатори при порівняно низькій швидкості їхньої дії мають перевагу великої наочності. Механічний гармонійний аналізатор МГА дозволяє визначати коефіцієнти a_n і b_n ряду Фур'є

$$y(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n\cos\frac{n2\pi x}{B_1}+b_n\sin\frac{n2\pi x}{B_1}\right), \tag{1}$$

де x, y – абсциса й ордината періодичної систематичний складової профілю;B1 – крок першої (основної) гармоніки;

$$\frac{a_0}{2}=2\frac{1}{l}\int_0^l y(x)\,dx\sim\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1}y_i- \tag{2}$$

нульовий член розкладання (ордината середньої лінії профілю в такій вихідній системі координат, у якій абсциса рівнобіжна середній лінії профілю); l – довжина ділянки профілю, на якій здійснюється розкладання профілю в ряд Фур'є ($l=B_1$); N – число ординат y_i профілю у вихідній системі на довжині B, вимірюваних для наближеної оцінки $\frac{a_0}{2}$; a_n – коефіцієнт при косинусах

$$a_n=2\frac{1}{l}\int_0^l y(x)\cos\frac{n2\pi x}{l}\,dx\sim\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1}y_i\cos\frac{2\pi n_i}{N}; \tag{3}$$

n – порядковий номер "гармоніки", що вказує, у скільки разів її крок менше B_1, b_n – коефіцієнт при синусах

$$b_n=2\frac{1}{l}\int_0^l y(x)\sin\frac{n2\pi x}{l}\,dx\sim\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1}y_i\sin\frac{2\pi n_i}{N}. \tag{4}$$

Ряд (1) можна представити у вигляді

$$y(x)=\left\{\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\sin\left(\frac{2\pi x}{B_n}+\psi_n\right)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left(\frac{2\pi x}{B_n}+\psi_n-\frac{\pi}{2}\right)\right\}, \tag{5}$$

де $B_n=\frac{B_1}{n}$ крок n-ї гармоніки;

$$A_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2} \tag{6}$$

її амплітуда;

$$\psi_n=arctg\frac{a_n}{b_n} \tag{7}$$

її фазовий кут.

Ступінь повноти представлення профілю нерівностей тригонометричним поліномом виду (1) чи (2) оцінюють на підставі рівняння Парсеваля–Ляпунова співвідношенням

$$\xi_n=\frac{1}{R_q^2}\sum_{n=1}^{p}\frac{A_n^2}{2}, \tag{8}$$

де Rq – середнє квадратичне відхилення профілю.

МГА включає синусно-косинусний механізм і два геодезичних планіметри. За допомогою синусно-косинусного механізму функція (1) перетвориться у функції

Yc (Xc) або Ys (Xs), (9)

де

$$X_c=\cos\left(\frac{n2\pi x}{B_1}\right);\quad X_s=\sin\left(\frac{n2\pi x}{B_1}\right).$$

На профілограмі, використовуваної при гармонійному аналізі, вибирають характерну ділянку, довжина якої повинна бути не більш $L_{кр}$=400 мм (краще до 350 мм). При цьому коефіцієнти b_n і a_n можуть мати значення від –160 до +160 мм графіка. Профілограму з

записаним профілем 14 приколюють до креслярської дошки і на профілі проводять вісь x як його середню лінію (рис. 1).

До приладу прикладається металевий настановний косинець 15 під кутом 90°. На його повздовжній лінійці (вісь x) нанесена шкала з нулем посередині й оцифрованими поділками 2, 4, ..., 40 з інтервалом у 5 мм у кожну сторону від нуля. Нульову поділку шкали сполучають із серединою обраної ділянки профілю, прикладаючи повздовжню лінійку впритул до осі x, і відзначають кінці обраної ділянки за оцифрованими поділками лінійки. Наприклад, якщо ділянка має по середній лінії довжину 200 мм, то кінці його повинні збігатися з відмітками 20 по одну й іншу сторону від нульової поділки повздовжньої лінійки. На поперечній лінійці косинця 15 (вісь y) нанесена риска, проти якої встановлюють нульовий розподіл металевої рейки 5 з направляючим пазом, по якому переміщуються ролики великої каретки 6. Рейку кріплять спеціальними кнопками до тієї креслярської дошки, до якого приколена профілограма. Косинець 15 забирають і ставлять каретку 6 роликами в паз рейки 5. В отвір, що є в правій частині каретки 6, вводять вісь 11, яка знаходиться поблизу вершини прямого кута обвідного Г-подібного важеля 12, на довгому плечі якого нанесена шкала з оцифрованими поділками від 2 до 40; вздовж цього плеча може переміщуватися візира 13, із внутрішньої сторони двигуна якого є риска. Візира 13 установлюють на важелі 12 так, щоб його риска збіглася з поділкою, цифра якої дорівнює довжині обраної ділянки, вираженої в сантиметрах. Другу вісь 10, що знаходиться на кінці короткого плеча важеля 12, вставляють у повздовжній паз 9 малої каретки 7, що переміщується по направляючим 8 каретки 6. На каретці 7 жорстко закріплена зубчаста рейка 16 із двома рисками у верхній частині й однією рискою у нижній частині. На каретці 6 жорстко закріплені дві металеві пластини 17 із гніздами для змінних зубчатих коліс 3. Кожне гніздо і кожне змінне зубчасте колесо відзначені однаковими номерами n тих гармонік, коефіцієнти a_n, і b_n яких визначають з їх допомогою. зубчаті колеса є для всіх гармонік з n=1 до n=25, за винятком n=20, 22 і 24. На кожному зубчатому колесі є по два малих отвори, розташованих на однакових відстанях від осі обертання на радіусах, кут між якими дорівнює 90°. Один отвір, позначений буквою C (косинус), використовують при визначенні коефіцієнта a_n, інший отвір, позначений буквою S (синус), служить при визначенні коефіцієнта b_n.

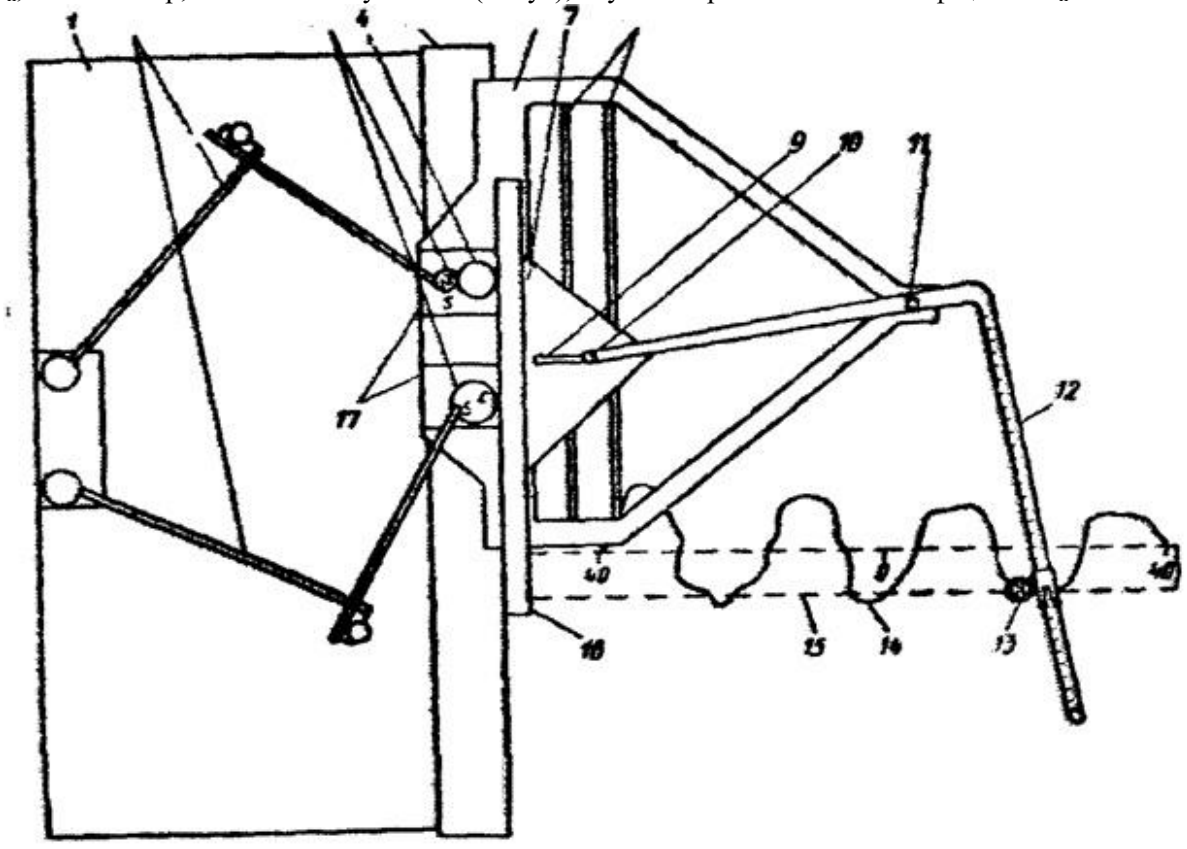


Рис. 1. Механічний гармонійний аналізатор МГА

В отвори C й S вставляють обвідний штифт одного з геодезичних планіметрів 2, а голку

© Лапченко Ю.С., Мельник М.В.

його фіксатора зміщнюють у металевій пластині дерев'яної підставки 1, присунутої впритул до рейки 5. Вставляючи вісь зубчастого колеса, потрібного для визначення того чи іншого коефіцієнта a_n чи b_n, домагаються, щоб наявна на зубчатому колесі риска збіглася з відповідною рискою на рейці 16, а потім з'єднують обвідний штифт планіметра з отвором С чи S. При цьому перехрестя візира 13 повинне збігатися з початком координат на профілограмі 14, тобто з крайньою лівою точкою на середній лінії аналізованої ділянки профілю. У цьому положенні роблять за відліковим пристроєм планіметра початковий відлік. Візиром 13 акуратно обводять профіль до кінця обраної ділянки і повертають його в початок координат по осі х (по середній лінії профілю), після чого роблять кінцевий відлік і віднімають з нього початковий відлік. Це і буде значення обумовленого коефіцієнта в поділках відлікового пристрою планіметра 2. Його потрібно помножити на ціну поділки, щоб одержати обумовлений коефіцієнт an чи bn у міліметрах профілограми. Для гармонік 1–6 ціна поділки j дорівнює 0,1 мм.

Гармоніки 7–25 визначають, застосовуючи один з п'яти прикладених до приладу проміжних блоків 4, що складаються з двох зубчатих коліс кожний. Одне зубчасте колесо блоку вводять у зачеплення з рейкою, а друге із шестернею, призначеною для визначення коефіцієнта a_n чи b_n гармоніки. У цьому випадку j=0,05 мм. Користуючись обома планіметрами 2, можна одночасно визначати коефіцієнти an двох різних гармонік (чи a_n однієї гармоніки і b_n іншої гармоніки). Для того щоб уникнути грубих помилок, процедуру визначення кожного коефіцієнта Фур'є виконують 2 рази, і якщо дві отримані різниці відліків за планіметрами відрізняються один від одного не більше ніж на 5 одиниць, то коефіцієнт Фур'є визначають за середнім значенням із двох отриманих різниць відліків за планіметром. Якщо ж вони відрізняються більше, ніж на 5 одиниць, то процедуру виконують утретє, а розрахунок ведуть по середній із двох досить близьких різниць. Якщо вісь абсцис не збігається із середньою лінією профілю, то нульовий член розкладання a_0 визначають за допомогою планіметра без застосування аналізатора: обводять штифтом профіль планіметра, повертають штифт у початкове положення й отриману різницю кінцевого і початкового відліків поділяють на довжину аналізованої ділянки. Дослідження показали, що похибка обведення складного профілю нерівностей з імовірністю Р=0,7 лежить у межах 17–25% значення обумовленого коефіцієнта високої гармоніки. У випадку істотної некратності кроків компонент профілю нерівностей спектр його може бути описаний тригонометричним поліномом.

Коефіцієнти при косинусах і синусах можуть бути знайдені за формулами

$$a_k = \frac{1}{N}\sum_{\alpha=1}^{N} U_\alpha \cos\frac{\pi}{N}\alpha k\ ; \tag{10}$$

$$b_k = \frac{1}{N}\sum_{\alpha=1}^{N} V_\alpha \sin\frac{\pi}{N}\alpha k\ , \tag{11}$$

де 2N+ 1 – непарне число ординат аналізованого профілю;

$$U_\alpha = Y_\alpha + Y_{\_\alpha}\ ; \tag{12}$$

$$V_\alpha = Y_\alpha - Y_{\_\alpha}\ (\alpha=0, 1, 2, \ldots,N), \tag{13}$$

причому в суму (10) перше й останнє значення входять з коефіцієнтом 1/2; Yα , Y_α – ординати профілю в точках α і – α, при розташуванні початку відліку в середній точці профілю по його довжині.

Якщо періоди всіх компонентів такі, що відношення $\frac{N\theta_n}{\pi}$ є цілими числами, то співвідношення (10) і (11) визначають амплітуди при косинусах і синусах. Якщо точне значення m+ε цього відношення лежить між двома цілими числами m й m+1, то останні розпізнаються за перериванням знаками + + чи – – регулярного чергування знаків ± амплітуд a_k і b_k.

Поправка визначається співвідношенням

$$\varepsilon = -\frac{2-q_k}{1+q_k}, \tag{14}$$

де

$$q_k = \frac{Z_k}{Z_{k+1}};\quad Z_k = Y_{k-1} + 2Y_k + Y_{k+1}\,. \tag{15}$$

Якщо коефіцієнт a_k чи b_k не дорівнює нулю, то це вказує на те, що вихідні дані містять

частоти

$$\theta = \frac{\pi}{N} k \,. \tag{16}$$

Якщо число спостережень відносно мале, а пікові значення дуже близькі один до одного, то фокусуюча дія вагової функції підсилюють σ-згладжуванням, перед утворенням сум вихідні дані множать на вагові множники

$$\bar{U}_k = U_k \, \sigma_k; \quad \bar{V}_k = V_k \, \sigma_k; \tag{17}$$

$$\sigma_k = \frac{\sin \dfrac{k\pi}{N}}{\dfrac{k\pi}{N}} \,. \tag{18}$$

У тім же випадку несумірності періодів періодичних складових профілю для одержання тригонометричного полінома виду

$$Y(x) \approx \sum_{n=1}^{p} A_n \cos \theta_n x \,, \tag{19}$$

де A_n – амплітуда n-ї компоненти; $\theta_n = \dfrac{2\pi}{B_n}$ – кутова частота; B_n – крок n-ї складової, відділення парної частини (11) профілю від непарної виробляється за допомогою перетворення (10).

Для судження про ступінь кратності кроків складових профілю використовують автокореляційну функцію Ку (τ) і спектральну щільність S (θ) у якості фокусуючих перетворень, що обчислюються за формулами

$$K_y(\tau) \approx \frac{1}{2a} \int_{-a}^{a} y(x) \, y(x+\tau) \, d\tau \approx \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} y(x_i) \, y(x_{i+m}) \,, \tag{20}$$

де $a = \dfrac{5L}{6}$; 2L – довжина аналізованого профілю; τ – змінна відстань між ординатами y (x) і y (x+τ) того ж профілю; n – число ділянок розбивки довжини аналізованого профілю; m=0, 1, 2... (до таких значень, при яких автокореляційна функція стає практично рівної нулю); $y(x_i)$ і $y(x_i+m)$ відраховуються від середньої лінії профілю:

$$S(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\theta\tau 2\pi} K_y(\tau) \, d\tau \,, \tag{21}$$

де θ – "частота" профілю, що відповідає відношенню кроку складової аналізованої довжини.

У кореляційно перетвореному профілі Ку (τ) роль гармонік з малими ампулітудами послаблюється і виразно виступають складові з істотними амплітудами, кроки яких оцінюються за графіком перетвореного профілю.

Спектральна щільність є результатом накладання піків профілю (який має полігармонійну і випадкову складові) теоретично нескінченної висоти на частотах, що відповідають частотам гармонік у профілі, на відносно гладку спектральну щільність випадкової складової. За місцевим розташуванням піків можна визначити значення частот (чи періодів) складових аналізованого профілю.

Перетворений профіль Ку (τ) є сумою складових вихідного профілю з тими ж періодами, але з амплітудами, помноженими на коефіцієнт ρn:

$$K_y(\tau) = \sum A_n \rho_n \cos \theta_n \tau \,. \tag{22}$$

При великому інтервалі задання профілю маємо

$$\rho_n = \frac{1}{2} \left[A_n + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{p} A_i \frac{\sin(\theta_i - \theta_n) a}{(\theta_i - \theta_n) a} \right]. \tag{23}$$

Якщо частоти гармонійних компонентів у профілі не занадто близькі, тобто

$$|\theta_i - \theta_n| a >> 1 \,, \tag{24}$$

то

$$\rho_n = \frac{1}{2} A_n . \quad (25)$$

Іншими словами, якщо зробити парне розкладання (10) кореляційного перетворення Ку (τ), то амплітуди розкладання в зазначеному випадку будуть являти собою напівквадрати амплітуд гармонійних компонентів, і тим самим визначаються амплітуди A_n. Алгоритми обчислення параметра пекло є ключем до можливого подальшого аналізу зв'язків нерівностей поверхонь деталей з визначеними технологічними факторами (параметри системи СНІД, характеристики інструмента і заготовки, режими обробки і т.д.).

Інший спосіб аналізу спектра нерівностей полягає в застосуванні електронного аналізатора спектрів і частотних характеристик (АСЧХ). При використанні АСЧХ аналізований профіль вводять у нього за допомогою голівки, що общупує, і підсилювача (з фільтром у випадку індуктивної голівки) щупового електромеханічного чи профілографа-профілометра. На екрані осцилоскопа АСЧХ при цьому спостерігаються вертикальні смуги, що відповідають кожна визначеній гармоніці аналізованого профілю. Висота кожної смуги пропорційна амплітуді даної гармоніки, а відстань по горизонталі від її до смуги, що відповідає основній гармоніці, пропорційна її частоті. Сітку екрана осцилоскопа попередньо тарують шляхом подачі від генератора синусоїдальних сигналів з відомими амплітудами і частотами. Утруднення полягають у тому, що АСЧХ повинна мати діапазон частот, що спостерігаються, майже від 0 чи профіль повинний бути попередньо записаний на магнітну стрічку, а потім відтворений зі збільшеної на постійний коефіцієнт частотою, оскільки діапазони звичайних АСЧХ мають нижню границю порядку 20 Гц.

Для швидкої грубої оцінки спектра нерівностей профілю поверхні у виробничих умовах можна використовувати спосіб прямого виміру амплітуд. Він полягає в тому, що за профілограмою чи круглограмою вимірюють кроки B й висоти HB від дна западини до вершини виступу й останні приймають за подвоєні амплітуди нерівностей із кроками B, тобто

$$H_B \approx 2A_B . \quad (26)$$

Аналіз впливу технологічних факторів на нерівності поверхні. Такий аналіз можна здійснювати за допомогою інформації про спектри нерівностей. У цьому випадку параметром оптимізації служить фізично обґрунтований параметр нерівностей поверхні, що характеризує вплив нерівностей даної поверхні на відповідний експлуатаційний показник. Наприклад, якщо експлуатаційним показником є границя витривалості σ_{-1}, то обґрунтованим критерієм оптимізації може служити надлишковий коефіцієнт концентрації напруг. Характер і інтенсивність впливу α_R на σ_{-1} можна визначити, наприклад, по рівнянню:

$$\sigma_{-1} = Q + A\alpha_R + Bh + C\sigma_{ост} .$$

У свою чергу параметр αR зв'язаний зі спектром нерівностей співвідношенням:

$$\alpha_{RC} = k_{\alpha C} \max \frac{A_n}{B_n} .$$

Якщо наявна інформація про спектр нерівностей поверхні, то тим самим визначений не тільки α_{RC}, але також крок і частота $B_{n\alpha}$, амплітуда $A_{n\alpha}$, при яких має місце максимум відносини – далі виявляють ті технологічні фактори, що діють у процесі формоутворення нерівностей з такою частотою, що дорівнює чи близька частоті, що відповідає кроку $B_{n\alpha}$ нерівностей поверхні. Деякі технологічні фактори, наприклад розміри зерен абразиву, застосовуваного при шліфуванні чи поліруванні поверхонь, узяті з урахуванням фракційного складу, безпосередньо визначають кроки складових загального профілю, що виникають внаслідок дії даного технологічного фактора. У багатьох інших випадках завдання полягає у виявленні тих технологічних факторів, що причетні до утворення складових, визначальні значення фізично обґрунтованих у даній ситуації параметрів нерівностей поверхні, наприклад α_R, β_R, γ_R, θ_R і т.д. У цьому випадку може бути використана теорема про частотну діагностику і методика її застосування.

Висновки. Дослідження технологічного походження нерівностей поверхні показало що для аналізу спектра нерівностей в разі застосування електронного аналізатора спектрів і частотних характеристик (АСЧХ) необхідно нижню границю вимірювання встановити на 20 Гц. З аналізу аналітичних і експериментальних досліджень точності формоутворення кілець підшипників на операціях точіння і шліфування випливає, що похибки форми від пружних деформацій деталі під дією сил різання складають 80-85% сумарної похибки.

Список використаної літератури

1. Петренко В.А., Левченко О.М., Шубін Є.С. Управління якістю на підприємстві: Навчальний посібник. – КДТУ, Кіровоград, 2021. – 262 с.
2. Гавриш А. П. Мікрогеометрія поверхні і стан поверхневого шару зносостійких деталей тертя з високолегованих композитів за умови абразивного суперфінішування / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. І. Лотоцька, Ю. Ю. Віцюк // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2015. - № 5. - С. 81-88.
3. Гаврилюк В. Г., Кукляк М. Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. – К: УМКВО, 2020. – 210с.
4. ДСТУ EN ISO 1302:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Познака зовнішньої текстури в технічній документації на продукцію (EN ISO 1302:2002, IDT; ISO 1302:2002, IDT).
5. Технологія машинобудування : навч. посіб. / Є. О. Горбатюк, М. П. Мазур, А. С. Зєнкін, В. Д. Каразей. - Львів : Новий світ-2000, 2020. - 358 с.
6. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник // За редакцією А.І. Грабченко. – Харків, ХДПУ, 2019. – 436 с.
7. Струтинський В.Б., Кравець А.М., Дем'яненко С.К. Спектральний аналіз форми поверхні, одержаної при обробці заготовок зі спеціальним профілем. // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2020. –№14. – С.54-63.
8. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир: ЖІТІ, 2021. – 570 с.
9. Якимов О.В., Усов А.В. та ін. Теплофізика механічної обробки. – Одеса: Астропринт, 2020. – 256 с.

Y. Lapchenko, M. Melnyk
Lutsk National Technical University

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL ORIGIN OF SURFACE IRREGULARITIES

The article investigates the technological origin of surface irregularities by analyzing the influence of technological factors on the formation of surface irregularities. It is advisable, at least in the first approximation, to present their totality as a linear system of influences, which allows, on the basis of the superposition theorem, to consider sequentially the effects of the influence of individual factors, changing some factors others equivalent to them. Since the action of the most important shape-forming factors is periodic or almost periodic, based on the theorem on surface spectra, it is possible to trace the effects of the influence of each of them, considering the spectra of surfaces and their profiles. This approach allows, based on the theorem on frequency diagnostics, to judge the involvement of certain factors in the formation of features of the unevenness profile and its components that are important in terms of operation. If the random component of the profile of surface irregularities is insufficient, it is possible to use a confidence estimate of the profiles using the Student and Fisher distribution based on the corresponding theorem.

The study of the technological origin of surface irregularities showed that for the analysis of the spectrum of irregularities in the case of using an electronic analyzer of spectra and frequency characteristics (ASFC) it is necessary to set the lower limit of measurement to 20 Hz. From the analysis of analytical and experimental studies of the accuracy of forming bearing rings during turning and grinding operations, it follows that form errors due to elastic deformations of the part under the action of cutting forces make up 80-85% of the total error.

Key words: *form deviation, technological process, accuracy, bearing, error.*

© Лапченко Ю.С., Мельник М.В.

УДК 006.91:681.121.833
Малісевич В.В.[1], **Середюк О.Є.**[2]
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-09
[1] Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»
[2] Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ВИЗНАЧЕННІ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА

Наведено доцільність розроблення технічних рішень для здійснення обліку природного газу в одиницях енергії і необхідність проведення метрологічних досліджень сучасних технічних засобів у цій сфері. Здійснено комп'ютерне моделювання методом Монте-Карло алгоритмічного методу експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра. Досліджено взаємозв'язок сумарної стандартної невизначеності коефіцієнта тепловіддачі термоанемометричного перетворювача від максимально допустимої похибки вимірювання параметрів робочого середовища та умов функціонування термоанемометра. Встановлено ступінь впливу на невизначеність коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра при застосуванні рівномірного і трикутного законів розподілу результатів вимірювання геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача. Експериментально виявлений нормальний закон розподілу невизначеності коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра незважаючи на рівномірний або трикутний закон розподілу вимірюваних значень геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача. Встановлено практично однакові закономірності зміни розрахункових значень невизначеності коефіцієнта тепловіддачі при використанні рівномірного і трикутного законів розподілу при вимірюванні електричного струму через чутливий елемент термоанемометричного перетворювача і його електричного опору, а також незначне (до 0,1 %) розходження результатів отриманих невизначеностей коефіцієнта тепловіддачі при вимірюванні температури робочого середовища.

Ключові слова: *природний газ, теплота згорання, коефіцієнт тепловіддачі, невизначеність, метод Монте-Карло, термоанемометр*

Вступ та постановка проблеми. У зв'язку з запровадженням на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії [1] гостро стоїть питання в розробленні нового нормативного та технічного забезпечення обліку природного газу. Згідно з законом [1] визначення обсягу природного газу в одиницях енергії на ринку природного газу повинно здійснюватися або шляхом вимірювання обсягу природного газу в одиницях енергії або шляхом переведення обсягу природного газу в одиницях об'єму в обсяг природного газу в одиницях енергії. Причому перший спосіб має вищий пріоритет. Звідси випливає необхідність застосування засобів обліку природного газу, які повинні забезпечувати не тільки облік природного газу в одиницях енергії за стандартних умов (абсолютний тиск 101325 Па, температура 0° С), але і характеризуватися відповідними метрологічними характеристиками.

Серед нових тенденцій практичного вирішення задач у сфері обліку природного газу можуть бути термоанемометричні методи вимірювання витрати та об'єму газоплинних середовищ. Однак для їх практичного застосування потребує точне визначення коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра, який є функцією багатьох параметрів, в тому числі, фізико-хімічних характеристик робочого середовища і умов його функціонування (тиск і температура робочого середовища, а також швидкість

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

обтікання потоком робочого середовища чутливого елементу з врахуванням його форми і геометричних розмірів).

З врахуванням того, що відомі стандартні довідкові дані стосуються визначення коефіцієнтів тепловіддачі, теплопровідності, теплоємності газових середовищ за незмінних тисків і температур відомих видів газів і є невизначеними в довідникових даних стосовно природного газу, тому актуальним є не тільки теоретичне, але і експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі чутливого елемента термоанемометра за умов вимірювання витрати і об'єму газоплинних середовищ.

Тому метою роботи є розрахунок точності експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі чутливого елемента термоанемометричного перетворювача за робочих умов функціонування термоанемометричного витратоміра.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення завдання визначення енергетичної цінності плинних потоків природного газу пропонується використовувати напірний витратомір [2], який дає змогу при вимірюванні об'єму або витрати природного газу одночасно опосередковано визначати його теплоту згорання. Розрахунок витрати газу здійснюється обчислювальним блоком за інформацією про локальну швидкість газу, його абсолютний тиск і абсолютну температуру. При цьому вимірювання енергетичної цінності природного газу здійснюється на підставі відомого значення теплоти згорання газу за інформацією з блоку для визначення коефіцієнта тепловіддачі термоанемометричного перетворювача, який розраховує її з врахуванням локальної швидкості природного газу. Завдяки такому конструктивному рішенню парціальний витратомір може здійснювати облік енергетичної цінності природного газу, використовуючи як інформативний параметр теплофізичні властивості газу, зокрема його теплопровідність.

Алгоритм розрахунку енергетичної цінності E плинних потоків природного газу описується виразом [2]:

$$E = q \cdot H\,, \tag{1}$$

де q – об'ємна витрата; H – нижча теплота згорання природного газу.

Нижчу теплоту згорання H природного газу розраховують за допомогою експериментально встановленої авторами регресійної залежності [2]:

$$H_C(\alpha) = 145205 \cdot \alpha_C - 141{,}732 \cdot 10^6,\ \text{Дж/м}^3, \tag{2}$$

де α_C – коефіцієнт тепловіддачі термоанемометричного давача за стандартних умов.

Коефіцієнт α_C розрахунково визначається за формулою [2]:

$$\alpha_C = \frac{1472084 \cdot \alpha}{\alpha_a(p,T)\left(\sqrt{612500 \cdot v} + 430\right)}, \tag{3}$$

де v – швидкість робочого середовища; $\alpha_a(p,T)$ – апроксимаційні значення коефіцієнта тепловіддачі за абсолютної температури газу T (в К) і абсолютного тиску p (в Па), що розраховуються за формулою:

$$\alpha_a(p,T) = \begin{pmatrix} 2{,}171 \cdot 10^{-28} p^5 - 5{,}891 \cdot 10^{-22} p^4 - 2{,}573 \cdot 10^{-24} Tp^4 - \\ - 2{,}025 \cdot 10^{-16} p^3 + 1{,}184 \cdot 10^{-17} Tp^3 + 9{,}224 \cdot 10^{-10} p^2 - \\ - 1{,}726 \cdot 10^{-11} Tp^2 + 1{,}979 \cdot 10^{-3} p + 7{,}364 \cdot 10^{-6} Tp + \\ + 1{,}773T + 318{,}7 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

З врахуванням того, що витратомір працює за умов, які відрізняються від стандартних за тиском і температурою, необхідно визначати значення коефіцієнта α за робочих умов. Це описується такою формулою [3]:

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

$$\alpha = \frac{I_Д{}^2 R_Д}{\pi d_Д l_Д \left(\frac{R_Д + \left(4 r l_Д / \pi d_Д{}^2\right) \cdot \left(k T_C - 1\right)}{4 k r l_Д / \pi d_Д{}^2} - T_Г \right)}, \quad (5)$$

де $I_Д$ – електричний струм, що проходить через термоанемометричний перетворювач; $R_Д$ – електричний опір термоанемометричного давача при функціонуванні парціального витратоміра; α – коефіцієнт тепловіддачі термоанемометричного перетворювача за робочих умов газу в трубопроводі; $R_Д$, $l_Д$, $d_Д$, $T_Д$, – електричний опір, довжина, діаметр і температура робочого елемента термоанемометричного перетворювача (платинової дротини) за робочих умов функціонування парціального витратоміра; R_C – електричний опір дротини за стандартних умов, який визначається за її геометричними розмірами та фізичними властивостями (довжина, діаметр, питомий електричний опір); k_T – температурний коефіцієнт зміни електричного опору; r – питомий опір матеріалу чутливого елемента термоанемометричного перетворювача.

Однак згідно з [4] коефіцієнт тепловіддачі термоанемометричного перетворювача також функціонально залежить від теплофізичних характеристик природного газу і гідродинамічних параметрів його потоку:

$$\alpha = \frac{\lambda\left(0{,}42\,\mathrm{Pr}^{0.2} + 0.57\,\mathrm{Pr}^{0.33}\,\mathrm{Re}^{0.5}\right)}{d_Д}, \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності природного газу; Pr, Re – гідродинамічні критерії подібності Прандтля і Рейнольдса відповідно.

Алгоритм (6) при визначенні коефіцієнта α передбачає, що має бути відомий компонентний склад природного газу та коефіцієнт теплопровідності, що є практично неможливо при робочих умовах функціонування термоанемометричного витратоміра. Натомість, за алгоритмом (5) можна розрахувати коефіцієнт α за робочих умов на основі виміряних значень електричного струму, опору термоанемометричного перетворювача та температури газу.

З алгоритму (5) видно, що коефіцієнт тепловіддачі термоанемометричного перетворювача залежить від багатьох параметрів. Серед них як геометричні розміри чутливого елемента термоанемометра, його електричний опір та струм, що проходить через нього, так і температура робочого середовища. Але інформативним параметром для визначення коефіцієнта α є електричний опір чутливого елемента, який відображає вплив умов функціонування термоанемометричного перетворювача та якісних параметрів природного газу на процес теплообміну між робочим середовищем і чутливим елементом.

Незважаючи на те, що в (5) відсутні значення конкретних параметрів середовища і режими омивання чутливого елемента, ця формула може бути використана для опосередкованого визначення коефіцієнта тепловіддачі α для конкретних умов функціонування термоанемометра.

Наприклад, такими можуть бути наявність чи відсутність потоку або певні якісні характеристики газу. Оскільки при функціонуванні термоанемометричного перетворювача є можливим безпосереднє вимірювання електричного опору і струму через чутливий елемент, то стає можливою реалізація опосередкованого методу визначення коефіцієнта тепловіддачі.

Тому згідно викладених вище міркувань доцільними є метрологічні дослідження щодо впливу похибки засобів вимірювання цих параметрів на сумарну стандартну невизначеність при розрахунку коефіцієнта α за робочих умов газового середовища.

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

Зважаючи на викладене згідно алгоритму (6) є неможливим проведення метрологічного аналізу визначення коефіцієнта α, оскільки стає достатньо складною формула (6) після підставлення в неї всіх гідродинамічних сталих Прандтля і Рейнольдса.

В публікації [3] проведений метрологічний аналіз визначення коефіцієнта тепловіддачі термочутливого елемента, який реалізований на застосування теорії невизначеності з врахуванням рівномірного закону розподілу результатів вимірювань геометричних розмірів конструктивних елементів термоанемометричного перетворювача.

Оскільки на даний час є невідомою методика застосування рівномірного закону чи трикутного при оцінюванні вимірювання лінійних розмірів елементів термоанемометричного перетворювача, тому доцільним є проведення аналізу з використанням іншої методології, наприклад, методом Монте-Карло. Такий підхід дозволить здійснити порівняльний аналіз різних методологій розрахунку невизначеності при оцінці метрологічних параметрів коефіцієнта тепловіддачі і в кінцевому результаті обгрунтувати доцільність вибору кожної з них.

Виклад основного матеріалу. Методологія Монте-Карло, представлена в [5], передбачає визначення розподілу імовірності сумарної невизначеності через врахування розподілів імовірності стандартних невизначеностей вхідних величин за допомогою математичної моделі (Рисунок 1).

Звідси можна зробити висновок, що на відміну від методології визначення невизначеності [6], яка враховує тільки такі дані, як математичне очікування та стандартне відхилення вхідних величин при розрахунку сумарної стандартної невизначеності, вибрана авторами методологія Монте-Карло використовує всю інформацію з розподілів вхідних величин і дозволяє отримати більш повну інформацію про розподіл сумарної стандартної невизначеності.

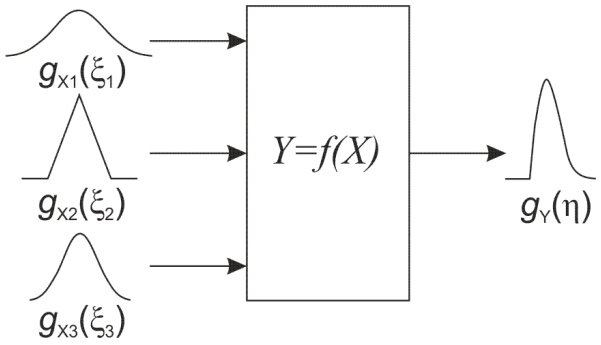


Рис. 1. Графічна ілюстрація методології Монте-Карло для визначення сумарної стандартної невизначеності

Відповідно до методології Монте-Карло спершу слід визначити вхідні величини та їх значення, що мають вплив на інформативний параметр термоанемометричного перетворювача за алгоритмом (5).

На рис. 2 схематично показано величини та джерело їх невизначеностей, що мають вплив на сумарну стандартну невизначеність коефіцієнта тепловіддачі термоанемометричного перетворювача.

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

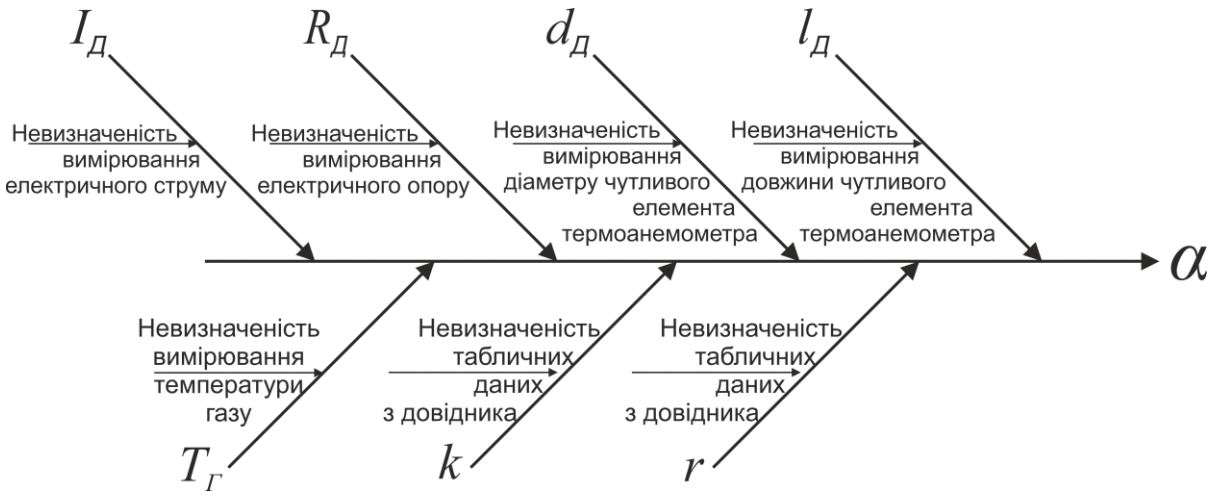


Рис. 2. Причинно-наслідкова діаграма розрахунку невизначеності коефіцієнта тепловіддачі α термоанемометра

З діаграми (рис. 2) видно, що на невизначеність коефіцієнта α впливають невизначеності вхідних параметрів, до яких відносяться невизначеності вимірювання електричного струму та опору термоанемометричного перетворювача, а також його геометричних розмірів. Для розрахунку невизначеності вибрані такі попередньо вибрані оцінки значень вхідних величин для робочих умов функціонування термоанемометричного перетворювача: $I_Д$=0,1 А, $R_Д$=3,78 Ом, $d_Д$=30·10^{-6} м, $l_Д$=0,01 м, $T_Г$=303,15 К.

При вимірюванні електричного струму, опору та температури робочого середовища найчастіше застосовується оцінювання невизначеності за типом А, яке переважно подається нормальним законом розподілу результатів вимірювання. Невизначеності вимірювання електричного струму, опору термоанемометричного перетворювача та температури розраховувалися за формулою:

$$u_B(I_Д) = \frac{\delta(I_Д)\cdot I_Д}{3\cdot 100}, \tag{7}$$

$$u_B(R_Д) = \frac{\delta(R_Д)\cdot R_Д}{3\cdot 100}, \tag{8}$$

$$u_B(T_Г) = \frac{\Delta(T_Г)}{3}, \tag{9}$$

де $\delta(I_Д)$, $\delta(R_Д)$ – гранично допустимі відносні похибки засобів вимірювання електричного струму і опору відповідно; $\Delta(T_Г)$ – гранично допустима абсолютна похибка засобу вимірювання температури робочого середовища.

При оцінюванні невизначеності вимірювання геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача може бути здійснена оцінка їх точності вимірювання за рівномірним або трикутним законом розподілу. Для оцінювання законів розподілу при вимірюванні лінійних розмірів немає однозначності у їх виборі. У зв'язку з цим при моделюванні доцільно здійснити розрахунок оцінювання невизначеності коефіцієнта α за таких двох варіантів вибору закону розподілу при вимірюванні геометричних розмірів. Невизначеність вимірювання довжини та діаметру чутливого елемента термоанемометричного перетворювача за умови рівномірного закону розподілу результатів вимірювання розраховували за формулами:

$$u_B(l_Д) = \frac{\Delta(l_Д)}{\sqrt{3}}, \tag{10}$$

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

$$u_B(d_Д) = \frac{\Delta(d_Д)}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

де $\Delta(l_Д)$, $\Delta(d_Д)$ – гранично допустима абсолютна похибка засобу вимірювання довжини та діаметру чутливого елемента термоанемометричного перетворювача відповідно.

При застосуванні трикутного закону розподілу значень вимірюваної величини формули (10) і (11) можна записати наступним чином:

$$u_B(l_Д) = \frac{\Delta(l_Д)}{\sqrt{6}}, \quad (12)$$

$$u_B(d_Д) = \frac{\Delta(d_Д)}{\sqrt{6}}. \quad (13)$$

Невизначеності коефіцієнтів k та r, що входять до алгоритму (5) з врахуванням рівномірного закону розподілу їх значень розраховуються за формулами:

$$u_B(k) = \frac{k \cdot \delta(k)}{100 \cdot \sqrt{3}}, \quad (14)$$

$$u_B(r) = \frac{r \cdot \delta(r)}{100 \cdot \sqrt{3}}, \quad (15)$$

де $\delta(k)$, $\delta(r)$ – гранично допустимі відносні похибки визначення температурного коефіцієнта зміни електричного опору та питомого опору матеріалу чутливого елемента термоанемометричного перетворювача відповідно.

На основі вибраних вхідних даних та з врахуванням формул (7)-(15) розраховані невизначеності вимірювання вхідних параметрів до алгоритму (5). В таблиці 1 наведено вхідні параметри та їх невизначеності при умові застосування прямокутного та трикутного законів розподілу результатів вимірювань геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача.

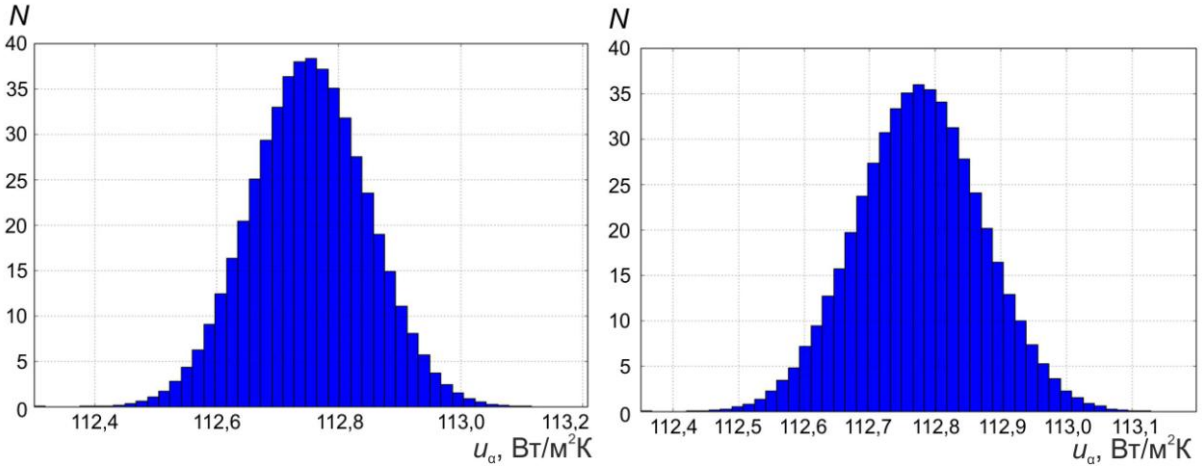
Таблиця 1

Значення невизначеностей вимірювання вхідних параметрів відповідно до вибраних законів розподілу

Вхідний параметр	Тип невизначеності	Закон розподілу	Середнє значення	Похибка визначення	Значення невизначеності
$I_Д$, А	В	Нормальний	0,1 А	0,1 %	$3{,}33 \cdot 10^{-5}$ А
$R_Д$, Ом	В	Нормальний	3,78 Ом	0,1 %	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$ Ом
$d_Д$, м	В	Рівномірний	$3 \cdot 10^{-5}$ м	$1 \cdot 10^{-8}$ м	$5{,}77 \cdot 10^{-9}$ м
$d_Д$, м	В	Трикутний	$3 \cdot 10^{-5}$ м	$1 \cdot 10^{-8}$ м	$4.08 \cdot 10^{-9}$ м
$l_Д$, м	В	Рівномірний	0,01 м	$1 \cdot 10^{-5}$ м	$5{,}77 \cdot 10^{-6}$ м
$l_Д$, м	В	Трикутний	0,01 м	$1 \cdot 10^{-5}$ м	$4.08 \cdot 10^{-6}$ м
$T_Г$, К	В	Нормальний	303,15 К	0,15 К	0,05 К
k, $К^{-1}$	В	Рівномірний	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$ $К^{-1}$	0,1 %	$2{,}25 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$
r, Ом·м	В	Рівномірний	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$ Ом·м	0,1 %	$6{,}35 \cdot 10^{-11}$ Ом·м

Для моделювання сумарної стандартної невизначеності методом Монте-Карло із застосуванням програмної реалізації задано 500000 симуляцій, результатом виконання яких є набір можливих значень коефіцієнта тепловіддачі чутливого елемента термоанемометричного перетворювача, зображених на гістограмі (рис. 3). Позначенням

N вказано кількість отриманих результатів значень α за його числових значень згідно вісі абсцис.



а) б)

Рис. 3. Розподіл значень коефіцієнта тепловіддачі чутливого елемента термоанемометричного перетворювача при застосуванні рівномірного (а) та трикутного (б) законів розподілу при визначенні його геометричних розмірів

На основі набору даних з рис. 3 розраховані мінімальне, максимальне та середнє значення коефіцієнта тепловіддачі термоанемометричного перетворювача, а також стандартне відхилення, числове значення якого характеризує сумарну стандартну невизначеність коефіцієнта α. Так для рівномірного закону розподілу (рис. 3, а) α_{min}= 112,29 Вт/м^{2}К, α_{max}=113,20 Вт/м^{2}К, α=112,75 Вт/м^{2}К, u_α=0,096 Вт/м^{2}К. Для трикутного закону розподілу (рис. 3, б) α_{min}= 112,35 Вт/м^{2}К, α_{max}=113,22 Вт/м^{2}К, α=112,78 Вт/м^{2}К, u_α=0,096 Вт/м^{2}К.

Очевидним є той факт, що при експериментальному визначенні коефіцієнта α вагомий вплив на числове значення невизначеності мають метрологічні характеристики засобів вимірювання таких параметрів як температура робочого середовища, електричний струм та опір чутливого елемента термоанемометричного перетворювача. Результати моделювання невизначеності u_α за різних значень максимально допустимої похибки визначення температури (табл. 2), електричного струму (табл. 3) та опору чутливого елемента термоанемометричного перетворювача (табл. 4).

Таблиця 2

Результати моделювання невизначеності обчислення коефіцієнта α методом Монте-Карло при зміні максимально допустимої похибки визначення температури робочого середовища

	Рівномірний закон розподілу			Трикутний закон розподілу		
$\delta T_Г$, К	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К
0,1	0,2462	111,5131	113,9452	0,2460	111,5503	113,8968
0,2	0,2469	111,4986	113,9976	0,2467	111,5684	113,8940
0,3	0,2481	111,5451	113,9797	0,2478	111,5353	113,9242
0,4	0,2495	111,5849	113,9258	0,2494	111,5568	113,9494
0,5	0,2516	111,4541	113,9451	0,2515	111,5118	113,9717

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

Таблиця 3

Результати моделювання невизначеності обчислення коефіцієнта α методом Монте-Карло при зміні максимально допустимої похибки визначення електричного струму

	Рівномірний закон розподілу			Трикутний закон розподілу		
$\delta I_Д$, %	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К
0,1	0,1245	112,2152	113,3304	0,1244	112,1991	113,3569
0,2	0,1801	111,8790	113,5559	0,1801	111,9366	113,6136
0,3	0,2462	111,5084	113,8954	0,2462	111,6537	113,9674
0,4	0,3161	111,2770	114,2144	0,3168	111,2287	114,2548
0,5	0,3887	110,8741	114,4299	0,3891	110,9732	114,6126

Таблиця 4

Результати моделювання невизначеності обчислення коефіцієнта α методом Монте-Карло при зміні максимально допустимої похибки визначення опору

	Рівномірний закон розподілу			Трикутний закон розподілу		
$\delta R_Д$, %	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К	u_α, Вт/м^{2}К	α_{min}, Вт/м^{2}К	α_{max}, Вт/м^{2}К
0,1	0,2335	111,5993	113,8980	0,2331	111,7265	113,9141
0,2	0,2385	111,5208	113,8994	0,2382	111,6296	113,9516
0,3	0,2467	111,5661	113,8928	0,2464	111,5675	113,9544
0,4	0,2578	111,3909	113,9506	0,2574	111,6419	114,0660
0,5	0,2713	111,3897	114,1232	0,2707	111,5918	114,1528

Числові результати моделювання невизначеності, які наведені в табл. 2-4 подані графічними залежностями на рис. 4. Графіки вказують на наявність практично лінійної залежності між значенням сумарної невизначеності u_α та максимально допустимою похибкою вимірювання електричного струму через чутливий елемент термоанемометричного перетворювача (рис. 4, б) та нелінійної залежності експоненційного типу між значенням сумарної невизначеності u_α та максимально допустимими похибками вимірювання температури робочого середовища (рис. 4, а) і електричного опору чутливого елемента термоанемометричного перетворювача (рис. 4, в).

За результатами моделювання встановлено, що при збільшенні максимально допустимої похибки вимірювання температури робочого середовища від 0,1 до 0,5 К зростання сумарної стандартної невизначеності коефіцієнта α при рівномірному законі розподілу становить $5{,}45\cdot10^{-3}$ Вт/м^{2}К і $5{,}51\cdot10^{-3}$ Вт/м^{2}К при трикутному законі розподілу результатів вимірювання геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача (діаметр, довжина), тобто зростає на 1 %.

При збільшенні похибки вимірювання електричного струму від 0,1 до 0,5 % зростання сумарної стандартної невизначеності коефіцієнта α при рівномірному законі розподілу становить 0,2642 Вт/м^{2}К і 0,2647 Вт/м^{2}К при трикутному законі розподілу, тобто зростає більш як в три рази. В той же час, при зростанні похибки вимірювання електричного опору від 0,1 до 0,5 % спостерігається зростання сумарної стандартної невизначеності коефіцієнта α на 0,0378 Вт/м^{2}К при рівномірному та на 0,0376 Вт/м^{2}К при трикутному законі розподілу, тобто близько до 16 %.

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

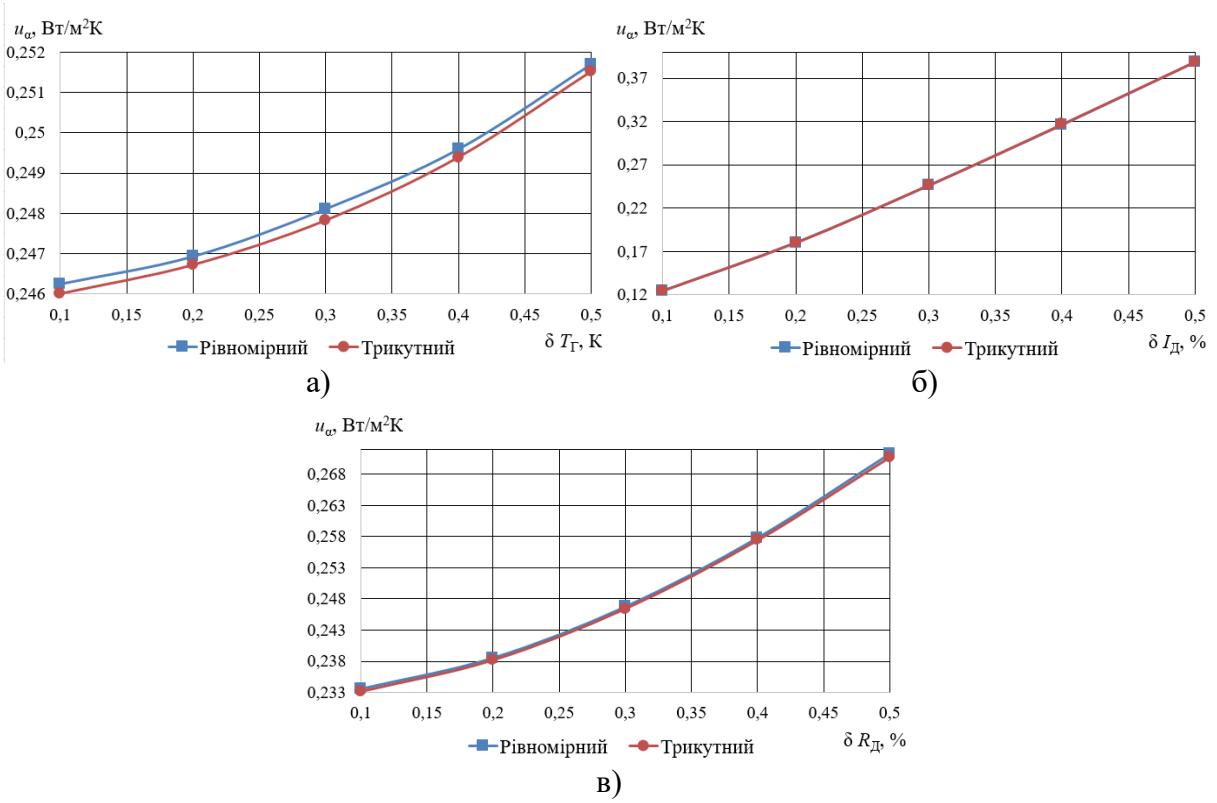


Рис. 4. Графічна ілюстрація залежності невизначеності u_α від максимально допустимої похибки вимірювання температури робочого середовища (а), електричного струму (б) та опору (в) чутливого елемента термоанемометричного перетворювача

Наведені результати досліджень вказують на несуттєву зміну значення отримуваних невизначеностей при застосуванні різних рекомендованих у літературі законів розподілу імовірностей результатів вимірювання геометричних розмірів, що на практиці дозволяє використовувати будь-який із досліджуваних законів розподілу. Також спостерігається суттєва зміна сумарної невизначеності при застосуванні засобів вимірювання струму з різними похибками і суттєво меншим є цей вплив при вимірюванні електричного опору.

Висновки. Проведено моделювання впливу максимально допустимої похибки вимірювання температури робочого середовища, електричного струму та опору чутливого елемента термоанемометричного перетворювача на числове значення сумарної стандартної невизначеності коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра при рівномірному і трикутному законі розподілу результатів вимірювання геометричних розмірів чутливого елемента.

Експериментально встановлений нормальний закон розподілу невизначеності коефіцієнта тепловіддачі термоанемометра незважаючи на рівномірний або трикутний закон розподілу вимірюваних значень геометричних розмірів чутливого елемента термоанемометричного перетворювача.

Встановлено практично однакові закономірності зміни розрахункових значень невизначеності коефіцієнта тепловіддачі при використанні рівномірного і трикутного законів розподілу при вимірюванні електричного струму через чутливий елемент термоанемометричного перетворювача і його опору і незначне (не вище 0,1 %) розходження результатів отриманих невизначеностей коефіцієнта тепловіддачі при вимірюванні температури робочого середовища.

Встановлено практично лінійну залежність зміни невизначеності від вимірювання електричного струму через чутливий елемент термоанемометричного перетворювача і нелінійну експоненційну залежність від вимірювання температури робочого

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

середовища і електричного опору чутливого елемента термоанемометричного перетворювача.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами наведеними в [3], які є більш повними, характеризує про суттєве (практично на порядок) зменшення невизначеності коефіцієнта тепловіддачі, що може бути пояснене застосуванням іншої методики, тобто, Монте-Карло, а також іншими значеннями робочих умов функціонування термоанемометричного перетворювача.

Питання розходження результатів обчислень невизначеностей в даній статті і в статті [3] буде предметом наших подальших наукових досліджень.

Література

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії: Закон України від 02.11.2021 р. № 1850-IX

2. Малісевич В.В., Середюк О.Є., Середюк Д.О. Метрологічна модель напірного витратоміра при контролі енергетичної цінності природного газу. Український метрологічний журнал. 2015. № 1. С. 58-63.

3. Малісевич В.В., Середюк О.Є. Метрологічний аналіз визначення коефіцієнта тепловіддачі термочутливого парціального витратоміра при оцінці теплоти згоряння природного газу. Методи та прилади контролю якості. 2014. № 1 (32). С. 64-71.

4. Середюк О.Є., Малісевич В.В., Малісевич Н.М. Експериментальні дослідження об'ємних співвідношень компонентів природного газу. Technical Using of Measurement – 2016: Всеукраїнська наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології: тези доп., м. Славське,
1-5 лютого 2016 р.: Академія метрології України, 2016. С. 10-13

5. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. JCGM 101:2008. 90 p.

6. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. 134 p.

V.V. Malisevych[1], **O.E. Serediuk**[2]

[1] State enterprise „Ivano-Frankivsk scientific and production center for standartization, metrology and certification"

[2] Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

METROLOGICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF THE MONTE-CARLO METHOD IN THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THE THERMOANEMOMETER

The expediency of developing technical solutions for accounting of natural gas in energy units and the necessity of conducting metrological studies of modern technical means in this area are indicated. A Monte-Carlo computer simulation of the algorithmic method of experimental determination of the thermal anemometer heat transfer coefficient was carried out. The relationship between the summary standard uncertainty of the heat transfer coefficient of the thermo-anemometric converter and the maximum permissible measurement error of the parameters of the working environment and the operating conditions of the thermo-anemometer was investigated. The degree of influence on the uncertainty of the thermal anemometer heat transfer coefficient when applying the uniform and triangular laws of distribution of the measuring results of the geometric dimensions of the sensitive element of

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

the thermoanemometric converter is established. The normal distribution law of the uncertainty of the heat transfer coefficient of the thermoanemometer was experimentally revealed, despite the uniform or triangular distribution law of the measured values of the geometric dimensions of the sensitive element of the thermoanemometric converter. Almost identical patterns of changes in the estimated values of the uncertainty of the heat transfer coefficient were established when using uniform and triangular distribution laws when measuring the electric current through the sensitive element of the thermoanemometric converter and its electrical resistance, as well as a slight (up to 0.1%) difference in the results of the obtained uncertainties of the heat transfer coefficient when measuring the temperature working environment.

Key words: *natural gas, heat of combustion, heat transfer coefficient, uncertainty, Monte Carlo method, thermoanemometer*

© Малісевич В.В., Середюк О.Є.

УДК 681.2.
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-10
Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОДАВАЧІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ТЕРМОМЕТРІВ

В статті проведений аналіз технічних особливостей, які необхідно враховувати під час побудови медичних термометрів. Розглянута класифікація електронних медичних термометрів для вимірювання температури людини. Проведено аналіз термометрів з точки зору їх придатності для моніторингу температурних коливань на поверхні біологічного об'єкту. Розглянута залежність роздільної здатності термометра для різних діапазонів температур. Виявлено, що роздільна здатність термометра (крутизна) пов'язана з його коефіцієнтом передачі. Розширення діапазону вимірюваних температур призводить до зниження коефіцієнта передачі, і навпаки, зниження діапазону призводить до збільшення крутизни в стільки ж разів. Важливо відзначити, що при обмеженій максимальній вихідній напрузі термометра існує сталість відтворення діапазону контрольованих температур ΔT на коефіцієнт перетворення температури в напругу U/°C. Проведений порівняльний аналіз різних типів давачів температури зокрема, перетворювач температура - напруга (TC1047) фірми Micirochip в корпусі SOT23, термодавач (SMT16030) фірми Smartec в корпусі TO18, термістор (203JG1F) фірми NTC в корпусі DO35, (LM19) фірми National Semiconductor в корпусі TO92, і (TSIC306) фірми Hygrosens в корпусі SO8. Розглянуто коефіцієнти інформативності перетворення термодавачів, залежності теплової постійної часу від маси давача в різних видах корпусів. Встановлено, що високу перспективу мають термометри з давачами на основі напівпровідникових діодів, оскільки давачі такого типу забезпечують високу швидкодію, малий час відгуку, роботу в режимі мікрострумів, які максимально зменшують саморозігрів давача, високу чутливість, хорошу лінійність в заданому діапазоні температур (25-40 °C), стабільність електричних параметрів. Поряд з високими експлуатаційними характеристиками давачів на основі напівпровідникового діода мають невисоку вартість.

Ключові слова: *медичний термометр, термочутливий елемент, напівпровідниковий діод, тепловий опір*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

Існують 2 різновиди електронних медичних термометрів, що використовують різні електронні давачі температур що мають термочутливий елемент, 1.- контактні, 2 – безконтактні. В безконтактних термометрах використовуються пірометри в якості термочутливого елемента. Пірометри, зазвичай, використовується для вимірювання високих температур, однак з розвитком електронної бази радіоелементів розроблені ефективні конструкції для низьких температур. Найпоширеніші види електронних термометрів це контактні термометри, існує 3 підкласи контактних електронних давачів (термометри опору, напівпровідникові термометри, термометри на основі термопар). Всі ці 3 класи мають підкласи залежно від різних властивостей, матеріалу давача (термопари), способів підключення давача в схему термометра (напівпровідникові давачі температури), способу зміни електричних величин (напруга, струм, опір) за рахунок зміни фізичних величин (температура) (рис. 1.) [1, 2].

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

Розглянемо існуючі серійні термометри з точки зору їх придатності для моніторингу температурних коливань на поверхні біологічного об'єкту. Проведемо аналіз їх технічних параметрів та характеристик, таких як швидкодія і роздільна здатність тощо. Найважливіші якісні показники різних термодавачів, з урахуванням їх використання в вузькому температурному діапазоні, наведені в табл. 1. Причому символ «+++» позначає високий рівень придатності за цим параметром, «++» і «+» відповідно середній і низький.

© Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.

Таблиця 1

Якісні показники термодавачів

Вид давача	Параметри термометрів у вузькому температурному діапазоні (20-40'С)					
	Швидкодія	Розширення	Точність	Чутливість	Лінійність	Стабільність
Термістор	+ + +	+	+	+ + +	+	+ + +
Пірометр	+ + +	+ + +	+	+ +	+ +	+ +
Термометр опору	+ +	+ +	+	+ +	+ + +	+ + +
Термопара	+ + +	+	+	+ +	+ +	+ + +
Діоді (корпусні)	+ +	+ + +	+ +	+ +	+ + +	+ +
Діоди (безкорпусні)	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ +

З зіставлення наведених параметрів давачів можна зробити висновок, що найбільш придатними для зазначених вище цілей, є напівпровідникові діодні давачі в безкорпусному виконанні, які володіють більш високою швидкодією . Слід зазначити, що пірометри також володіють високою швидкодією, але до числа їхніх недоліків можна віднести низьку чутливість та високу вартість.

<table>
<tr><td rowspan="14">Електронні термометри</td><td rowspan="13">Контактні</td><td rowspan="3">Термометр опору</td><td>Платинові резистори</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Термістори</td><td>ТКО негативний</td><td></td></tr>
<tr><td>ТКО позитивний</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Напівпровідникові</td><td>PN перехід діодів і транзисторів</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Тонкі н/п плівки</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">Інтегральні термометри</td><td>Режим живлення давача Динамічний</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">Режим живлення давача Статичний</td><td>Bandgap</td></tr>
<tr><td>U діода = const</td></tr>
<tr><td>I діода = const</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Термопарні</td><td>Платинородій - платинові, Тип R</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Платинородій платинові, Тип S</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Платинородій - платинородієві, Тип B</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Залізо-константові, Тип J</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Хромель - константові, Тип E</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Безконтактні</td><td>Пірометри</td><td></td><td></td></tr>
</table>

Рис. 1. Види електронних термометрів, які використовують різні давачі температури.

Мета статті (формулювання цілей статті).

Метою статті є аналіз якісних показників та характеристик давачів температури на основі напівпровідникових діодів та транзисторів та формулювання висновків та рекомендацій для практичного використання у під час виготовлення електронних термометрів.

Постановка завдання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз термометрів з точки зору їх придатності для моніторингу температурних коливань на поверхні біологічного об'єкту.

2. Дослідити залежність роздільної здатності термометра для різних діапазонів температур.

3. Визначення залежності швидкодії термометра від маси давача.

4. Дослідження теплового опору давача як важливого фактора, що характеризує вплив на його внутрішній саморозігрів.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

Роздільна здатність термометра (крутизна) пов'язана з його коефіцієнтом передачі V/°C, « оскільки вихідна напруга операційного підсилювача обмежена діапазоном 3-10 В, і є постійною величиною. Розширення діапазону вимірюваних температур призводить до зниження коефіцієнта передачі, і навпаки, зниження діапазону призводить до збільшення крутизни в стільки ж разів » [3, 4].

Важливо відзначити, що при обмеженій максимальній вихідній напрузі термометра існує сталість відтворення діапазону контрольованих температур ΔT на коефіцієнт перетворення температури в напругу U / °C. Зазначена залежність крутизни характеристики для різних діапазонів температур приведена на рис. 2. при $U_{vych.\ max}$ = 10В [5, 6].

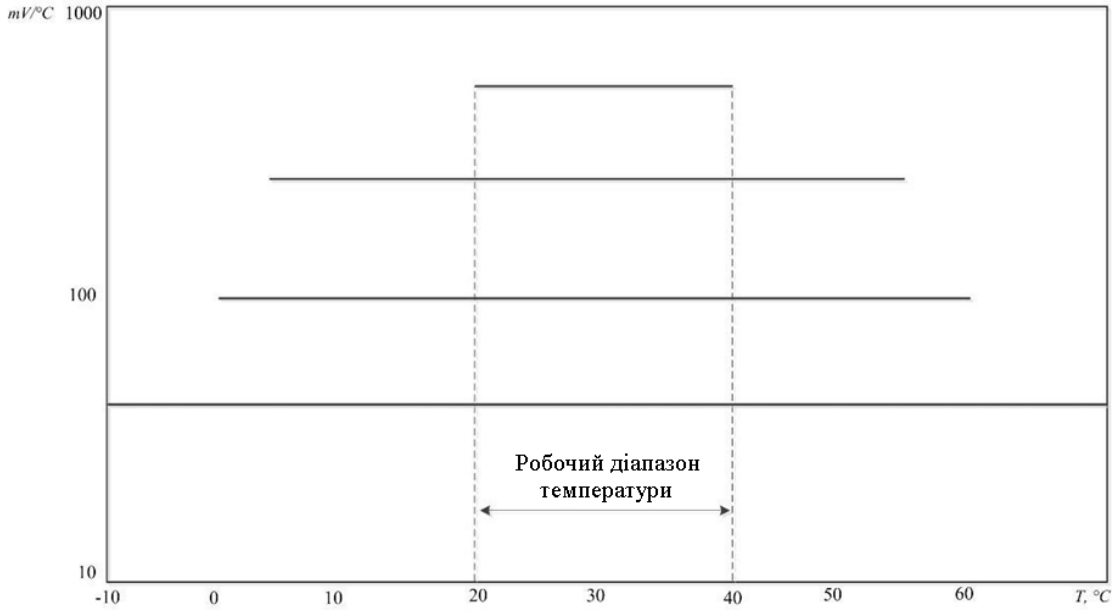


Рисунок 2. Крутизна характеристики для різних діапазонів температур при $U_{vych.\ max}$ = 10V

Вихідні сигнали термодавачів відрізняються по їх функції перетворення, так термопара перетворює температуру в напругу, терморезистивні давачі змінюють свій опір при зміні температури. Існує два види терморезисторів з позитивним і негативним температурними коефіцієнтами опору. Напівпровідникові діодні давачі характеризуються зниженням прямої напруги при підвищенні температури [3, 4]. Пропонується оцінка коефіцієнта інформативності перетворення температури контактних термодавачів в табл.2.

© Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.

Таблиця 2

Коефіцієнт інформативності перетворення термодавачів

Тип давача	Температурний коефіцієнт перетворення	Інформативність вихідного параметра в темп. діапазоні 20-40°С, %
Термопара (К)	41 μV/°C	0,0082
Термопара (J)	55,2 μV/°C	0,011
Термопара (Е)	68 μV/°C	0,0136
Терморезистор (pt100)	0.38 Ω/°C	0,076
Напівпровідковий діод	2,5мВ/°C	0,50

З проведеної оцінки випливає, що інформативність перетворення фізичної величини (температури) в електричний параметр у напівпровідникових діодів більше, що призводить до підвищення роздільної здатності давача.

Швидкодія термометра визначається ще й масою давача, оскільки вона задається значенням теплової постійної часу. Області, що ілюструють цей зв'язок (рис.3) для деяких типів давачів в корпусах різних виконань (рис. 3), наприклад перетворювач температура - напруга (TC1047) фірми Micirochip в корпусі SOT23, термодавач (SMT16030) фірми Smartec в корпусі TO18, термістор (203JG1F) фірми NTC в корпусі DO35, (LM19) фірми National Semiconductor в корпусі TO92, і (TSIC306) фірми Hygrosens в корпусі SO8 [7]. Теплові постійні часу $t_{tepl.}$ при нерухомому повітрі для корпусів напівпровідникових давачів в залежності від їх маси наведені на рис. 4.

а) б) в) г) д)

Рис. 3. Різновиди термодавачів: а) TC1047; б) SMT16030; в) 203JG1F; г) LM19; д) TSIC306.

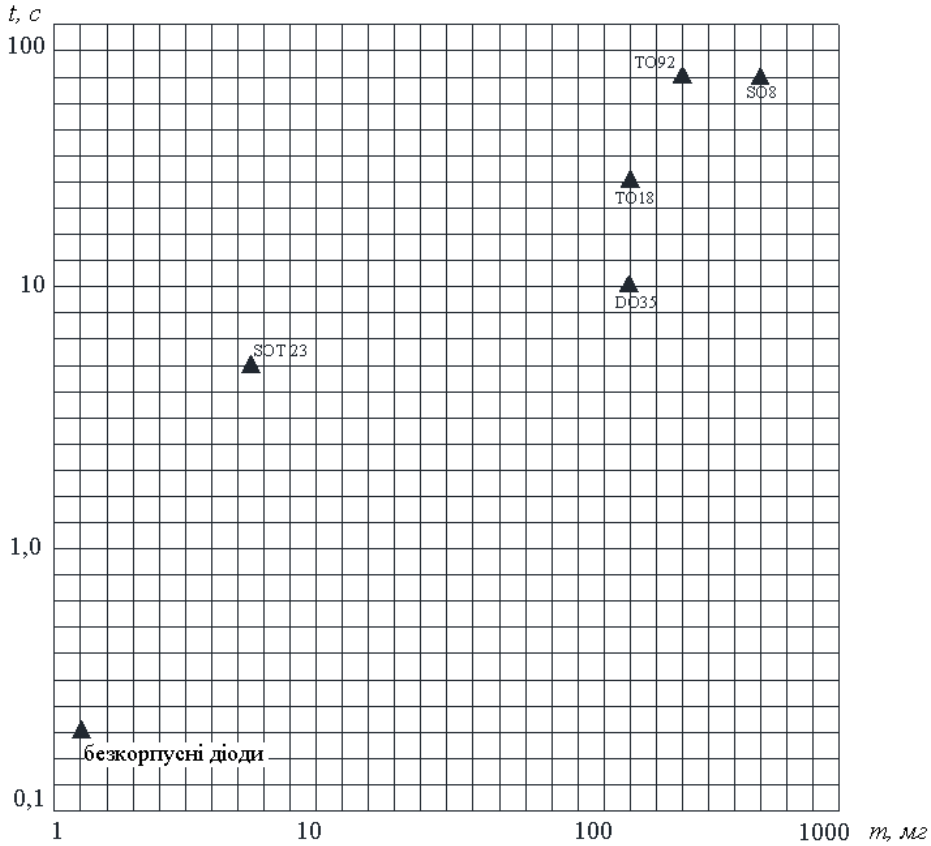


Рис. 4. Залежність теплової постійної часу від маси давача в різних видах корпусів

© Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.

Для швидкодіючої біотермометрії необхідно використовувати давачі з мінімальною масою, зокрема безкорпусні напівпровідникові діоди і транзистори.

Другий важливий фактор давача, що характеризує вплив на його внутрішній саморозігрів, є тепловий опір.

Тепловий опір R_{th} корпусів напівпровідникових давачів знаходиться діленням різниці між температурами переходу T_j і температури навколишнього середовища T_a,

$$R_{th} = (T_j - T_a)/P \quad (1)$$

де R_{th} - тепловий опір на ділянці теплової ланцюга, °C / W; T_j - температура переходу, °C; T_a - температура навколишнього середовища, °C; P – потужність, яка розсіюється на переході, W

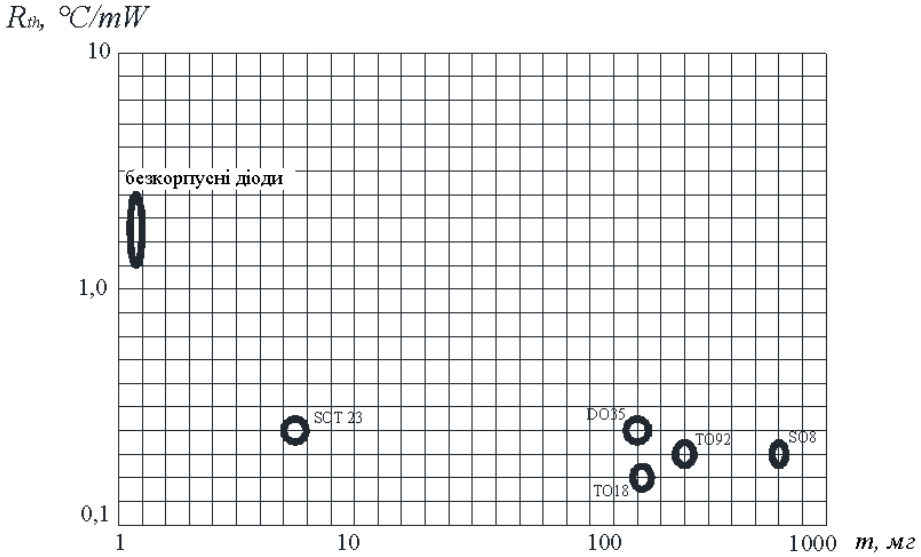


Рисунок 5. Залежність теплового опору давачів температури від їх маси в різних корпусних виконання

На рис. 5 наведені дані про зв'язок маси і теплового опору декількох поширених типів корпусів інтегральних схем.

Висновки. З розгляду рис. 4 випливає, що для моніторингу температурних осциляцій поверхні тіла найбільш ефективними є безкорпусні (б/к) напівпровідникові діодні і транзисторні (в діодному включенні) давачі температури.

Отже, давачі на основі напівпровідникового діода забезпечують високу швидкодію, малий час відгуку, роботу в режимі мікрострумів, які б максимально зменшили саморозігрів давачів, високу чутливість, хорошу лінійність в заданому діапазоні температур (25-40 °C), стабільність електричних параметрів.

Список використаної літератури

1. Солодовник В.Ф. Медицинские лабораторные устройства и приборы: учеб. пособие. / В.Ф. Солодовник, М.И. Чебан - Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2001. – 85 с.

2. Напівпровідникові прилади: транзистори. Довідник. [Під ред. Н. Н. Горюнова] - М.: Вища школа, 1985. - 904 с.

3. Осадчук В.С. Напівпровідникові діоди. Навчальний посібник / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук – Вінниця: ВДТУ, 2002. — 162 с.

4. Электронный каталог Microchip USA, [Электронный ресурс]:www.microchip.com/TC1047 (дата звернення: 04.012.2022).

5. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників: Підручник: У 2 т. – К.:Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – Т. 1. – 338 с.

6. Кулик А.Я., Нікольський О.І., Ревенок В.І. Кулик Я.А. Схемотехніка медичної

© Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.

електронної апаратури / Монографія. – Вінниця: ВНМУ, 2020. – 167 с.

7. 2. Christopher C. Young, MD, RobertN. Sladen// Monitoring temperaturyi // Jurnal «Meditsina neotlojnyih sostoyaniy» – 4(17). – 2008г. – С.15-18.

Moroz S.A., Zablotskyi V.Yu., Prystupa S.O., Yevsyuk M.M., Lyshuk V.V.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THERMOMETERS FOR THE DESIGN OF ELECTRONIC THERMOMETERS

The article analyzes the technical features that must be taken into account during the construction of medical thermometers. The classification of electronic medical thermometers for measuring human temperature is considered. An analysis of thermometers was carried out from the point of view of their suitability for monitoring temperature fluctuations on the surface of a biological object. The dependence of the resolution of the thermometer for different temperature ranges is considered. It was found that the resolution of the thermometer (steepness) is related to its transmission coefficient. Expanding the range of measured temperatures leads to a decrease in the transmission coefficient, and vice versa, a decrease in the range leads to an increase in the steepness by the same number of times. It is important to note that with a limited maximum output voltage of the thermometer, there is a constancy of reproducing the range of controlled temperatures ΔT by the temperature-to-voltage conversion factor U/°C. A comparative analysis of various types of temperature sensors was carried out, in particular, a temperature-voltage converter (TC1047) from Micirochip in a SOT23 case, a thermosensor (SMT16030) from Smartec in a TO18 case, a thermistor (203JG1F) from NTC in a DO35 case, (LM19) from National Semiconductor in a case TO92, and (TSIC306) by Hygrosens in the SO8 case. The informativeness coefficients of the conversion of thermal sensors, the dependence of the thermal time constant on the mass of the sensor in different types of housings are considered. It has been established that thermometers with sensors based on semiconductor diodes have a high perspective, since sensors of this type provide high speed, short response time, operation in the mode of microcurrents, which maximally reduce self-heating of the sensor, high sensitivity, good linearity in a given temperature range (25-40 °C), stability of electrical parameters. Along with high operational characteristics, sensors based on a semiconductor diode have a low cost.

Key words: *medical thermometer, thermosensitive element, semiconductor diode, thermal resistance*

© Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Євсюк М.М., Лишук В.В.

УДК 621.822.681.2:369.64
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-11
Найдьонов А.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Барбаш В.А.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

СЕНСОРИ ВИГИНУ НА ОСНОВІ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ З МОДИФІКОВАНОЮ ГІДРОФОБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

В роботі пропонується вирішення проблеми значної гідрофільності сенсорів вигину на основі наноцелюлози (НЦ) за рахунок обробки поверхні приладів гідрофобними матеріалами. В якості гідрофобних агентів використано розчин фторкарбонової смоли (ФКС) та розчин силікону. В роботі використано три різних методики оцінювання гідрофобних властивостей матеріалів: метод візуального огляду, гравіметричний метод та ємнісний метод. Показано, що нанесення гідрофобних покриттів знижує зміну маси наноцелюлози при дії вологи на 9-18%, в той час як для немодифікованої НЦ цей показник становить 106%. При цьому швидкість адсорбції вологи на поверхні наноцелюлози зменшується з 53 нФ/хв (для чистої НЦ) до 2.5-8.1 нФ/хв (для ФКС та силікону). Нанесення гідрофобних покриттів не впливає на їх часову стабільність, але покращує величину тензочутливості для гідрофобного покриття ФКС та значно покращує реверсивність для обох покриттів (ФКС та силікону) сенсорів вигину.

***Ключові слова**: наноцелюлоза, сенсор вигину, гідрофобність, фторкарбонова смола, силікон*

Постановка проблеми. Сенсори вигину – це електричні перетворювачі, які використовуються для моніторингу деформацій, або є складовою частиною датчиків таких фізичних величин, як: вага, тиск, переміщення, прискорення, тощо. З кожним роком сфера застосування датчиків вигину зростає і варіюється від аерокосмічної галузі до медицини, від будівництва до мікроелектроніки. З їх допомогою контролюють механічні навантаження на металоконструкції та транспортні засоби, кути повороту вузлів механізмів, здійснюють вимірювання механічних напружень у друкованих платах і маси вантажів на вагах, а також моніторинг м'язової активності людини і тестування рухів у робототехніці тощо. Такі прилади працюють за принципом тензодатчика, який вимірює величину зміни опору залежно від механічної сили або деформації.

Найпростішим видом датчика вигину є металева фольга, яка розміщена на діелектричній гнучкій підкладці і з'єднана з досліджуваною поверхнею спеціальним клеєм, наприклад ціанокрилатом. В результаті деформації фольги разом з поверхнею змінюється її електричний опір, який характеризує величину деформації.

В якості матеріалів діелектричних підкладок для таких сенсорів використовують такі синтетичні полімери, як: поліімід, полівінілхлорид, полістирол, поліуретан [1 - 4], більшість з яких не відповідають вимогам екологічності в процесі їх виготовлення чи утилізації. Екологічно чистою альтернативою синтетичним полімерам у датчиках механічних полів вважається наноцелюлоза.

Наноцелюлоза (НЦ) – це матеріал, що складається з нанорозмірних частинок целюлози, один із розмірів яких не перевищує 100 нм. Наноцелюлоза має такі унікальні властивості, як: високі значення модуля пружності, питомої поверхні, оптичної прозорості, еластичності та низьке теплове розширення [5]. Типова ширина частинок НЦ становить 5–20 нм із широким діапазоном довжин, зазвичай кілька мікрометрів. Нанацелюлозу екстрагують із будь-якого рослинного джерела, що містить целюлозу, включаючи деревину та недеревну рослинну сировину (очерет, солома пшениці, міскантус, кенаф, конопля тощо [5, 6]). Наноцелюлоза може використовуватися або як підкладка, або як чутливий елемент в різних електронних сенсорах [7, 8] і здатна самочинно розкладатися під дією біологічних організмів в навколишньому середовищі [9 - 11], що забезпечуватиме приладам на її основі відсутність потреби в утилізації [12].

Виділяють гнучкі і надзвичайно гнучкі (еластичні) датчики механічних полів, які здатні вимірювати деформації величиною до 100%. Гнучкі датчики використовуються для непрямого вимірювання сили, тиску, переміщення, вібрації та прискорення, а також для відстеження справності окремих компонентів у кузовах автомобілів, літаків, ракет та інших конструкцій

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

[13]. Високоеластичні датчики можна використовувати на м'яких асиметричних поверхнях, таких як людська шкіра або текстиль [14]. Вони є незамінними в таких сферах, як: гнучка робототехніка, штучна шкіра та розумні татуювання. Обидва різновиди датчиків механічного поля можуть використовувати наноцелюлозу як підкладки для їх створення.

Однак сенсори вигину на основі наноцелюлози мають певні експлуатаційні обмеження, одним з яких є висока гідрофільність наноцелюлози, що обумовлена наявністю великої кількості гідроксильних груп на її поверхні [15]. Це може вносити похибку у вимірювання в процесі використання наноцелюлози як підкладки для сенсорів вигину, особливо під час використання їх у вологих середовищах або на тілі людини. Тому в роботі для вирішення цього питання у виробництві сенсорів вигину пропонується модифікувати поверхню наноцелюлози гідрофобним покриттям.

Мета, основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є синтез та дослідження характеристик сенсорів вигину на основі наноцелюлози з немодифікованою та модифікованою гідрофобним покриттям поверхнею. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: синтезувати сенсори вологості на основі НЦ з немодифікованою та модифікованою гідрофобним покриттям поверхнею, встановити вплив різних видів модифікаторів на вологопоглинальні та тензочутливі характеристики приладів.

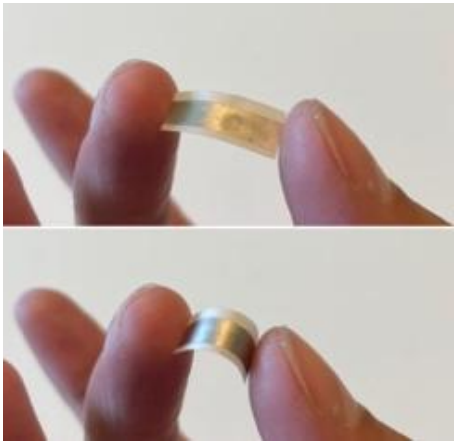
Виготовлення сенсорів вигину на основі наноцелюлози. У якості підкладки сенсора вигину використовувалась нанофібрильована целюлоза, екстрагована методом гідролізу невисушеної органосольвентної целюлози зі стебел міскантусу (Miscanthus x giganteus). Органосольвентну целюлозу отримали екологічно чистим способом з використанням суміші льодяної оцтової кислоти та пероксиду водню на першій стадії та лужної обробки на другій стадії за температури 98±2°С. В результаті проведення процесу гідролізу целюлози розчином сульфатної кислоти концентрацією 43% та ультразвукової обробки отримано прозору стабільну в часі наноцелюлозну суспензію [5].

Отриману наноцелюлозну суспензію розливали в чашки Петрі і сушили на повітрі за кімнатної температури для отримання наноцелюлозних плівок, які використовували для виготовлення датчиків вигину.

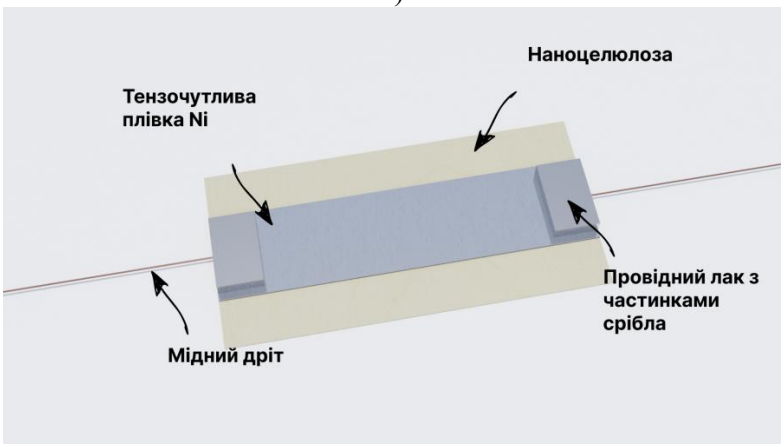
Тензочутливий елемент являє собою плівку нікелю, осаджену на поверхні наноцелюлози за допомогою технологічної маски, що визначає конфігурацію тензорезистора (прямокутні смуги). Тонкі плівки Ni наносилися методом реактивного високочастотного магнетронного розпилення в атмосфері аргону. У процесі напилення використовувалися наступні технічні умови [16]: напруга 600 В, сила струму 1 А, тиск у камері $5*10^{-3}$ мм рт.ст., температура осадження 50°С. Тривалість осадження становила від 10 хв до 15 хв, що задавало товщину тензометричного датчика 0,25...0,375 нм відповідно. Для покращення адгезії між неорганічним (Ni) і органічним матеріалом (НЦ) наносили тонкий буферний шар Ti або Cr товщиною 30 нм. Як показано на рис. 1, а, отримані чутливі до розтягу елементи мають достатній ступінь гнучкості. В якості клем використовувалися тонкі мідні дроти товщиною 0,15 мм. Виводи кріпились до нікелевої плівки за допомогою сріблястого електропровідного лаку. Для початку з нікелю і міді знімалися окисли за допомогою очисника контактів. Лак сушився конвекційним способом за температури 78°С впродовж 2 год.

Гідрофобне покриття – це тонкий поверхневий шар, який відштовхує воду. В результаті рідина чи волога, що потрапляє на таке покриття, не змочує його, а збирається в окремі краплини [17, 18]. Супергідрофобні покриття виготовляються з композитних матеріалів, де один компонент забезпечує шорсткість, а інший забезпечує низьку поверхневу енергію. Для надання НЦ гідрофобних властивостей використовували фторкарбонову смолу та силікон виробництва ТОВ "НЬЮТОН-ПРОМСЕРВІС", які придбали в ВАТ «Хімлаборреактив». Фторкарбонова смола (ФКС) – це хімічна речовина, яка використовується для виготовлення дисперсної фарби на водній основі або на основі розчинника, і має гарні показники з термо-, волого- і хімічної стійкості порівняно з іншими смолами. Силікон – кремнійорганічна сполука з високою молекулярною масою, що забезпечує гідрофобність, біо- і хімічну інертність та еластичність покриттю на його основі. Обидва види гідрофобного покриття наносились на поверхню наноцелюлози та сенсору вигину на її основі за допомогою розпилення з обох боків дослідних зразків з витратою 0.5 г/см^2.

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



а)



б)

Рис.1. Ілюстрація гнучкості сенсора (а) та його структури (б)

Тести на гідрофобність. В роботі використано три різних методи оцінювання гідрофобних властивостей матеріалів: метод візуального огляду, гравіметричний метод та ємнісний метод, результати тестування яких наведено у табл. 1. Для проведення тестування цих методів використані однакові зразки плівок наноцелюлози розміром 25х25 мм. Метод візуального огляду полягає у зануренні дослідних зразків у водне середовище та огляд їх після взаємодії з водою. Можна відмітити, що після короткочасного занурення у воду на поверхні плівок з нанесеним гідрофобним покриттям суцільного шару води не залишається, натомість вона скочується зі зразка маленькими краплями.

Таблиця 1

Результати дослідження гідрофобності зразків наноцелюлози без покриття, покритих фторкарбоновою смолою та силіконом

	Метод візуального огляду	Гравіметричний метод	Ємнісний метод
Матеріал зразку	Результати огляду	Відносна зміна маси, %	Швидкість адсорбції, нФ/хв
НЦ	Покриття поверхні суцільною водяною плівкою	+106	53
НЦ/Фторкарбонова смола	Збирання крапель води на поверхні	+9	8,1
НЦ/Силікон	Збирання крапель води на поверхні	+18	2,5

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

Гравіметричний метод кількісно оцінює величину поглинання води матеріалом за встановлений проміжок часу. В роботі проведено вимірювання маси сухого матеріалу та після його зволоження впродовж 10 хв, на основі чого розраховано відносну зміну маси дослідних зразків. Для вимірювання маси використовувались ваги EDIS 50 (50 / 0.001 г). Після проведених вимірів можна зробити висновок про те, що оброблені гідрофобами зразки увібрали у 6-11 разів менше вологи, аніж необроблена НЦ плівка. Також слід відмітити, що нанесення фторкарбонової смоли забезпечило збільшення маси наноцелюлози при дії вологи лише на 9%, в той час як обробка силіконом – в два рази більше (табл.1).

В ємнісному методі реєструється зміна ємності під дією вологи розгорнутого конденсатора з геометрично однаковими досліджуваними зразками з однієї партії (1-НЦ та 2-НЦ) наноцелюлози у якості діелектричного наповнювача. Відомо, що відносна діелектрична проникність сухих матеріалів зазвичай становить 2-10, а води – 80. Тому зволоження матеріалів призводить до зростання відносної діелектричної проникності матеріалу (діелектричного наповнювача конденсатора), що викликає зростання ємності. Для вимірювання ємності в роботі використовувався цифровий вимірювач ємності Е8-4. На зразок наносили 1 краплю води, а вимірювання тривало 10 хв з інтервалом 30 с. На рис. 2 наведено графіки залежності ємності зразків сенсорів вигину від часу взаємодії їх з водою. З графіку видно, що через поступову адсорбцію води ємність зразків зростає за майже лінійним законом. За нахилом кривої можна оцінити швидкість адсорбції. Доведено, що зразки, вкриті гідрофобним покриттям, поглинають воду майже в 10 разів менше, аніж необроблена наноцелюлоза: швидкість десорбції для чистої НЦ становить 53 нФ/хв, а для обробленої гідрофобом 2,5-8,1 нФ/хв. При цьому для силікону цей показник є більш, ніж у три рази кращим, аніж для фторкарбонової смоли.

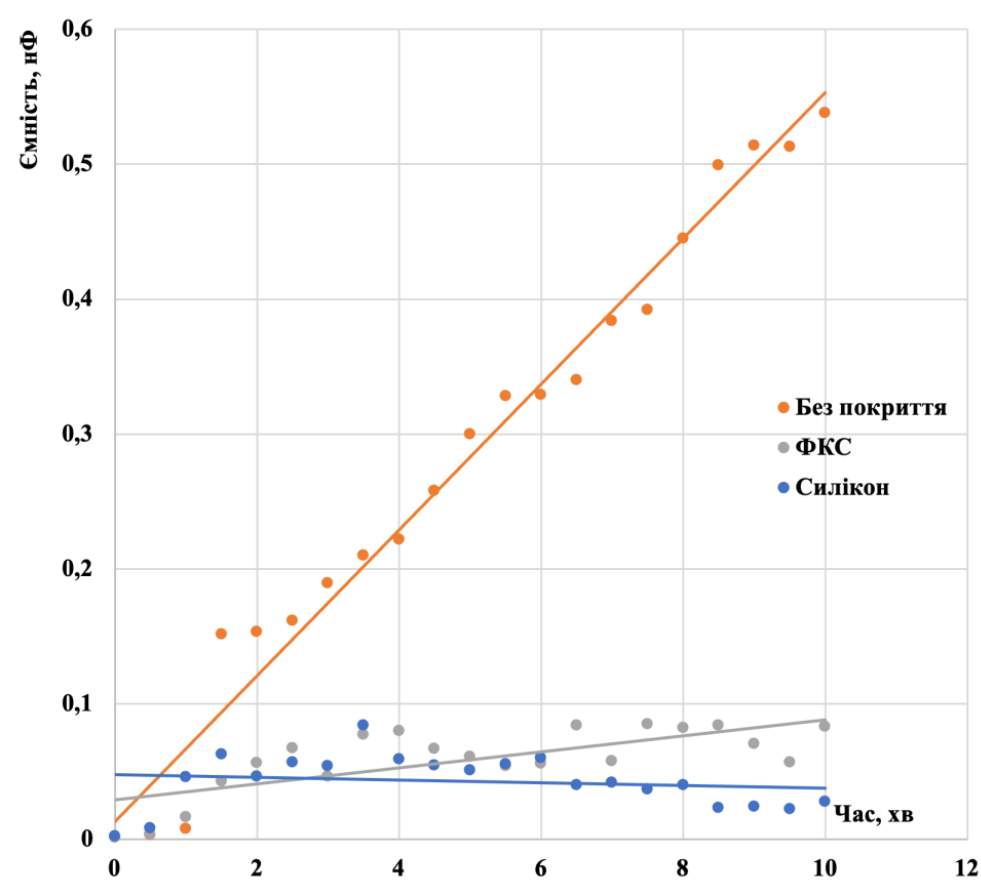


Рис.2. Залежність ємності зразків від часу взаємодії з водою

Вплив гідрофобних покриттів на тензорезистивні характеристики сенсорів вигину. Для зняття тензорезистивних характеристик використовувався спеціально розроблений стенд (рис. 3). Його механічна частина складається з пружної деформаційної пластини з високолегованої сталі, яка вигинається за допомогою мікрометричного гвинта.

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

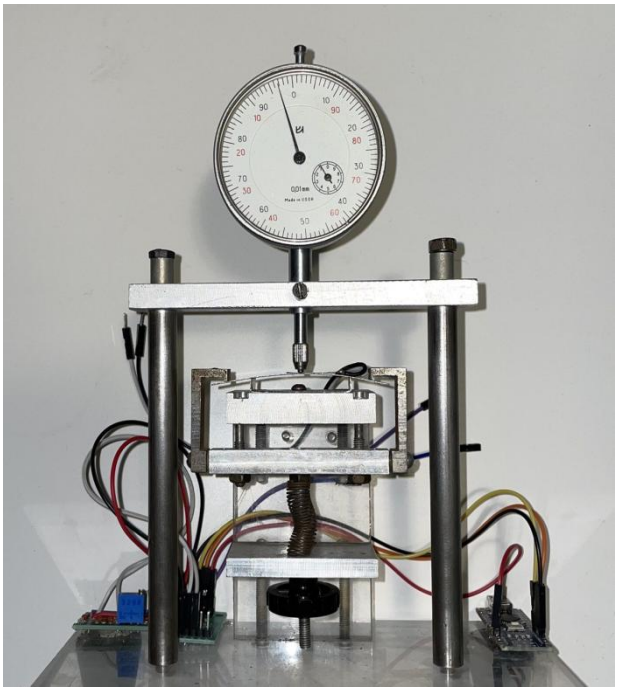


Рис.3. Стенд для зняття тензорезистивних характеристик сенсорів вигину

Вигин вимірювали мікрометричною індикаторною головкою з роздільною здатністю 0,01 мм. Дослідні зразки приклеювали до сталевої пластини за допомогою циакринового клею. Зміна опору лінійно пов'язана з видовженням вимірюваного зразка під час вигину. Лінійне видовження поверхні зразка під час згинання прямо пропорційне зміні радіуса кола, до якого може торкатися зразок. Через температурні обмеження наноцелюлози омічні майданчики до шару нікелю виготовляли за допомогою електропровідного клею на основі наночастинок срібла. Електрична частина стенду включала міст Уітстона та мікросхему АЦП ХН711. Вимірювання тензорезистивних характеристик сенсорів вигину проведено до та після нанесення гідрофобних покриттів (рис. 4, 5) для оцінки впливу останніх на лінійність характеристик та коефіцієнт тензочутливості, реверсивності та повзучості (табл. 2).

Таблиця 2

Робочі параметри тензорезисторів на основі наноцелюлози до та після нанесення гідрофобного покриття

Номер зразку	Коефіцієнт тензочутливості, $\times 10^{-3}$%	Реверсивність, %	Коефіцієнт повзучості, %/хв
Промисловий зразок “Веда”	33.7	0.008	0.07
1-НЦ	69.5	0.0354	0.076
2-НЦ	80.8	0.218	0.0768
1-НЦ з ФКС	388.7	0.0024	0.0769
2-НЦ з силіконом	6.6	0.0004	0.077

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

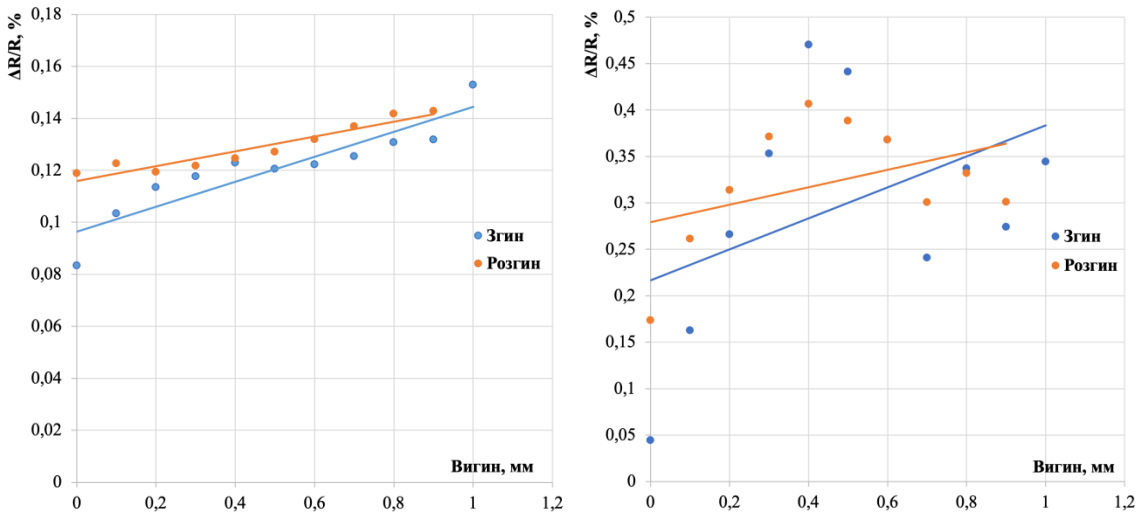


Рис.4. Тензорезистивні характеристики сенсора вигину до (а) та після (б) нанесення фторкарбонової смоли

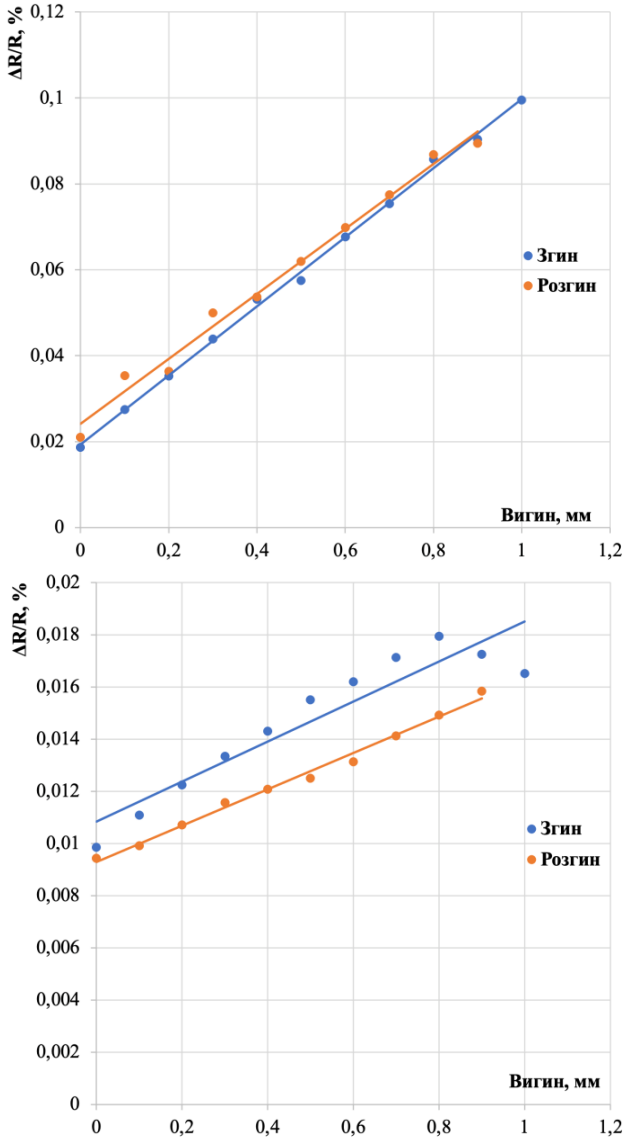


Рис. 5. Тензорезистивні характеристики сенсора вигину до (а) та після (б) нанесення силікону

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

Як видно з наведених на рис. 4 тензочутливих характеристик, після нанесення гідрофобного покриття ФКС має місце відхилення від лінійності таких характеристик. Величина електричного сигналу при цьому зазнала значних змін: коефіцієнт тензочутливості сенсорів з ФКС покриттям зріс у 5 разів порівняно з таким самим сенсором без покриття і на порядок – порівняно з промисловим тензорезистором (табл. 2). Також фторкарбонова смола значно покращила реверсивність сенсорів на основі чистої наноцелюлози, що було значним недоліком таких приладів порівняно з наявними у продажу. При цьому дане гідрофобне покриття практично не здійснює вплив на часову стабільність роботи сенсорів вигину.

Гідрофобне покриття з силікону має деякі відмінності у впливі на робочі характеристики тензорезисторів. Зокрема як видно з наведених тензочутливих характеристик на рис.5, після нанесення силікону лінійність характеристик практично зберігається на тому ж рівні, що й для сенсорів на основі чистої наноцелюлози. Однак на відміну від покриття ФКС, силікон призводить до погіршення на порядок тензочутливості приладу. При цьому для даного покриття спостерігається мінімальне відхилення сигналу сенсора при згині-розгині (максимальна реверсивність), що на порядок краще, аніж для промислового зразку тензорезистора. Як і для покриття ФКС, дане гідрофобне покриття практично не здійснює вплив на часову стабільність роботи сенсорів.

Висновки. В роботі синтезовано та досліджено характеристики сенсорів вигину на основі наноцелюлози з немодифікованою та модифікованою гідрофобним покриттям поверхнею. Показано, що нанесення гідрофобних покриттів приблизно на порядок знижує гідрофільність наноцелюлози. При цьому покриття НЦ фторкарбоновою смолою продемонструвало мінімальне всотування вологи модифікованої НЦ по масі (зміна маси становить лише 9% порівняно з чистою НЦ – 106%), а силіконове покриття – по зміні відносної діелектричної проникності (швидкість адсорбції зменшилась з 53 до 2,5 нФ/хв для чистої та модифікованої НЦ відповідно). При порівнянні впливу обох гідрофобів на робочі характеристики тензорезисторів встановлено, що силіконове покриття зменшує величину тензоефекту, але при цьому покращує лінійність та реверсивність характеристик, а фторкарбонове покриття – погіршує лінійність, але при цьому покращує чутливість та реверсивність приладів. Отже, вибір модифікатора поверхні НЦ залежатиме від вимог, які ставляться до сенсора вигину: якщо потрібно отримати сенсор з великим відгуком, то доцільно використовувати як гідрофобна речовина ФКС, а якщо з лінійною характеристикою – силікон. Напрямком подальших досліджень є розробка композитного матеріалу на основі наноцелюлози та гідрофобних речовин, наприклад, полівінілового спирту, що дасть змогу синтезувати одразу гнучку і вологонепроникну підкладку для сенсорів вигину.

Інформаційні джерела

[1] Z. G. Xiao and C. Menon, “A review of force myography research and development,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 20, 2019, doi: 10.3390/s19204557.

[2] X. Wang *et al.*, “A non-destructive detection method for evaluating beef taste quality based on electrochemical PVC membrane sensor,” *LWT*, vol. 154, p. 112666, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.LWT.2021.112666.

[3] T. Gong *et al.*, “Highly responsive flexible strain sensor using polystyrene nanoparticle doped reduced graphene oxide for human health monitoring,” *Carbon N. Y.*, vol. 140, pp. 286–295, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CARBON.2018.09.007.

[4] H. Tu, M. Zhou, Y. Gu, and Y. Gu, “Conductive, self-healing, and repeatable graphene/carbon nanotube/polyurethane flexible sensor based on Diels-Alder chemothermal drive,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 225, p. 109476, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2022.109476.

[5] V. Barbash and O. Yaschenko. Preparation, Properties and Use of Nanocellulose from Non-Wood Plant Materials/ Chapter in the book "Novel Nanomaterials" edited by Dr. Karthikeyan Krishnamoorthy, IntechOpen, October 27th 2020, pp. 1-23, DOI:10.5772/intechopen.942721.

[6] Z. Candan *et al.*, “Nanocellulose: Sustainable biomaterial for developing novel adhesives and composites,” *Ind. Appl. Nanocellulose its Nanocomposites*, pp. 49–137, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-89909-3.00015-8.

[7] Лапшуда В.А., Коваль В.М. “Гнучка та біорозкладна сенсорика: матеріали, технологія виготовлення та прилади на її основі” KPI Sci. News., №.2, pp 16-27, 2021, DOI: 10.20535/kpisn.2021.2.229964

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

[8] Y. Cheng, J. Zang, X. Zhao, H. Wang, and Y. Hu, "Nanocellulose-enhanced organohydrogel with high-strength, conductivity, and anti-freezing properties for wearable strain sensors," *Carbohydr. Polym.*, vol. 277, p. 118872, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2021.118872.

[9] Viktoriia Koval, Valerii Barbash, Mykhailo Dusheyko, Vladyslav Lapshuda, Olga Yashchenko, Arsenii Naidonov. Nickel-based Piezoresistive Sensors Obtained on Flexible Nanocellulose Substrate // IEEE International Conference on "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2021). Conference Proceedings, 5-11 September, 2021. – Odesa, Ukraine. – pp. 1-5. DOI: 10.1109/NAP51885.2021.9568610.

[10] N. P. Klochko *et al.*, "Biodegradable flexible transparent films with copper iodide and biomass-derived nanocellulose for ultraviolet and high-energy visible light protection," *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 852–863, May 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.04.014.

[11] H. Kargarzadeh *et al.*, "Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers, thermoplastic polymers, and porous nanocomposites," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 87, pp. 197–227, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2018.07.008.

[12] A. Naidonov, V. Koval, V. Barbash, M. Dusheiko, O. Yashchenko and O. Yakymenko, "Nanocellulose-Based Biodegradable Bend Sensors," 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2022, pp. 292-297, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927070.

[13] H. Soy and İ. Toy, "Design and implementation of smart pressure sensor for automotive applications," *Measurement*, vol. 176, p. 109184, May 2021, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109184.

[14] M. Xie *et al.*, "Thermal and infrared light self-repairing, high sensitivity, and large strain sensing range shape memory MXene/CNTs/EVA composites fiber strain sensor for human motion monitoring," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 347, p. 113939, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SNA.2022.113939.

[15] V. Lapshuda, V. Koval, V. Barbash, M. Dusheiko, O. Yashchenko and S. Malyuta, "Flexible Humidity Sensors Based on Nanocellulose," 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2022, pp. 208-212, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927092.

[16] В. А. Лапшуда, Я. О. Ліневич, М. Г. Душейко, В. М. Коваль, і В. А. Барбаш, «Ємнісні сенсори вологи на основі плівок наноцелюлози для біорозкладної електроніки», Мікросист., Електрон. та Акуст., вип. 27, вип. 1, с. 255990–1- 255990–8, Квіт 2022. https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.255990.

[17] Richard, Denis, Christophe Clanet, and David Quéré. "Surface phenomena: Contact time of a bouncing drop." Nature 417.6891 (2002): 811-811.

[18] Yahua Liu, Lisa Moevius, Xinpeng Xu,Tiezheng Qian, Julia M Yeomans, Zuankai Wang. "Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces." Nature Physics, 10, 515-519 (2014).

Naidyonov A.O., Koval V.M., Dusheyko M.G., Barbash V.A.
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

BEND SENSORS BASED ON NANOCELLULOSE WITH A MODIFIED HYDROPHOBIC SURFACE

The paper proposes a solution to the problem of significant hydrophilicity of bend sensors based on nanocellulose (NC) by treating the surface of the devices with hydrophobic materials. A solution of fluorocarbon resin (FCS) and a solution of silicone were used as hydrophobic agents. The work uses three different methods of assessing the hydrophobic properties of materials: the visual inspection method, the gravimetric method, and the capacitive method. It is shown that the application of hydrophobic coatings reduces the change in mass of nanocellulose under the influence of moisture by 9-18%, while for unmodified NC this indicator is 106%.

At the same time, the rate of moisture adsorption on the surface of nanocellulose decreases from 53 nF/min (for pure NC) to 2.5-8.1 nF/min (for FCS and silicone). The application of hydrophobic coatings does not affect their temporal stability, but improves the magnitude of the strain sensitivity for the hydrophobic FCS coating and significantly improves the reversibility for both coatings (FCS and silicone) of the bend sensors.

Key words: *nanocellulose, bend sensor, hydrophobicity, fluorocarbon resin, silicone*

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

УДК 53.089.68
Пастущин Л.Б.
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-12
Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

ВАЛІДАЦІЯ НЕСТАНДАРТИЗОАНИХ МЕТОДИК КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Ціллю даної статті є розробка процедури валідації нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки. Основним завданням калібрувальних лабораторій на підприємствах є забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів вимірювання під час калібрування засобів вимірювальної техніки, що в свою чергу є неможливим без застосування методик калібрування. Впровадження європейських стандартів, що регламентують акредитацію і діяльність калібрувальних лабораторій, дають можливість метрологам розробляти власні методики калібрування засобів вимірювальної техніки з подальшою їх валідацією. Якщо замовник не вказує метод, який потрібно використовувати під час калібрування засобу вимірювальної техніки, то використовуються відповідні методи та методики, опубліковані у міжнародних, регіональних чи національних стандартах або видані авторитетними технічними організаціями. Методики калібрування засобів вимірювальної техніки розроблені та модифіковані метрологічними підрозділами, можуть також використовуватись з подальшою їх валідацією. Калібрувальна або випробувальна лабораторія повинна розробити відповідну процедуру валідації і проводити валідацію розроблених калібрувальною лабораторією методик калібрування засобів вимірювальної техніки які знаходяться в експлуатації в випробувальних і калібрувальних лабораторіях. Викладений матеріал надає практичні рекомендації, щодо розроблення власних процедур валідації нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки.

Ключові слова: *валідація, калібрування, невизначеність, вимірювання, засіб вимірювальної техніки, збіжність, відтворюваність, метрологічна діяльність, калібрувальна лабораторія, процедура, статистична оцінка.*

Вступ. Після підписання Угоди про асоціацію з ЄС виникла потреба у гармонізації нашого законодавства у сфері технічного регулювання з європейським. Так, з набранням чинності нової редакції Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність» [1] термін калібрувальна лабораторія визначається як: підприємство, організація або їх відокремлений підрозділ, що здійснює калібрування засобів вимірювальної техніки. Вимоги щодо компетентності калібрувальних та випробувальних лабораторій регламентуються згідно національного стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 [2], який ідентичний європейському та міжнародному документу EN ISO/IEC 17025:2107 та ISO/IEC 17025:2107. Даний національний стандарт чітко вказує на те, що калібрувальна лабораторія має використовувати прийнятні методи та процедури для всієї лабораторної діяльності. Під час калібрування засобів вимірювальної техніки застосовуються міжнародні, регіональні або національні стандарти, але у разі відсутності стандартизованих методик калібрування калібрувальна лабораторія має право розробити власну нестандартизовану методику калібрування засобів вимірювальної техніки. Згідно пункту 7.2.2.1 ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 [2] калібрувальна лабораторія має проводити валідацію нестандартизованих методів калібрування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Калібрувальна лабораторія повинна проводити валідацію нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки згідно процедури валідації та зберігати відповідні матеріали, що передбачається пунктом 7.2.2.4 ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 [2]. Вибір методу валідації для встановлення придатності до застосування за призначенням нестандартизованої методики калібрування є невід'ємною частиною забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів калібрування.

Мета. Метою даної статті є розроблення та аналіз методу валідації нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки, що в свою чергу полегшить трудомістку роботу по розробці процедури валідації тих метрологічних підрозділів, які здійснюють калібрування засобів вимірювальної техніки.

© Пастущин Л.Б.

Валідація – це верифікація того, що зазначені вимоги є відповідними для цільового використання [5]. В свою чергу верифікація – надання об'єктивних доказів, що даний об'єкт (методика калібрування) відповідає зазначеним вимогам [5]. Забезпечення якості результатів калібрування неможливе без об'єктивної валідації методик калібрування.

Оцінювання методик калібрування є компромісом між витратами, ризиком та технічними можливостями. Для проведення валідації нестандартизованих методик калібрування і визначення, що конкретні вимоги до специфічного цільового використання виконуються, застосовують наступні процедури або поєднання цих процедур:

- проведення калібрування з використанням еталонів/стандартних зразків з вищими метрологічними характеристиками або оцінювання систематичного зміщення та прецизійності;
- перевірка стійкості методики шляхом зміни регульованих факторів;
- порівняння результатів, отриманих за допомогою інших валідованих методик калібрування;
- міжлабораторні порівняння;
- систематичне оцінювання факторів, що впливають на результати калібрування;
- оцінювання невизначеності результатів на основі аналітичного чи наукового розуміння теоретичних принципів методу та практичного досвіду.

Об'єм процедури валідації методик (вибрані методи та критерії оцінювання), діапазон та точність значень, отриманих за допомогою валідованих методів, придатність яких підтверджена, повинні відповідати вимогам замовника та діючим нормативним документам. Валідацію методик калібрування проводять згідно з планом розроблення методик калібрування.

При валідації методики рекомендується визначати або підтверджувати наступні показники: збіжність, внутрішньолабораторну відтворюваність, точність, невизначеність вимірювання. Результати валідації методик калібрування оформляються протоколом. Записи про валідацію зберігаються в калібрувальній лабораторії.

Правильність використання цих методів як правило підтверджується наявністю необхідного обладнання, кваліфікованого персоналу, і дотриманням умов проведення калібрування. Під час валідації методики калібрування лабораторія здійснює процедуру калібрування засобу вимірювальної техніки відповідно до вимог самої методики зміна процедури калібрування не допускається. Калібрувальна лабораторія письмово сповіщає замовника у випадку, якщо запропонований ним метод непридатний або застарілий і проводить з ним додаткове узгодження використання іншого, більш відповідного методу виконання калібрування.

Відхилення від методів у всій діяльності метрологічних підрозділів, що здійснюють калібрування, допускаються лише у тому випадку, якщо вносяться зміни до валідованої методики. Вплив таких змін повинен бути визначений, і там, де вони впливають на результати початкової валідації, повинна бути проведена нова валідація зміненої методики. Прийняття замовником відхилень погоджується в додатку до договору.

Для валідації методики калібрування в умовах збіжності можуть бути використані еталонні засоби вимірювальної техніки лабораторії, або засоби вимірювальної техніки, що надійшли на калібрування.

Умови збіжності передбачають:

- однакову методику калібрування;
- використання того ж самого устаткування при тих же самих умовах;
- участь того самого оператора;
- повторення упродовж короткого періоду часу (в той же самий день);
- ті самі реактиви (у разі їх використання).

Показниками збіжності є середньоквадратичне відхилення значень вимірювальної величини в умовах збіжності та границя збіжності результатів вимірювань.

Отримують n $(n\geq10)$ значень вимірюваної величини X $(i=1,2\ldots,n)$ по m серіях $(j=1,2\ldots,m)$.

Обчислюють середньоарифметичне значення вимірювальної величини ($\overline{X}_J$) та дисперсію (S_J^2) результатів вимірювань за формулами:

$$\overline{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{ij}}{n} \quad (1)$$

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{ij} - \overline{X}_j)^2}{n-1} \quad (2)$$

Аналізують отримані дані на можливі промахи за критерієм Граббса.

Для перевірки чи не є викидом найбільша величина з розташованих в порядку зростання

сукупності даних $X\,(i=1,2,...,p)$ обчислюють статистику Граббса за формулою:

$$G_P = (X_P - \overline{X})/S \quad (3)$$

де $$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{p} X_i}{p} \quad (4)$$

і $$S = \sqrt{\frac{1}{p-1}\sum_{i=1}^{p} (X_i - \overline{X})^2} \quad (5)$$

З метою перевірки значущості найменшого результату спостереження обчислюють статистику: $G_1 = (\overline{X} - X_1)/S$, (6)

а) у випадку, якщо значення статистики менше або рівне свого 5% -го критичного значення,

то досліджувану позицію визнають коректною.

б) у випадку, якщо значення статистики більше свого 5% -го критичного значення і менше або рівне свого 1% -го критичного значення, то досліджувану позицію називають квазівикидом.

в) у випадку, якщо значення статистики більше свого 1% -го критичного значення, то досліджувану позицію називають статистичними викидом.

Щоб перевірити, чи можуть два найбільших результати спостережень бути викидами, обчислюють статистику Граббса

$$G_P = S_{p-1,p}^2 / S_0^2, \quad (7)$$

де $$S_0^2 = \sum_{i=1}^{p} (X_i - \overline{X})^2 \quad (8)$$

і $$S_{P-1,P}^2 = \sum_{i=1}^{p-2} (X_i - \overline{X}_{P-1,P})^2 \quad (9)$$

а також $$\overline{X}_{P-1,P} = \frac{1}{p-2}\sum_{i=1}^{p-2} X_i \quad (10)$$

Відповідно, щоб перевірити два найменших результати спостережень, обчислюють статистику Граббса:

$$G = S_{1,2}^2 / S_0^2 \quad (11)$$

де $$S_{1,2}^2 = \sum_{i=1}^{p} (X_i - \overline{X}_{1,2})^2 \quad (12)$$

і $$\overline{X}_{1,2} = \frac{1}{p-2}\sum_{i=3}^{p} X_i \quad (13)$$

Критичні значення для критерію Граббса наведені в ДСТУ ГОСТ ИСО 5725–2:2005 [3].

© Пастущин Л.Б.

При наявності промахів виключають хибні результати, проводять додаткові вимірювання (при потребі) та знову перевіряють дані за критерієм Граббса.

Для перевірки гіпотези про рівність вибіркових дисперсій застосовують критерій Кохрена.

Для сукупності зі *p* стандартних відхилень S_i, розрахованих виходячи з однієї і тієї ж кількості (n) повторних результатів випробувань, статистика, що лежить в основі критерію Кохрена, має вигляд:

$$C = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^{p} S_i^2}, \qquad (14)$$

де $S_{\max}$ - найбільше значення стандартного відхилення в сукупності.

а) у випадку, якщо значення статистики менше або рівне свого 5% -го критичного значення, то досліджувану позицію визнають коректною.

б) у випадку, якщо значення статистики більше свого 5% -го критичного значення і менше або рівне свого 1% -го критичного значення, то досліджувану позицію називають квазівикидом.

в) у випадку, якщо значення статистики більше свого 1% -го критичного значення, то досліджувану позицію називають статистичними викидом.

Критичні значення для критерію Кохрена наведені в ДСТУ ГОСТ ИСО 5725–2:2005 [3].

Середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань в умовах збіжності обчислюють за формулою:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} S_j^2}{m}} \qquad (15)$$

Границю збіжності обчислюють за формулою: $r = t_s \cdot S_r$ (16)

де S_r – середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань, виконаних за умовами збіжності.

t_s – коефіцієнт Стьюдента, що знаходиться за таблицями Стьюдента для заданої імовірності *P* та відповідної степені свободи $f = n - 1$.

Ефективне число степеня свободи ν_{eff} визначається за формулою Велча-Саттерсвейта:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{m} u_i^4(y)/\nu_i} \qquad (17)$$

де ν_i - число степенів свободи для *i-oї* вхідної величини.

Для валідації нестандартизованої методики калібрування в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності необхідно забезпечити наступні умови:

- однакову (або іншу, за наявності) методику калібрування;
- використання того ж самого (або іншого) обладнання при тих же самих умовах;
- участь того самого (або іншого) оператора;
- проведення калібрування в інший день;
- інші реактиви (у разі їх використання).

Показниками внутрішньолабораторної відтворюваності є середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань значень вимірювальної величини, статистична оцінка за критерієм Фішера, що отримано в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності та границя внутрішньолабораторної відтворюваності для результатів вимірювань.

Отримують *n (n≥10)* значень вимірюваної величини *X (i=1,2…,n)* по *m* серіях (*j=1,2…,m)* в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності. Обчислюють

середньоарифметичне значення вимірювальної величини в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності відповідно до формули [1] та дисперсію в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності результатів вимірювань за формулою [2]. Оцінювання середньоквадратичного відхилення результатів вимірювань в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності проводять відповідно до формули:

$$S_{R_л} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} S_j^2}{m}} \tag{17}$$

Границю внутрішньолабораторної відтворюваності обчислюють за формулою:

$$R = t_s \cdot S_{R_ë} \tag{18}$$

де t_s – коефіцієнт (квантиль) Стьюдента і знаходиться за таблицями Стьюдента для заданої ймовірності Р та відповідної степені вільності *f = n-1*.

$S_{R_л}$ - середньо–квадратичне відхилення результатів вимірювань в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності.

Статистична оцінка за критерієм Фішера в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності обчислюється за формулою:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \tag{19}$$

де S_1^2-дисперсія результатів вимірювань в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності виконавця 1 для заданої ймовірності Р та відповідної степені вільності *f = n-1*.

S_2^2-дисперсія результатів вимірювань в умовах внутрішньолабораторної відтворюваності виконавця 2 для заданої ймовірності Р та відповідної степені вільності *f = n-1*.

Критичні значення для критерію Фішера наведені в ДСТУ ГОСТ ИСО 5725–2:2005[3].

Оцінювання придатності методів калібрування за результатами калібрування та розширеною невизначеністю цих результатів проводиться за коефіцієнтом порівняння (*k*).

Згідно пункту 7.7.2 ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 [2] калібрувальна чи випробувальна лабораторія повинна перевіряти свої результати в порівняні з результатами інших лабораторій, де це можливо і доречно. Цей моніторинг повинен плануватися та переглядатися і включати, але не обмежуватись, наступним:

а) участь у перевірках кваліфікації згідно вимог ДСТУ EN ISO/IEC17043:2017 [4];

б) участь у міжлабораторних порівняннях, відмінних від перевірок кваліфікації ДСТУ EN ISO/IEC17043:2017 [4].

Провайдери перевірок кваліфікації, які відповідають вимогам ДСТУ EN ISO/IEC17043:2017 [4], вважаються компетентними.

Підтвердженням придатності методу калібрування є виконання умови:

$$k = \frac{|Y_1 - Y_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \le 1, \tag{20}$$

де *k* – коефіцієнт порівняння;

Y_1 – результат калібрування для методики 1 (лабораторії 1, виконавця 1);

Y_2 – результат калібрування для методики 2 (лабораторії 2, виконавця 2);

U_1 – розширена невизначеність вимірювання результату калібрування для методики 1 (лабораторії 1, виконавця 1);

U_2 – розширена невизначеність вимірювання результату калібрування для методики 2 (лабораторії 2, виконавця 2).

Розрахункове значення показника *k* порівнюється з критичним значенням наступним чином:

$|k| \le 1$ - методика є придатною і не вимагає запобіжних або коригувальних дій;

$|k| \ge 1$ - методика є непридатною і вимагає коригувальних дій;

© Пастущин Л.Б.

Всі результати валідації методики заносяться до протоколу та зберігаються калібрувальною лабораторією відповідно до встановленої процедури.

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

- відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 [2] чітко визначається можливість використання розроблених лабораторією методів калібрування засобів вимірювальної техніки у разі відсутності міжнародних, регіональних або національних стандартів;
- калібрувальна лабораторія повинна проводити валідацію нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки згідно процедури валідації. Вибір методу валідації для встановлення придатності до застосування за призначенням нестандартизованої методики калібрування є невід'ємною частиною забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів калібрування і вимагає науково-технічного обґрунтування.
- викладений матеріал надає практичні рекомендації щодо власних розроблених процедур валідації розроблених методик калібрування засобів вимірювальної техніки, що в свою чергу полегшить трудомістку і дороговартісну роботу тих метрологічних підрозділів, які здійснюють калібрування засобів вимірювальної техніки.

Список інформаційних джерел

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 05.06.2014р.

2. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT). Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

3. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725–2:2005 Національний стандарт України. Точність (правильність прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності і відтворюваності стандартного методу вимірювання.

4. ДСТУ EN ISO/IEC17043:2017 (EN ISO/IEC 17043:2010; ISO/IEC 17043:2010, IDT). Національний стандарт України. Оцінка відповідності. Загальні вимоги до перевірки професійного рівня.

5. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (Міжнародний словник по метрології - Основні і загальні поняття і відповідні терміни (VIM)).

L.Pastushchyn
State enterprise "Ivano-Frankivsk Scientific and Production Center of Standardization, Metrology and Certification"

VALIDATION OF NON-STANDARDIZED METHODS OF CALIBRATION OF MEASURING TECHNIQUES

The purpose of this article is developing of validation procedures for non-standard calibration methods of measuring equipment. The main task of calibration laboratories at enterprises is to ensure the uniformity of measurement and metrological traceability of measurement results during the calibration of measuring equipment, which in turn is impossible without the application of calibration methods. The implementation of the European standards, which is governing the accreditation and activity of calibration laboratories, provide the opportunity to metrologists to develop their own methods of calibrating measuring instruments with their subsequent validation. If the customer does not specify the method to be used during the calibration of the measuring instruments, then it should be used the appropriate methods and methodologies, published in international, regional or national standards or issued by authoritative technical organizations. The methods of calibration of measuring instruments are developed and modified by metrological units can also be used with their subsequent validation. The calibration or testing laboratory should develop an appropriate validation procedure and carry out validation of the calibration methods developed by the calibration laboratory for measuring instruments used in testing and calibration laboratories. The presented material provides practical recommendations for the developing own validation procedures for non-standard calibration methods of measuring equipment.

Key words: *validation, calibration, uncertainty, measurement, measuring instrument, convergence, reproducibility, metrological activity, calibration laboratory, procedure.*

© Пастущин Л.Б.

УДК 66.021.1:532.5
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-13
Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті подано порівняльну характеристику методів моделювання, розроблено математичну модель вимірювання параметрів блоку стабілізації каталітичного риформінгу та згідно моделі спроектовано функціональну схему технологічного процесу.

Ключові слова: *моделювання технологічних процесів, методи моделювання, блок стабілізації каталітичного риформінгу.*

Постановка проблеми. Здійснення аналізу методів моделювання технологічних процесів, які дозволяють на кожному етапі, від стадії проектування, вимірювання, *контролю та діагностики* аналізувати характеристики об’єкту дослідження та дії на нього зовнішніх впливів є актуальною задачею при розробці як самих технологічних процесів так і проектування і реалізація оптимальних систем управління ними. Тому актуальною задачею є розробляння моделей з врахуванням значної кількості методів моделювання та вибір найбільш оптимальної. В статті здійснена спроба проаналізувати доцільність застосування конкретних методів, показано, що для, зокрема, хіміко-технологічних процесів доцільне застосування традиційних методів моделювання та подано в якості прикладу модель блоку стабілізації каталітичного риформінгу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізуючи розмаїття методів, що лежать в основі моделювання технологічних процесів варто виокремити томографічні методи. Дослідження цих методів з точки зору фізичних і технічних ознак, що засновані на перетворенні Радона, фізичною базою якого є експоненціальний закон ослаблення випромінювання Бугера-Ламберта-Бера. Загалом отримання зображення внутрішньої будови об’єкта досліджень базується на фізичних особливостях взаємодії випромінювання і речовини. При цьому випромінювання проникає в об’єкт і частково поглинається або розсіюється ним. Звідси класифікація методів томографії варто описати через наступні ознаки: відмінність в розташуванні джерела випромінювання щодо області дослідження, вид випромінювання, параметр, що реконструюється, переважання процесів відбивання або процесів розсіювання і дифузії.

Широкого використання отримала рентгенівська комп'ютерна томографія (РКТ) для отримання зображень з великою роздільною здатністю та побудовою тривимірного зображення об'єкта з набору проекцій, що дозволяє за допомогою 3D моделювання вирішувати питання контролю та діагностики. Дослідження методів томографії шляхом моделювання алгоритмів реконструкції з використанням інших (не рентгенівських джерел випромінювання) є актуальною задачею і може знайти широке застосування в практиці контролю та вимірювання [2].

Проблема реконструкції (відновлення) зображень за проекціями була поставлена незалежно в ряді областей науки. Найбільш важливий практичний аспект цієї проблеми пов’язаний з можливістю отримання інформації про розподіл густини речовини всередині об’єкта за багатьма проекціями, виміряними в полі рентгенівського випромінювання, що . власне і досліджено при здійсненні моделювання процесів із застосуванням методів реконструктивної томографії [1].

Але для процесів, пов’язаних з перебігом хімічних перетворень, застосування цього методу складне , а в ряді випадків, взагалі неможливе.

Здійснимо порівняльний аналіз, розглядаючи статичні моделі, що отримані аналітичним, експериментальним та експериментально-аналітичним методом.

Аналітичний метод при розробленні статичних моделей базується на дослідженні внутрішніх залежностей в об'єкті моделювання на основі даних про об'єкт. Отримана аналітичним методом модель об'єкта має структуру досить близьку до структури самого об'єкта, дозволяє робити узагальнення об'єктів, близьких за конструкцією та фізичними властивостями, але точність такої моделі, як правило, невисока.

© Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.

Експериментальні методи отримання математичних моделей поділяються на детерміновані і статистичні. Детерміновані методи базується на наявності визначених, закономірних взаємозв'язків між вхідними та вихідними параметрами об'єкта моделювання і тому метод призначений на визначення цих залежностей. Узагальнення властивостей класу об'єктів за такими моделями чи характеристиками ускладнене.

Експериментально-статистичний метод отримання статичних характеристик базується на ймовірних залежностях між вхідними та вихідними параметрами об'єкта. Під час розробки такої моделі вважається, що мають місце випадкові вхідні впливи і випадкові вихідні реакції з певними законами їх розподілу.

Експериментально-статистичні методи з точки зору точності отриманої характеристики залежать від кількості експериментальних даних та обгрунтування при виборі закону їх розподілу. Цей метод дозволяє отримати модель чи характеристику без додаткових збурень, в процесі нормальної експлуатації об'єкта моделювання, що використовується в алгоритмах отримання чи уточнення моделей об'єктів автоматичними системами керування в процесі їх роботи. Даний метод громіздкий при реалізації, точність отриманих цим методом моделей невисока.

Експериментально-аналітичні методи отримання статичних моделей базуються на використанні структури аналітичних моделей та визначенні коефіцієнтів таких моделей експериментальним шляхом. Вони трудоємкі, однак отримані моделі мають структуру, що відповідає структурі об'єктів моделювання аналогічно до аналітичних моделей і володіють високою точністю, що притаманна експериментальним моделям.

З огляду на це, метою статті є **розроблення математичної моделі вимірювання параметрів блоку стабілізації каталітичного риформінгу [3].**

Даний блок призначений для видалення з нестабільного каталізату, який поступає з попередньої стадії стабільного бензину.

Блок складається з відстійника I, кожухотрубного теплообмінника II, ректифікаційної колони III та печі IV.

Розглянемо кожний з елементів блоку окремо.

Відстійник призначений для відстоювання нестабільного конденсату і для розподілу його в необхідних кількостях по трубопроводу.

По функціональній схемі контролю в відстійнику підлягає рівень речовини. Ємність має один вхід і два виходи речовини. Для того щоб визначити, який рівень речовини у відстійнку нам необхідно знати наступні параметри:

1) Об’єм речовини, що вливається за одиницю часу:

$$V_1=F_1*\Delta t \quad (1)$$

2) Кількість речовини, яка вилиється з відстійника складає:

$$V_2=F_4*\Delta t+ F_6*\Delta t \quad (2)$$

$$V_3=F_3*\Delta t \quad (3)$$

3) Крім того, необхідно врахувати зміну рівня рідини від зміни температури нестабільного конденсату.

Величина, на яку зміниться рівень від зміни температури складає:

$$\Delta L=V_{t1}*c_1*\Delta T/S \quad (4)$$

де V_{t1} – об’єм рідини в резервуарі в момент часу t_1,

c_1 – коефіцієнт теплового розширення рідини.

ΔT – зміна температури нестабільного каталізату.

S – площа поперечного перерізу відстійника.

$$V_{t1}=S_1*L_{t1} \quad (5)$$

L_{t1} – рівень в момент часу t_1.

Таким чином рівень в момент часу t_2 складає:

$$L_{t2} = L_{t1} + F_1\Delta t - F_3\Delta t - F_6\Delta t - F_4\Delta t + c_1 * \Delta T * L_{t1} \quad (6)$$

Розглянемо кожухотрубний теплообмінник. Стале значення температури в тій частині теплообмінника, де відбувається конденсація або випаровування речовини дозволяє розглядати його як ланку з зосередженими параметрами. Ту частину теплообмінника, в які відбувається тільки нагрівання або охолодження речовини і температура змінюється по довжині теплообмінника, треба розглядати як ланку з розподіленими параметрами. Для теплообмінників

© Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.

цього типу задача регулювання і вибір системи автоматизації диктуються призначенням апарата. В теплообмінниках, які призначені для нагрівання речовини за рахунок тепла конденсації нагріваючої пари, завданням регулювання є стабілізація температури технологічного потоку на виході з теплообмінника. У випаровувачах і конденсаторах, що призначені для випаровування або конденсації технологічного потоку задача регулювання зводиться до підтримання матеріального балансу по технологічному потоку.

Для виявлення факторів, які впливають на температуру рідини, запишемо основні рівняння, які описують процеси в теплообміннику:

рівняння теплового балансу:

$$Q_ж c_р*(T_{вих} - T_{вх}) = Q_п*r_п(P_п) – q_{пот},$$

де $c_р$ – питома теплоємність рідини,

$r_п$ – ентальпія нагріваючої пари;

рівняння матеріального балансу для міжтрубного простору:

$$S*dL/dt = Q_п – Q_к = 0,$$

рівняння теплопередачі через стінку труби

$$dq = k_т dF_т(T_п - T)$$

Основними фізичними величинами, виходячи з принципу дії апарата є витрата і температута охолоджуючої рідини на вході в теплообмінник ($Q_ж$ і $T_{вх}$), тиск нагріваючої пари в заводській магістралі ($P_п$), тепловтрати ($q_{пот}$), які залежать від температури навколишнього середовища, коефіцієнт теплопередачі $k_т$. При цьому параметри $Q_ж$, $T_{вх}$ і $P_п$ легко піддаються контролю, а $q_{пот}$ і $k_т$ є неконтрольованими.В якості регулюючих дій можна використовувати витрату нагріваючої пари $Q_п$ і конденсату $Q_к$, а в якості вихідних координат – температуру $T_{вих}$ і рівень конденсату в міжтрубному просторі L. $T_{вих}$ і L пов’язані між собою через поверхню теплообміну, оскільки ефективність теплопередачі у верхній частині кожуха, заповненій парою, значно вища, ніж між конденсатом і нагріваємим потоком. Тому

$$T_{вих} = T_{вх} + (Q_п/Q_ж)*(r_п/c_р) – q_{pot}/(Q_ж*c_{рж})$$

Температура на виході з теплообмінника становить:

$$T_{вих} = T_1 + \frac{F_n}{F_4}\frac{r_n}{c_p} - \frac{q_{втр}}{F_4 c_p} \qquad (7)$$

Розглянемо піч, як об’экт дослідження. Отже, піч – технологічний апарат в якому проходить нагрівання речовини до високої температури.

В печі необхідно визначати наступні параметри:

Тиск в закритому просторі визначається рівнянням стану газу:

$$P_{t1}*V_{t1}/T_{t1} = P_{t2}*V_{t2}/T_{t2}$$

де V_{t1}-об′єм газу в момент часу t_1 (при нормальних умовах).

$$V_{t2}=V_{t1}+F_8\Delta t+F_9\Delta t-F_{10}\Delta t$$

Отже:

$$P_{t2} = T_{t2}*P_{t1}*V_{t2}/(V_{t1}*T_{t1}),$$

Температура в печі і на виході продукту з печі складає

$$T_г = (q_т + c_{рт}*T_т + \gamma c_{рв}*T_в)/(c_{рт}+\gamma c_{рв})$$

$$T_{вих}=T_{вх} – (Q_д/Q)*(c_{рд}/c_р) *T_п + Q_т*(1+\gamma)*c_д / Q*(c_р*c_{рт} + \gamma*c_{рв}) + (T_в*Q_т*c_{рд})/(Q*c_р)$$

де $Q_т$, $Q_в$, $Q_д$, Q — витрати палива, повітря, димових газів і потоку, що нагрівається, $c_{рт}$, $c_{рв}$, $c_{рд}$, $c_р$ - питомі теплоємності речовин; $T_т$, $T_в$, $T_{вх}$ - вхідні температури палива, повітря, що нагрівається і потоку; $T_д$, $T_{вих}$- вихідні температури димових газів і потоку, що нагрівається; $\gamma=Q_в / Q_т$ - коефіцієнт співвідношення витрат повітря і палива.

$$T_{вих} = Q_д*c_{рд}*(T_г - T_п)/(Q*c_р)+T_{вх}$$

Результати дослідження. Згідно описаної моделі функціональна схема технологічного процесу матиме наступний вигляд (рисунок 1):

© Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.

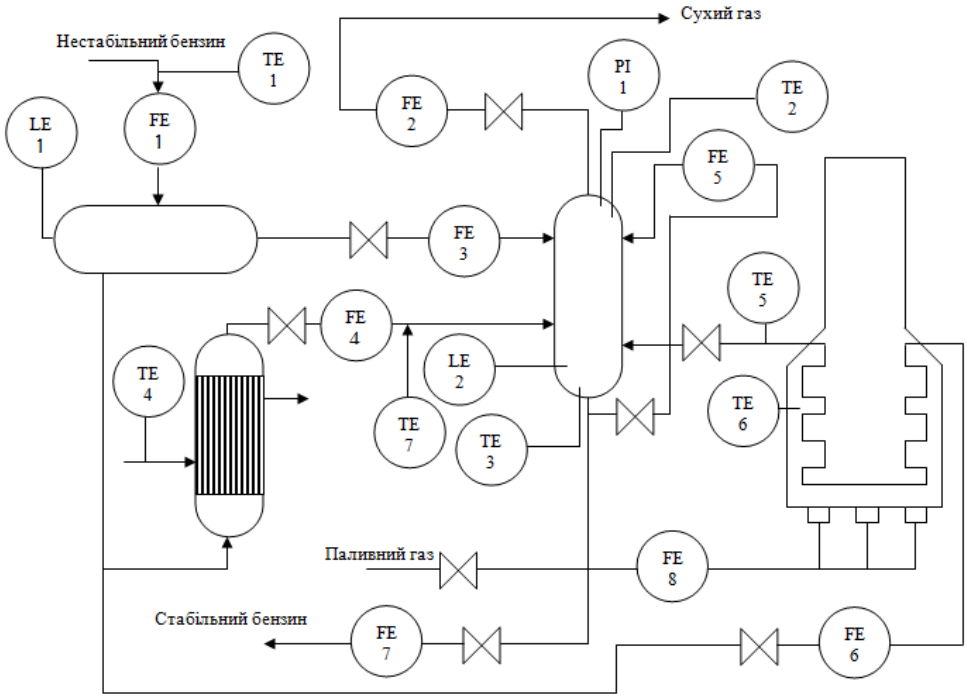


Рис.1. Функціональна схема установки

Ректифікаційні установки служать для розділу рідких однорідних сумішей на складові в результаті взаємодії суміші парів і рідкої суміші. Розглянемо особливості ректифікаційної установки на прикладі установки для розділу бінарної суміші.

При автоматизації процесу ректифікації контролю підлягають наступні параметри:

1) Температура верху і низу колони:

Зверху і внизу ректифікаційної колони проходить процес змішування:

Отже, температури можна визначити наступним чином:

$$T_{2t2} = \frac{F_3 T_1 c_{p4}}{F_3 c_{p4} + F_4 c_{p5} + F_2 c_{p2} + F_{вип} c_{p7}} + \frac{F_5 T_3 c_{p5}}{F_3 c_{p4} + F_4 c_{p5} + F_2 c_{p2} + F_{вип} c_{p7}} - \frac{F_2 T_2 c_{p6}}{F_3 c_{p4} + F_4 c_{p5} + F_2 c_{p2} + F_{вип} c_{p7}} + \frac{F_{вип} T_{3t1} c_{p7}}{F_3 c_{p4} + F_4 c_{p5} + F_2 c_{p2} + F_{вип} c_{p7}} \quad (8)$$

$$T_{3t2} = \frac{F_4 T_7 c_{p7}}{F_4 c_{p5} + F_6 c_{p6} + F_7 c_{p7} + F_{вип} c_{p7}} + \frac{F_6 T_5 c_{p6}}{F_4 c_{p5} + F_6 c_{p6} + F_7 c_{p7} + F_{вип} c_{p7}} - \frac{F_7 T_{3t1} c_{p7}}{F_4 c_{p5} + F_6 c_{p6} + F_7 c_{p7} + F_{вип} c_{p7}} + \frac{F_{вип} T_{3t1} c_{p7}}{F_4 c_{p5} + F_6 c_{p6} + F_7 c_{p7} + F_{вип} c_{p7}} \quad (9)$$

2) Рівень рідини внизу колони:

$$L_{t2} = L_{t1} + F_4 \Delta t + F_5 \Delta t + F_6 \Delta t - c_1 F_5 \Delta t + F_3 \Delta t + c_2 F_5 \Delta t - S L_{t1} c_3 (T_3 - T_{вип}) - F_7 \Delta t - F_5 \Delta t_1 \quad (10)$$

де c_1, c_2, c_3 - коефіцієнти випаровування речовини;

S - площа горизонтального перерізу колони;

$T_{вип}$ - температура випаровування суміші.

3) Тиск в колоні:

Тиск в закритому просторі визначається рівнянням стану газу

$$P_{t1}*V_{t1}/T_{t1} = P_{t2}*V_{t2}/T_{t2}$$

де V_{t1}-об′єм газу в момент часу t_1 (при нормальних умовах).

$$V_{t2}=V_{t1}+F_4\Delta t+F_6\Delta t+F_3\Delta t+F_5\Delta t-F_2\Delta t-F_7\Delta t$$

Отже:

$$P_{t2} = T_{t2}*P_{t1}*V_{t2}/(V_{t1}*T_{t1})$$

© Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.

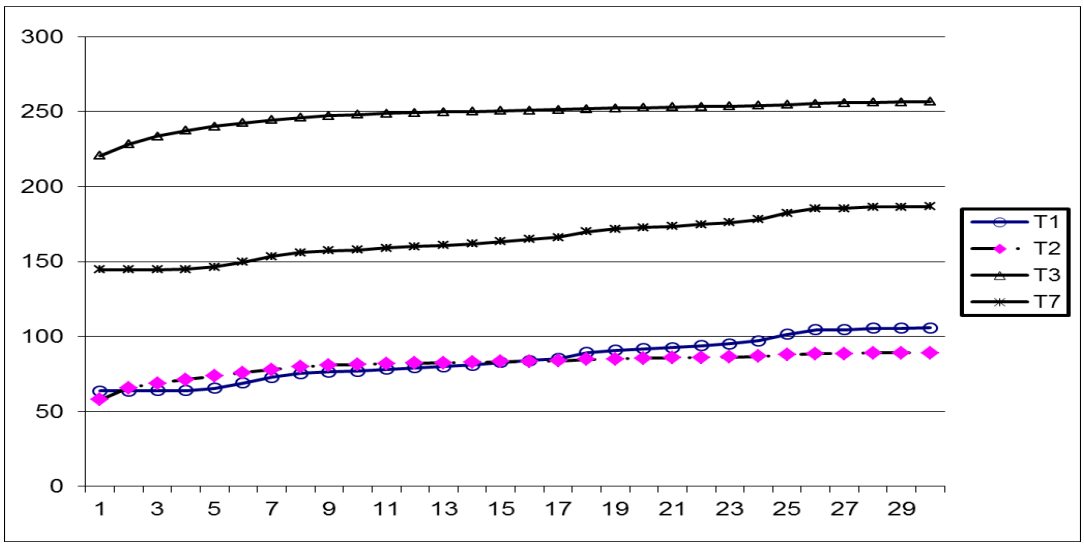


Рис. 2. Графіки залежностей температур в контрольних точках від вхідної температури

Висновки. Відповідно до фізики протікання процесу каталітичного риформінгу контролюються і регулюються наступні параметри:

1) тиск в ректифікаційній колоні регулюється витратою сухого газу з установки;

2) температура зверху колони регулюється витратою нестабільного конденсату з відстійника;

3) температура в низу колони регулюється витратою нестабільного конденсату з кожухотрубного теплообмінника;

4) витрата стабільного бензину, що подається на зрошення регулюється в залежності від витрати нестабільного конденсату з відстійника;

5) рівень в відстійнику регулюється витратою нестабільного конденсату, що поступає в піч на нагрівання;

6) рівень в ректифікаційній колоні регулюється витратою стабільного бензину з ректифікаційної установки;

7) температура в печі регулюється витратою палива на нагрівання;

8) витрата повітря регулюється в залежності від витрати палива;

9) витратою димових газів регулюють тиск в печі.

Таким чином, загальна математична модель установки є визначеною і підлягає програмуванню.

Список використаних джерел

1. Чеховський С.А. Математичне моделювання фізичних процесів/Навчальний посібник Івано-Франківськ, Факел, 2003.- 174 стор.

2. Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н. М. Застосування методів комп'ютерної томографії в техніці та медицині/ V-та всеукраїнська науково-практична конференція "Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку", Луцьк, Луцький національний технічний університет, 20-22 жовтня 2022 року, с. 54-55.

3 Стеценко І.В. Моделювання систем: [навчальний посібник] / І.В. Стеценко. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 399 с.

Pindus O.V., Chekhovskyi S.A., Pindus N.M., Vytvytska L.A.
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk,

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

The article presents a comparative description of modeling methods, developed a mathematical model for measuring the parameters of the catalytic reforming stabilization block, and designed a functional scheme of the technological process according to the designed model.

Keywords: *modeling of technological processes, modeling methods, catalytic reforming stabilization block.*

© Піндус О.В., Чеховський С.А., Піндус Н.М., Витвицька Л.А.

УДК 621.396.61
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-14
Приступа С.О. *к.т.н.,* **Мороз С.А.** *к.т.н.,* **Ткачук А.А.** *к.т.н.,* **Селепина Й.Р.** *к.т.н.,*
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ СТРУМУ В ПЛАСТИНЦІ КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОРА

В статті розглянуте застосування кварцових резонаторів, що дозволяють отримати порівняно високу стабільність частоти при простій конструкції збудників. Зазвичай кварцові резонатори використовуються на фіксованих частотах, проте у деяких випадках може здійснюватися керування частоти кварцових резонаторів у певних межах. Також для забезпечення надійної роботи кварцових резонаторів в апаратурі є правильний вибір схеми і дотримання умов та режимів застосування.
Ключові слова: *генератор, резонатор, кварц, коливання, мода.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

Одними з основних елементами багатьох сучасних радіотехнічних пристроїв та систем є генератори коливань. Основними вимогами для них є високі та жорсткі вимоги щодо стабільності й еталонності частоти. У той же час у сучасній радіотехніці та електроніці генератори повинні мати малі габарити та масу, бути високочастотними, а також надійними, стійкими до різних механічних навантажень чи вібрацій.

Відповідно до функцій, які виконуються кварцовими генераторами, їх застосування в сучасних радіотехнічних пристроях на перше місце виходить забезпечення високої надійності роботи кварцових резонаторів. На задоволення високих вимог надійності впиває ряд науково-технічних завдань під час розробки, виробництва та експлуатації. Велике значення у цьому плані мають уніфікація конструкції та параметрів кварцових резонаторів, механізація процесів виробництва, вдосконалення технології виготовлення кристалів та створення досконалих комплексів контрольно-вимірювальної і випробувальної техніки.

Також важливе значення для забезпечення належної надійності роботи кварцових резонаторів в пристроях та системах мають правильний вибір схеми, дотримання режимів та умов застосування.

Крім відомих областей застосування кварцових резонаторів таких як: генератори (гетеродини та калібратори еталонних частот) і фільтри (режекторні, смугові), їх часто використовують як високоточні давачі тиску, прискорення, температури тощо.

Застосування кварцових резонаторів дає можливість отримати високу стабільність частоти при простій конструкції. Переважно кварцові резонатори використовуються на фіксованих частотах, однак у деяких випадках можна забезпечити керування частотою кварцових резонаторів в певних межах (наприклад, при безпосередній частотній модуляції кварцових генераторів чи при термокомпенсації частоти).

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

«В основі роботи кварцового резонатора покладений п'єзоелектричний ефект, що виникає на кварцовій пластинці. Для виготовлення резонаторів придатний лише низькотемпературний кварц, який має п'єзоелектричні властивості. Кварц є поліморфною модифікацією діоксиду кремнію SiO_2, і зустрічається в природі у вигляді кристалів і гальки. У вільному вигляді в земній корі кварцу близько 12%, крім того у вигляді сумішей у складі інших мінералів кварцу земній корі більше 60% кварцу (масова частка). Для виготовлення резонаторів використовують як натуральний, так і синтетичний кристал кварцу». [5]

Оптичний та п'єзоелектричний синтетичний кварц застосовується в електроніці, у тому числі в персональних комп'ютерах, радіо- та телекомунікаційних пристроях, оптиці та телеметрії, цифрових відеокамерах та фотоапаратах, системах дистанційного керування та автоматичного контролю, радарному та радіонавігаційному обладнанні.

«Явище п'єзоелектричного ефекту було відкрито у 1880 році братами Жаком та П'єром Кюрі. Під час проведення експериментів вони помітили, що при натисканні на поверхню кристалу кварцу та деяких інших кристалів на їх гранях виникає електричний заряд. Пізніше це

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.

явище отримало назву п'єзоелектричного ефекту. Згодом брати відкрили зворотній п'єзоелектричний ефект. Вони помітили, що прикладання до кристалу різниці потенціалів електричного поля призводить до деформації цього кристалу». [5]

П'єзоелектричний матеріал розміщується між двома металевими пластинами. Для виникнення електричного заряду на пластинках слід прикласти механічну силу. Саме прикладання механічних зусиль до металевих пластинок і призводить до накопичення електричного заряду на них. Таким чином п'єзоелектричний ефект діє як міні-генератор.

Кварц (діоксид кремнію) – перший відомий і досі використовуваний п'єзоелектричний природний матеріал. Пластинку низькотемпературного кварцу вирізають з кристала певним чином. Саме кут під яким дана пластинка вирізана з кристалу, визначає електромеханічні властивості резонатора. Потім, шляхом нанесення шарів нікелю, платини, золота чи срібла, на цю пластинку з двох сторін прикріплюють струмопровідні електроди, до яких приєднують жорсткі проводові виводи. Вся конструкція розміщується у невеликому герметичному корпусі (рис. 1). Від типу зрізу залежить багато параметрів резонатора: частота, температурна стабільність, стійкість до резонансу і відсутність чи наявність паразитних резонансних частот. Так утворюється коливальна система, що має власну резонансну частоту.

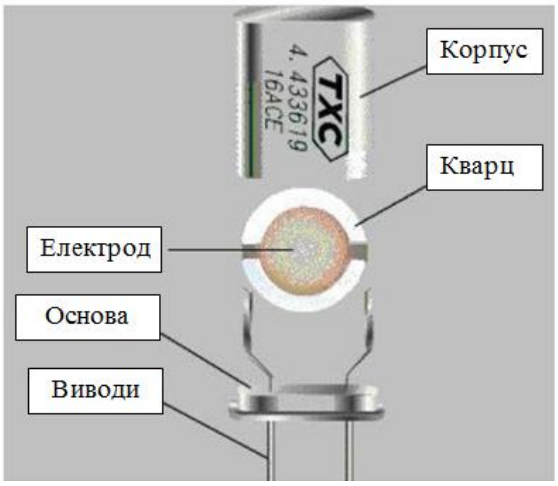


Рисунок 1 – Будова кварцового резонатора

Якщо прикласти до металевих електродів пластики кварцового резонатора змінну напругу заданої резонансної частоти, то виникне резонанс, і амплітуда гармонійних коливань пластинки дуже зросте. При цьому опір резонатора сильно зменшується. Подібне явище спостерігається в послідовному коливальному контурі. Через високу добротність даних «коливання», енергетичні втрати в резонаторі при його збудженні на резонансній частоті є незначними.

« Кристал кварцу – анізотропне тіло, і його фізичні властивості різні у різних напрямках. Для описання фізичних властивостей кварцу, а також в техніці, в основному використовують кристалографічну систему координат (рисунок 2), в напрямку яких він володіє визначеними (характерними для кожної вісі) властивостями. Тут *Z* – «оптична» вісь, яка співпадає з повздовжньою віссю кристалу. В цьому напрямку п'єзоефект не проявляється, електропровідність вища, ніж у перпендикулярному напрямку, відсутнє подвійне заломлення світлового променя. Вісь *X* – «електрична», направлена паралельно одній із граней призми, осей *X* в кристалі кварцу три. В напрямку вісі *X* механічні сили викликають інтенсивне виникнення електричних зарядів. Вісь *Y* – «механічна», направлена перпендикулярно площині *XZ*, осей *Y* також три » [8].

Для отримання кварцових резонаторів п'єзоелементи (пластини, бруски тощо) вирізуються з кристалу кварцу під різноманітними кутами відносно кристалографічних осей. Така орієнтація п'єзоелемента називається зрізом.

Існує поняття початкової орієнтації – коли усі грані п'єзоелемента паралельні до кристалографічних осей. Умовне позначення цієї початкової орієнтації п'єзоелемента складається з двох літер (*X*, *Y* або *Z*): перша вказує яка вісь, яка є паралельною до товщини п'єзоелемента, друга – яка із осей є паралельною до його довжини.

Здійснивши ряд послідовних поворотів п'єзоелемента навколо його ребер на різні кути

отримують велику кількість різноманітних орієнтацій, які називають «косими» зрізами.

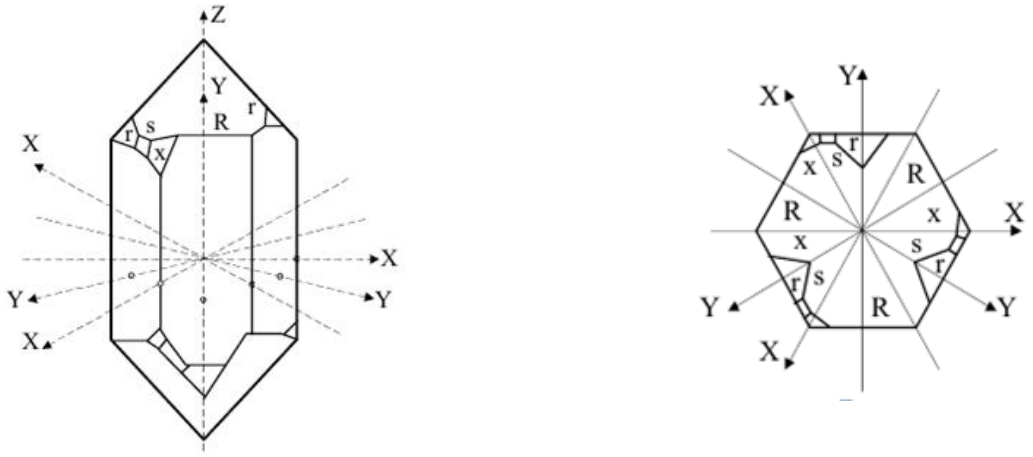


Рисунок 2 – Кристалографічні вісі кварцу

«Позначення орієнтації п'єзоелемента з гранями, що утворюють кути з кристалографічними осями, складається з позначення першочергової орієнтації, до якої додають ще одну, дві або три букви (*l, b, s*), вказуючи які напрямки (повздовж довжини, товщини або ширини) ребер п'єзоелемента використані як осі першого та наступних поворотів із положення початкової орієнтації. Кути першого, другого та третього поворотів п'єзоелемента навколо цих осей позначають відповідно буквами α, β та γ, які проставляються через косі лінії. Числа, які проставлені замість цих букв, показують величину кутів повороту. Кут повороту вважається позитивним, якщо поворот здійснюється проти стрілки годинника» [8].

Кожний зріз кварцу характеризується частотним коефіцієнтом *N*, який пов'язує резонансну частоту п'єзоелемента f_q з його частотовизначальним розміром *a* через співвідношення $N = f_q \cdot a$.

Для деяких типів кварцових резонаторів частотний коефіцієнт *N* визначається за двома розмірами п'єзоелемента. Величина коефіцієнта *N* залежить як від фізичних властивостей так і від орієнтації п'єзоелемента. За числовим значенням частотного коефіцієнта оцінюється діапазон частот п'єзоелемента на тих чи інших зрізах, або, навпаки, за заданою частотою f_q резонатора можна визначити геометричний розмір п'єзоелемента *a*. Під час поздовжніх коливань частотновизначальним розміром *a* є довжина п'єзоелемента. Під час коливань виду зсув по товщині чи зсув по контуру частотновизначальним розміром є відповідно товщина та розміри по контуру.

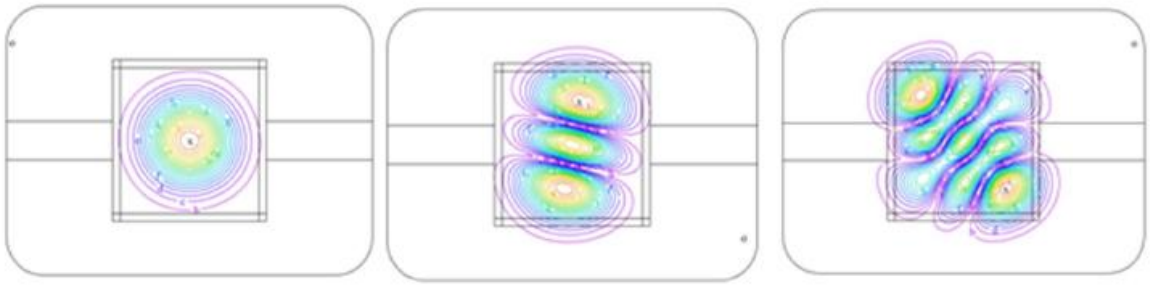
Нижня межа частотного діапазону будь-якого зрізу обмежується можливістю застосування кварцових резонаторів великих розмірів і недостатньою механічною міцністю. Верхня межа діапазону зрізу залежить від рівня технології виробництва, який забезпечує можливість створення п'єзоелементів з достатньо малими частотновизначальними розмірами.

Під час зміни частоти напружень, що прикладаються до резонатора, спостерігаються інтенсивні резонанси на частотах, що близькі до частот основного коливання та частотах їх обертонів. Ці коливання називаються ангармонічними обертонами, або ангармоніками, або паразитними коливаннями [6]. Їхня поява зумовлена двомірним поширенням пружних хвиль та їх інтерференцією з виникненням стоячих хвиль. До цього призводить відбиття від країв пружного елемента, країв електродів та від елементів кріплення. На рисунку 3 [7, 8] наведено приклади розподілу амплітуд зсувів мод товщинно-зсувних коливань кварцової пластини ТД-зрізу.

Відносні амплітуди зміщень частинок поверхні п'єзоелемента (рис. 4) показані у вигляді замкнутих ліній рівня. У центрі пучностей відносні амплітуди максимальні.

У п'єзоелектричних резонаторах використовують наступні коливання: стиснення-розтягування по довжині, ширині і товщині; зсуву по товщині (більшою мірою) і по ширині (меншою); вигину по товщині та ширині; кручення по довжині [2]. Вибір поздовжніх або поперечних мод коливань залежить від їхньої добротності, термочутливості та стабільності. Обертони високих порядків (3, 5, 7, 9) застосовують у кварцових генераторах для отримання опорних коливань у діапазоні 30...200 МГц і вище.

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.



а *б* *в*

Рисунок 3 – Приклади розподілу амплітуд зсувів мод коливань кварцової пластини ТД-зрізу з робочою частотою на третьому обертоні: а – третій механічний обертон Mode f311 = 1010036 МГц; б – ангармоніка Mode f313 = 10,30289 МГц; в – ангармоніка Mode f333 = 10,52280 МГц

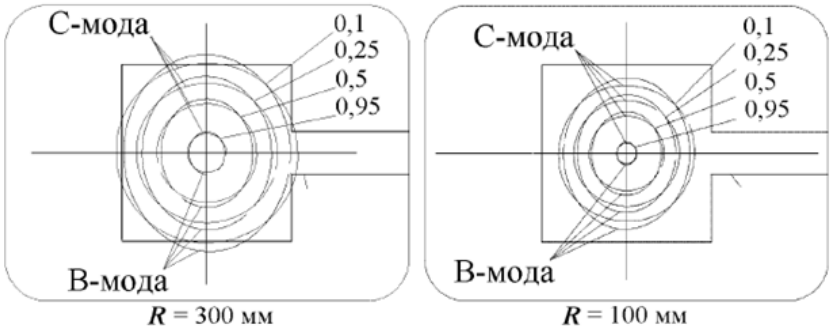


Рисунок 4 – Розташування рівнів амплітуди зміщень частинок поверхні п'єзоелемента для коливань В-моди (fb311) щодо С-моди (fc311) у резонаторах ТД-зрізу по третій механічній гармоніці з різним радіусом кривизни поверхні R

Залежно від форми п'єзоелементу, типу зрізу, способів збудження та розташування електродів у п'єзоелементі можуть виникати коливання різних видів.

« Механічні коливання твердих тіл, які обумовлені розповсюдженням у них пружних деформацій визначеного виду, розрізняють за видом деформації: стиску-розтягу, зсуву (зсувні коливання), вигину (коливання вигину), кручення (коливання кручення). Перші два вважаються найпростішими; вигин та кручення іноді розглядають як особливі випадки неоднорідних деформацій стиск-розтяг та зсув відповідно. Хвилі стиску-розтягу та зсуву можуть розповсюджуватися як в необмеженому середовищі, так і в тілах обмежених форм. Хвилі вигину та кручення можуть існувати і розповсюджуватися тільки в обмеженому середовищі » [6].

Метою статті є теоретичне дослідження фізичних властивостей кварцового елементу резонатора, а саме розрахунок поверхневої густина струму на поверхні кристалічного елемента на різних модах коливання.

Постановка завдання.

Для досягнення поставленої мети слід виконати розрахунок спектру коливань і полів поверхневої густини струмів кристалічних елементів двоповоротних зрізів та провести теоретичні дослідження даних п'єзоелементів;

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

Для опису фізичних властивостей кварцового елементу резонатора, спершу необхідно вибрати, виходячи з граничних умов та симетрії кристалічних ґраток, систему координат X_1, X_2, X_3 зручну для вирішення завдання. Далі у середовищі виділити елементарний об'єм і розглянути сили, що діють на межі виділеного куба з боку середовища. Це сукупність різноспрямованих сил, наведених до одиниці поверхні, або напруження T_j (рис. 5) [12].

Всередині кварцового елементу куб зі сторонами паралельними осям *X, Y, Z* на кожну грань діє сила, яку можна розкласти на три компоненти. Індекси, що позначають напрямок вздовж осі *X* позначимо 1, *Y* – 2 і *Z* – 3.

Тензори напружень позначаються символами T_{11}, T_{21}, T_{31}, T_{22}, T_{12}, T_{32}, T_{33}, T_{13}, T_{23}.

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.

Компоненти T_{11}, T_{22}, T_{33} відповідають зусиллям розтягування, решта – зусиллям зсуву. Оскільки напруження однорідне і тіло перебуває у стані рівноваги то на протилежні грані діють рівні компоненти. Отже, $T_{12}=T_{21}$, $T_{13}=T_{31}$, $T_{23}=T_{32}$ відповідно. В іншому випадку будуть створюватися зсувні моменти на гранях куба. Спільно ці компоненти утворюють тензор механічного напруження.

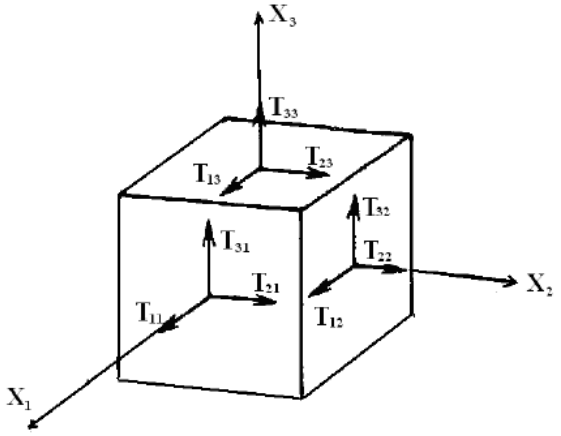


Рисунок 5 – Складові пружних напружень, що діють на елементарний куб

Механічні напруження в кристалі кварцу описуються тензором механічного напруження T_{ij}:

$$T = \begin{Vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{Vmatrix} \quad (1)$$

Закон Гука для анізотропного пружного середовища у випадку відсутності п'єзоефекту:

$$T_{ij} = c_{ijkl} r_{ki} \quad (2)$$

де i,j,k,l=1,2,3; T_{ij}, c_{ijkl}, r_{ki} – тензори напружень, модулів пружності та деформації відповідно.

Деформації в кристалі описуються тензором деформацій r [14]:

$$r = \begin{Vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{Vmatrix}, \quad (3)$$

де r_{ki} – компоненти тензора деформацій:

$$r_{kt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_k} \right), \quad (4)$$

де u_i – компоненти переміщення у вибраній системі координат

Виходячи з (2) виконується рівність:

$$r_{kl} = r_{lkn} \quad (5)$$

За такої симетрії тензора деформацій можна перейти від двоіндексних позначень до одноіндексних:

$$\begin{cases} r_p = r_{kl} & при \;\; k = l;\; p = k \\ r_p = 2r_{kl} & при \;\; k \neq l;\; p = 9 - k - l \end{cases} \quad (6)$$

Сукупність констант (модулів) пружності c_{ijkl} утворює тензор четвертого рангу.

Ґрунтуючись на гіпотезі, що використання зміщених електродів може дозволити поліпшити моночастотність резонаторів, виконано розрахунок поверхневої щільності струму на поверхні кварцового елементу без урахування електродів.

Для цього розглянемо компоненти вектора усунення стоячої хвилі товщинно-зсувного коливання:

$$u_i = A_i \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{h} \cdot y \right) \quad (7)$$

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.

З (4), (6) та (7) отримуємо 6 компонент вектора деформації:

$$\begin{cases} r_1 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_x}{\partial x}; \\ r_2 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\left(\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_y}{\partial y}+\dfrac{n\pi}{h}\cos\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot A_y\right); \\ r_3 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_z}{\partial z}; \\ r_4 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\left(\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_z}{\partial y}+\dfrac{n\pi}{h}\cos\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot A_y+\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_y}{\partial z}\right); \\ r_5 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\left(\dfrac{\partial A_x}{\partial z}+\dfrac{\partial A_z}{\partial x}\right); \\ r_6 = 2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\left(\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_x}{\partial y}+\dfrac{n\pi}{h}\cos\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot A_x+\sin\left(\dfrac{n\pi}{h}\cdot y\right)\cdot\dfrac{\partial A_y}{\partial z}\right). \end{cases} \quad (8)$$

Дивергенція електричної індукції [14]:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = \varepsilon_{ik}\frac{\partial E_k}{\partial x_i} + e_{ip}\frac{\partial r_p}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

Для спрощення розрахунків вважатимемо, що з доданків $\frac{\partial E_k}{\partial x_i}$ не рівний 0 тільки $\frac{\partial E_2}{\partial y}$.

Якщо вираз (9) проінтегрувати по *y*, то вираз для компоненти напруженості E_2 [14] дорівнюватиме:

$$E_2 = -\frac{1}{\varepsilon_{22}}\int e_{ip}\frac{\partial r_p}{\partial x_i}dy - C_1. \quad (10)$$

Напруженість поля, виражена через потенціал, дорівнює [8]:

$$E_2 = -\frac{\partial \varphi_2}{\partial y}. \quad (11)$$

Оскільки, при розрахунку розглядається послідовний резонанс, то різниця потенціалів на двох сторонах коливального елементу дорівнює 0. Таким чином, з (11) при товщині пластини *h* отримуємо:

$$\int_{-h/2}^{h/2} E_2 dy = -\int_{-h/2}^{h/2}\left(\frac{1}{\varepsilon_{22}}\int e_{ip}\frac{\partial r_p}{\partial x_i}dy\right)dy - hC_1 = 0 \quad (12)$$

Підставляючи (10) (11) отримуємо значення C_1 [14]:

$$C_1 = \begin{pmatrix} \dfrac{2h}{\varepsilon_{22}n^2\pi^2}\left(\begin{array}{l}\dfrac{\partial^2\left(e_{11}A_x+e_{16}A_y+e_{15}A_z\right)}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2\left(e_{35}A_x+e_{34}A_y+e_{33}A_z\right)}{\partial z^2}+ \\ \dfrac{\partial^2\left(\left(e_{15}+e_{31}\right)A_x+\left(e_{14}+e_{36}\right)A_y+\left(e_{13}+e_{35}\right)A_z\right)}{\partial x\partial z}\end{array}\right)\cdot\sin(\omega\cdot t) \\ -\dfrac{e_{26}A_x+e_{22}A_y+e_{24}A_z}{h\varepsilon_{22}} \end{pmatrix} \quad (13)$$

У діелектриках існує струм зміщення, густина якого дорівнює:

$$J_2 = \frac{dD_2}{dt} = \frac{d\left(\varepsilon_{22}E_2 + e_{2p}r_p\right)}{dt} = \frac{d\left(-\int e_{ip}\dfrac{\partial r_p}{\partial x_i}dy - \varepsilon_{22}C_1 + e_{2p}r_p\right)}{dt} \quad (14)$$

Оскільки струм зміщення буде присутній на поверхні кварцу, то назвемо його поверхневим. Якщо розгрупувати множники перед e_{ip}, отримаємо значення поверхневої

густини струму:

$$J_i = \omega \cdot e_{ip} \cdot K_{ip} \tag{15}$$

Коефіцієнти K_{ip} є інтегровані по товщині компоненти деформацій, що враховують розподіл амплітуди механічних зсувів по поверхні пластини.

Таким чином, можна обчислити значення струму через резонатор:

$$I_e = \int_{S_e} JdS_e = \omega_0 \int_{S_e} \left(e_{ip} K_{ip} \right) dS_e \tag{16}$$

На основі формул (15), (16) розрахована поверхнева густина струму на поверхні кварцового п'єзоелемента для мод B і C. Результат розрахунку наведено на рисунку 6.

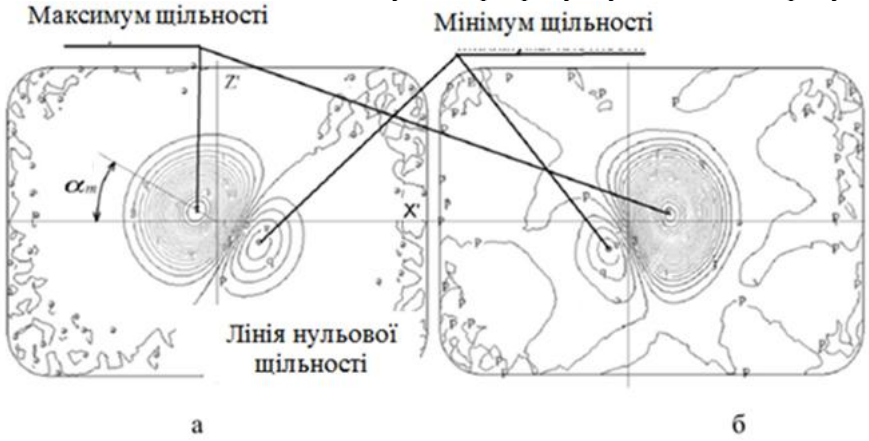


Рисунок 6 – Поверхнева густина струму на поверхні кристалічного елемента для моди C (а) та моди B (б) п'єзоелемента ТД-зрізу з радіусом кривизни 100 мм

З рисунка 6 видно відмінність розподілу поверхневої густини струму на одній і тій же стороні п'єзоелемента для мод B і C, а також відзначено точку максимального і мінімального значення поверхневої густини.

Далі були розраховані поверхневі густини струму на лицьовій та зворотній стороні пластини ТД-зрізу з радіусом кривизни 300 мм, що працює на третій механічній гармоніці та поверхневі густини струму деяких інших конструкцій кристалічних елементів.

Результати розрахунку показали, що характер розподілу поверхневої густини струму на звороті п'єзоелемента симетричний щодо його геометричного центру та має зворотний знак. При роботі на п'ятій та третій гармоніці на лінзових коливальних елементах зрізів ТД, SC, IT є помітний ефект асиметрії розподілу поверхневої густини струму.

Висновки. Результати досліджень показали, що від форми кварцового елемента, номера гармоніки та кута зрізу залежить розташування точки максимуму поверхневої густини, лінії нульової густини струму, розміри позитивних та негативних областей поверхневої густини та їх рівні. Можна зауважити, що радіус кривизни п'єзоелемента мало впливає на кут α.

Аналіз результатів проведеного математичного моделювання коливань кристалічних елементів різних механічних гармонік, кристалографічних орієнтацій та форм показав, що розподіл густини поверхневого струму має зміщення від центру п'єзоелемента, яке зростає зі збільшенням порядку механічної гармоніки та збільшенням кута повороту навколо кристалографічної осі *Z*.

Список використаної літератури

1. Лебедєв О.М. Цифрова схемотехніка: навч. посіб. / О.М. Лебедєв, О.І. Ладик за ред. М.Ю. Ільченка. – К.: Арістей, 2005. – 247с.

2. Многочастотные кварцевые генераторы / А.А. Зеленский, В.Ф. Солодовник, В.А. Шевелев. – Учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию – Харьков: «Харьк. авиац. ин-т», 1999. – 138 с.

3. Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка та мікро схемотехніка: теорія і практикум / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков. – К.: «Каравела», 2003. – 156 с.

4. П'єзорезонансні пристрої. Фізичні принципи роботи, основні параметри та характеристики / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. – Консп. лекцій з курсу «Радіопередавальні пристрої». – Хмельницький: ТУП, – 2003. – 58 с.

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.

5. Поплавко Ю.М. П'єзоелектрики: навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, Ю.І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 328 с. – Бібліогр.: с. 324–325. – 300 пр. ISBN 978-966-622-587-3.

6. Поплавко Ю.М. Физичиские основы пьезоэлоектричества: учеб. пособие / Ю. М. Поплавко, Ю. И. Якименко. – 2-е изд. – К.: Аверс, 1997. – 100 с.

7. Поплавко Ю.М. Фізичне матеріалознавство: в 4 ч. / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, С.О. Воронов, Ю.І. Якименко – Ч. 2. Діелектрики. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 390 с.

8. Рябенький В.М. Цифрова схемотехніка: навч. посіб./ В.М. Рябенький, В.Я. Жуйков, В.Д. Гулий. – Львів: Новий світ, 2009. – 736с.

9. Стахів, П.Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: підручник / П.Г. Стахів, В.І. Коруд, О.Є. Гамола. – Львів: Новий Світ, 2003. – 208 с.

10. Ткачук, В.М. Радіопередавальні пристрої: навчальний посібник / В.М. Ткачук, С.М. Цирульник, Т.А. Петренко. – Вінниця, 2015. – 188 с.

11. Фізика твердого тіла: підручник. В 2-х томах / Ю.М. Поплавко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. – 379 с.

12. Weiss K. Wysokostabilne rezonatory kwarcowe ciecia sc-konstrukcja i technologia. Warszawa: Politech. Warszawskiej, 2003. – 147 s.

13. Lamb J. Anisotropic Acoustic Attenuation with New Measurements for Quartz at Room Temperatures / J. Lamb, J. Richter // Proc. Royal Society (London). – 1996. – P. 479-492.

14. Lepetaev A.N. Numerically-analytical calculation method for vibration amplitude distributions of inharmonic modes of double rotated cuts thickness-shear resonators / A.N. Lepetaev, I.V. Khomenko, A.V. Kosykh // Proceedings of 2007 IEEE Ultrasonics Symposium. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. – P. 1393–1396.

Prystupa S., Moroz S., Tkachuk A., Selepyna Y.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

RESEARCH OF THE SURFACE CURRENT DENSITY IN THE PLATE OF A QUARTZ RESONATOR

The article is dedicated to the important power supply of quartz resonators, which allows to take equal high frequency stability with a simple design of the clocks. The quartz resonators sound at fixed frequencies, however, in some vibrations, the frequency of the quartz resonators is tuned in the songs. No less important for the safety of reliability of robotic quartz resonators in equipment is the correct choice of circuit and the choice of minds and modes of choice, which are based on the known electrical power and features of robotic resonators.

Key words: *generator, resonator, quartz, colivanya, fashion*

© Приступа С.О., Мороз С.А., Ткачук А.А., Селепина Й.Р.

УДК 621.09: 681.5
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-15
Пташенчук В.В., *к.т.н.,* **Денисюк В.Ю.,** *к.т.н.,* **Симонюк В.П.** *к.т.н.*
Луцький національний технічний університет

ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТОРЦЕШЛІФУВАЛЬНИХ АВТОМАТІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ОПЕРАЦІЙНУ ТОЧНІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ПІДШИПНИКОВОЇ СТАЛІ ШХ15

В статті проведено вимірювання теплових деформацій торцешліфувального автомата з метою забезпечення необхідного рівня геометричної точності кілець роликопідшипників та зменшення кількості дефектів в ході виготовлення підшипників кочення.

Оброблення торцевих поверхонь кілець підшипників проводиться із застосуванням потужних електроприводів від 25 до 50 кВт, значна частина електричної енергії перетворюється в теплову та поглинається технологічним обладнанням. Нехтувати таким впливом для забезпечення високої геометричної точності оброблення кілець підшипників, яка характеризується одиницями та десятками мкм неможливо, оскільки тепло розсіюється нерівномірно та потребує кількісної оцінки теплодеформаційної стійкості для коректного налагодження виробничого обладнання з метою забезпечення високої розмірної стійкості оброблюваних заготовок.

Встановлено, що під дією теплових деформації вузлів торцешліфувального автомата абразивні різальні інструменти змінюють своє положення у вертикальній та горизонтальній площинах. Стабілізація положення абразивів має різний часовий діапазон залежно від джерела тепла: від шпиндельних опор – на протязі 2 годин, від змащувально-охолоджувальної рідини – через 5 годин. В загальному балансі теплових деформацій торцешліфувального автомата зміщення шліфувальних кругів, зумовлених зміною температури змащувально-охолоджувальної рідини знаходиться в межах 75-80%. Зміна положення фланців шпинделів торцешліфувального автомата за 5 годин роботи у вертикальній площині склала 59 мкм та є причиною появи непаралельності торців кілець.

Ключові слова: *температура, деформація, вимірювання, точність, підшипник.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

Якість та продуктивність процесу оброблення деталей типу тіл обертання з підшипникової сталі ШХ15 на операціях безцентрового плоского шліфування насамперед, залежить від правильно підібраних режимних параметрів до яких належать глибина та швидкість різання, спосіб та швидкість подачі заготовки в зону оброблення, технічні та конструктивні параметри різального інструменту, склад та спосіб подачі змащувально-охолоджувальної рідини тощо. Однак, навіть при умові раціонального вибору режимних параметрів забезпечити необхідний рівень якості оброблюваних деталей не є можливим без налагодження технологічного обладнання, що включає в себе комплекс дослідницьких, підготовчих та безпосередньо налагоджувальних робіт, які забезпечують якісне виконання заданої технологічної операції. Проте, щоб провести коректне налагодження технологічного обладнання, необхідно знати поведінку його в ході роботи, щоб врахувати усі фактори впливу та забезпечити стабільні параметри якості оброблюваних деталей на протязі усього часу технологічного циклу оброблення.

Результати статистичних досліджень діючого підшипникового виробництва на ПрАТ «СКФ Україна» показали, що шліфувальні операції на двосторонніх торцешліфувальних автоматах супроводжуються значною кількістю бракованих деталей внаслідок похибок оброблення та зниження точності. Зокрема, при аналізі невідповідностей діючого підшипникового виробництва стосовно параметрів геометрії робочих поверхонь роликових підшипників на ПрАТ «СКФ Україна», встановлено, що значна кількість деталей на рівні 7% мають відхилення неперпендикулярності, 5% мають відхилення паралельності торців кілець роликових підшипників. Враховуючи, що торцеві поверхні кілець підшипників є базовими поверхнями при подальшій їх оброці, зокрема доріжок кочення, вони є фактором технологічної спадковості та породжують ряд інших дефектів кілець роликопідшипників (рис.1), зокрема доріжок кочення, що погіршує експлуатаційні властивості підшипників.

© Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П.

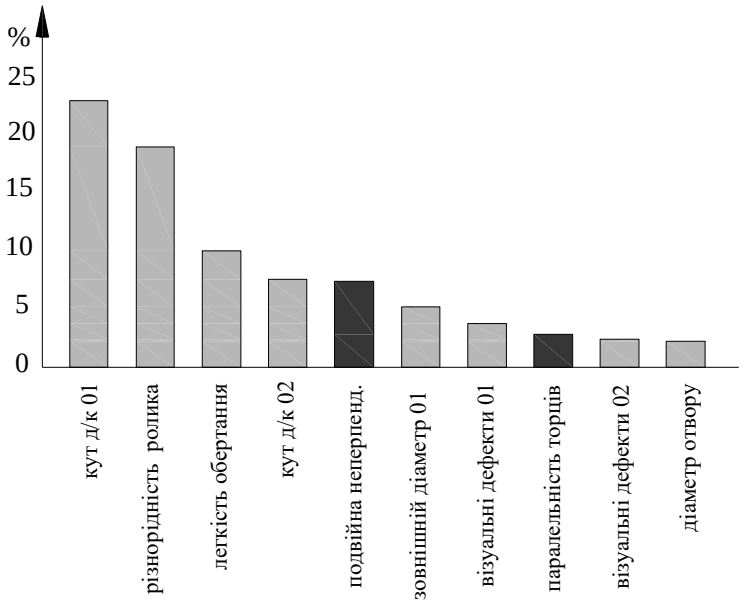


Рис. 1. Гістограма відносних значень невідповідностей геометрії кілець роликопідшипників

Дослідження теплових деформацій торцешліфувальних автоматів дасть можливість проводити налагодження технологічного обладнання до його запуску та в процесі його роботи,забезпечивши тим самим високу геометричну точність кілець підшипників та зменшити кількість бракованих деталей.

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

В працях [1, 2] описано лише вплив сил різання на взаємне розміщення шліфувальних кругів та їх вплив на точність оброблення кілець підшипників. Однак, початкове взаємне положення ріжучого інструменту змінюється за рахунок появи теплових деформацій, що впливає на точність оброблюваних деталей. Питання налагодження технологічного обладнання розглянуто в працях [3, 4, 5], однак в цих роботах розглянуто тільки вплив технологічних факторів на параметри якості. Враховуючи, що оброблення торцевих поверхонь проводиться із застосуванням потужних електроприводів до 50 кВт, значна частина електричної енергії перетворюється в теплову та поглинається технологічним обладнанням. Нехтувати таким впливом на геометричну точність оброблення, яка характеризується одиницями та десятками мкм можна лише за умови рівномірного розсіювання тепла та використання матеріалів технологічного обладнання з однаковим лінійним коефіцієнтом теплового розширення. Забезпечення таких умов є практично неможливим та потребує дослідження впливу нерівномірного розсіювання тепла на деформацію вузлів технологічного обладнання та геомеричну точність оброблюваних деталей.

Мета статті (формулювання цілей статті).

Метою статті є вимірювання теплових деформацій торцешліфувальних автоматів та формулювання рекомендацій для практичного використання під час проведення налагоджувальних робіт з метою забезпечення високої розмірної геометричної стійкості оброблювальних деталей.

Постановка завдання.

Оскільки оброблення торцевих поверхонь кілець роликопідшипників на торцешліфувальних автоматах типу 3344АЕ, СА3М проводиться двома шліфувальними кругами одночасно з використанням потужних електроприводів до 50 кВт та характеризується значною контактною площею різального інструменту з оброблюваною деталлю, то особливу увагу слід зосередити на дослідженні теплових деформацій вузлів верстата, що зумовлені значним тепловиділенням в зоні різання внаслідок безперервності процесу різання та їх вплив на операційну точність двостороннього торцевого шліфування.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

При обробленні кілець підшипників на торцешліфувальних автоматах типу 3344АЕ, СА3М точність деталей залежить в значній мірі окрім технологічних факторів від взаємного розташування абразивних кругів у горизонтальній та вертикальній площинах відповідно. Так,

© Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П.

зокрема, зростання температури змащувально-охолоджувальної рідини на 1ºС при абразивному обробленні кілець Ǿ 90 мм призводить до зростання непаралельності торців на 0,6 – 08 мкм. З практичного досвіду відомо, що температура змащувально-охолоджувальної рідини в процесі оброблення кілець роликопідшипників підвищується на 15 – 20 ºС відповідно інтенсивності та теплонапруженості процесу абразивного оброблення.

Для зменшення неточності форми кілець підшипника, зумовлених тепловими деформаціями вузлів верстата через підвищення температури змащувально-охолоджувальної рідини, необхідно брати до уваги при проведенні налагоджувально-інструментальних робіт зміну положення шліфувальних кругів. Однак, теплові деформації вузлів торцешліфувальних автоматів мають схоластичний характер, а величина їх впливу залежать як від часу роботи так і від режимних параметрів процесу формоутворення кілець підшипників та потребують детальних експериментальних досліджень.

На торцешліфувальних автоматах найбільшими джерелами виділення тепла є підшипники опор та безпосередньо зона абразивного оброблення. Вплив на технологічне обладнання зовнішніх джерел тепла не береться до уваги, оскільки перепад температури в приміщенні знаходиться в межах ±1˚С та має незначний вплив на теплодеформаційну стійкість.

Для знаходження величини впливу на положення різальних інструментів кожного із джерел тепла використано дві схеми теплового навантаження:

- обертання шпинделя торцешліфувального автомата на холостому ходу при якому заміряли зміну розташування абразивних кругів у горизонтальній та вертикальній площині за рахунок тепла утвореного тертям в підшипниках кочення;
- нагрівання змащувально-охолоджувальної рідини з використанням електронагрівача з одночасним обертанням шпинделя торцешліфувального автомата. При цьому швидкість нагрівання змащувально-охолоджувальної рідини електронагрівачем була ідентична швидкості її нагрівання на робочому автоматі в ході оброблення заготовок.

Для експериментальних досліджень було вибрано верстат, у якого швидкість нагрівання шпиндельних опор наближена до середнього значення, отриманого при статистичному обробленні результатів вимірювання температури на 4 верстатах даної моделі. Для зручності проведення досліджень заміряли положення фланців шпинделя, яке визначає положення шліфувальних кругів (останні були зняті). Досліди повторювали не менше 3-х разів при неперервному нагріванні верстата в кожному з них на протязі 5 годин [6, 7, 8].

Характерні точки зміни температури попередньо визначали за допомогою інфрачервоного оптичного термометра Ridgid MicroRay IR-100. Для вимірювання температури в процесі дослідження використовували мідно-константанові термопари, приклеєні до верстата у визначених точках (рис. 2). Покази термопар реєстрували за допомогою мікроамперметра, температуру фланця шпинделя заміряли термометром Ridgid MicroRay IR-100.

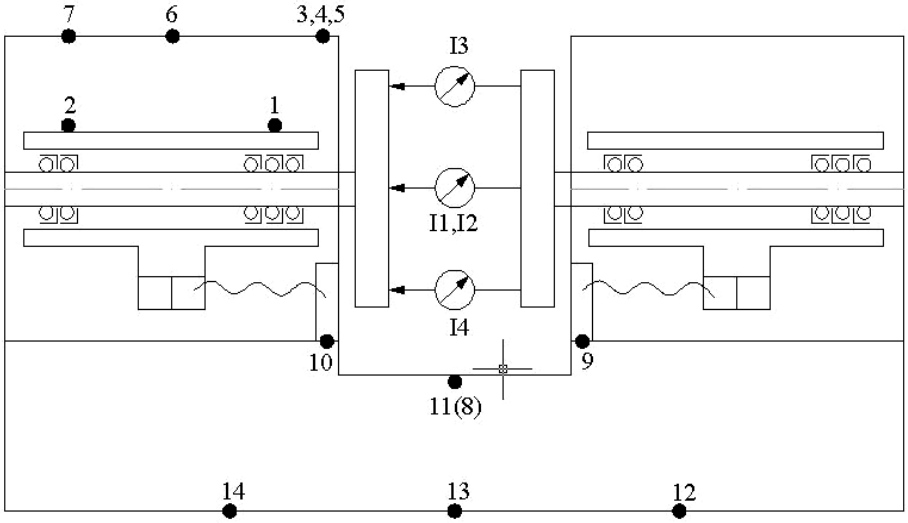


Рис. 2. Схема встановлення термопар (у визначених точках) та індикаторів на торцешліфувальному автоматі з різною віддаленістю від зони оброблення: 1, 2 – на пінолі біля передньої та задньої опор шпинделя; 3, 4, 5 – на передньому торці шліфувальної бабки; 6 – в середній частині корпусу бабки; 7 – на задній стінці бабки; 8 – на задній стінці станини; 9, 10, 11 – в верхній; 12, 13, 14 – в нижній частинах передньої стінки станини; I1 – I4 – індикатори

© Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П.

В якості базового для вимірювання положення досліджуваного шпинделя був прийнятий нерухомий протилежний шпиндель, на фланці якого на відстані 450 мм один від одного кріпились оправки з індикатором типу ІПМ-1 з ціною поділки 0,001 мм. Індикатори І1, І2 розміщували в горизонтальній, а індикатори І3, І4 – в вертикальній площинах.

Характер зміни температури вузлів торцешліфувального автомата залежно від часу нагрівання наведено на рисунку 3. Температура пінолі в зоні розташування передньої опори шпинделя (точка 1) склала 53˚С, фланця шпинделя – 48˚С (рис. 3). Швидкість зростання температури фланця шпинделя торцешліфувального автомата є меншою ніж опори, що пояснюється його більшою віддаленістю від зони теплоутворення. Температура пінолі в зоні розташування задньої опори (точка 2) шпинделя склала 32˚С завдяки меншому натягу в підшипникових вузлах та більшій відстані до зони оброблення. Температура корпусу шпиндельної бабки в точках 3, 4, 5 визначається надлишковою температурою зони розташування передньої опори, в точці 7 – надлишковою температурою зони розташування задньої опори шпинделя. Температура корпусу торцешліфувального автомата при цій схемі теплового навантаження залишається постійною.

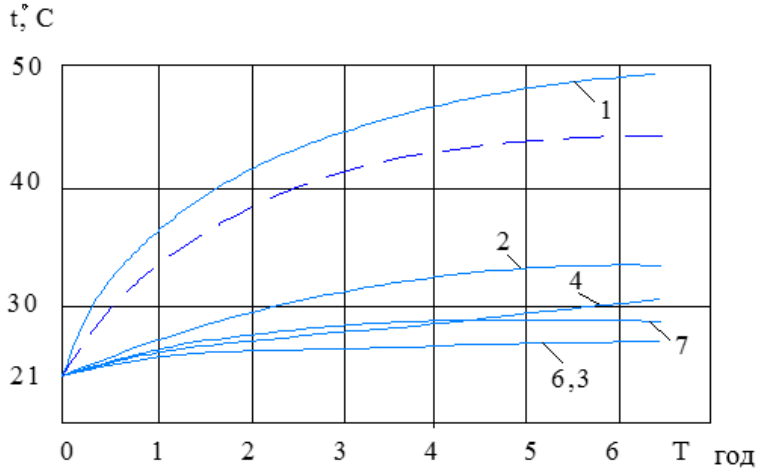


Рис. 3. Зміна температури пінолі та бабки верстата: номера кривих відповідають номерам точок на вимірювальній схемі рис. 2; штрихова лінія – температура фланця шпинделя

Відстань між фланцями шпинделів автомата виміряної індикатором І1 у вертикальній площині зростає та за 5 годин роботи автомата зміна відстані склала 10 мкм, при цьому положення фланців шпинделів в горизонтальній площині залишилось незмінним.

За другою схемою теплового навантаження торцешліфувального автомата надлишкову температуру має станина, причому після 5-ти годин її нагрівання температура розподілу має вигляд: $t_{12} = t_{13} = t_{14} = t_{пов.} = 21°C$; $t_8 = t_9 = t_{10} = 25°C$; $t_{11} = 34°C$, що характеризує локальне прогрівання станини, яке характерне лише верхній частині та зумовлене тепловою дією змащувально-охолоджувальної рідини. При цьому зміна положення фланців шпинделів торцешліфувального автомата за 5 годин роботи у вертикальній площині становило 39 мкм, в горизонтальній – 10 мкм, а температура змащувально-охолоджувальної рідини підвищилась на 17˚С (з 23 до 40 ˚С). Якщо врахувати сумарний вплив двох зон нагрівання на протязі 5 годин роботи торцешліфувального автомат то зміщення кругів складе: Δ=39+10+10=59 мкм.

Висновки. Встановлено, що під дією теплових деформації вузлів торцешліфувального автомата абразивні різальні інструменти змінюють своє положення у вертикальній та горизонтальній площинах. Стабілізація положення абразивів має різний часовий діапазон залежно від джерела тепла: від шпиндельних опор – на протязі 2 годин, від змащувально-охолоджувальної рідини – через 5 годин. В загальному балансі теплових деформацій торцешліфувального автомата зміщення шліфувальних кругів, зумовлених зміною температури змащувально-охолоджувальної рідини знаходиться в межах 75 – 80%. Зміна положення фланців шпинделів торцешліфувального автомата за 5 годин роботи у вертикальній площині склала 59 мкм та є причиною появи непаралельності торців кілець. Інші деформації вузлів торцешліфувального автомата зумовлені підвищенням температури в підшипникових вузлах мають несуттєвий вплив на точність оброблення та можуть не братись до уваги.

© Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П.

Список використаної літератури

1. Якімов А.А. Технологічні основи забезпечення та стабізізації якості поверхневого шару при шлифованні / А. Якимов. Одесса, 2005. – 411 с.
2. Якімов О. В. Технологія машино- та приладобудування / О.В. Якімов, В.І. Марчук, П.А. Лінчевський, О.О. Якімов, В.П. Ларшин, Луцьк, 2005 – 710 с.
3. Пташенчук В.В. Технологічні фактори впливу на операційну точність та теплонапруженість процесу плоского шліфування торцевих поверхонь кілець роликопідшипників / В.І, Марчук, В. В. Пташенчук // Вісник СевНТУ: машинобудування та транспорт. – Севастополь, 2010. –№ 107. – С. 144 – 147.
4. Пташенчук В.В. Підвищення продуктивності та точності процесу торцешліфування за рахунок вибору раціональної структури різального інструменту / В.І. Марчук, В.В. Пташенчук // Вісник Сумського державного технічного університету. Серія Технічні Науки. Науковий журнал. – Суми, 2010. – № 4. – С. 37 – 42.
5. Пташенчук В. В. Підвищення ефективності процесу шліфування торців кілець роликопідшипників / В.І, Марчук, В.В. Пташенчук // Європрилад-2010: тенденції розвитку та перспективи. – Луцьк: ЛНТУ, 2010. – С.50 – 55.
6. Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Пташенчук В.В. Про експериментальні дослідження впливу теплових деформацій на якість кілець підшипників при шліфуванні / Матеріали XVIII-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, 29 червня – 1 липня 2017 р. Київ: 2017. – С. 320–322.
7. Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Заблоцький В.Ю., Захарчук Д.А. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликопідшипників методом переривчастого шліфування: монографія. – Луцьк: Вежа-Друк, 2017. – 128 с.
8. Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Пташенчук В.В. До балансування переривчастого абразивного інструменту на торцешліфувальних автоматах / Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу» 12 – 17 вересня 2017 року. Випуск 3. Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 127 – 129.

V. Ptashenchuk, V. Denysiuk, V. Symonyuk
Lutsk National Technical University

MEASUREMENT OF THERMAL DEFORMATIONS OF AUTOMATIC FACE GRINDERS AND THEIR INFLUENCE ON THE OPERATIONAL ACCURACY OF BEARING STEEL PROCESSING SHH15

The article measures the thermal deformations of the face grinding machine in order to ensure the required level of geometric accuracy of roller bearing rings and reduce the number of defects during the production of rolling bearings. The end surfaces of the bearing rings are treated using powerful electric drives from 25 to 50 kW, a significant part of the electrical energy is converted into heat and absorbed by the technological equipment. It is impossible to neglect such an influence in order to ensure high geometric accuracy of processing bearing rings, which is characterized by units and tens of microns, because heat is dispersed unevenly and requires a quantitative assessment of thermal deformation resistance for the correct adjustment of production equipment in order to ensure high dimensional stability of the processed workpieces.

It was established that under the action of thermal deformations of the units of the face grinding machine, the abrasive cutting tools change their position in the vertical and horizontal planes. Stabilization of the position of the abrasives has a different time range depending on the heat source: from spindle supports - within 2 hours, from lubricating and cooling liquid - after 5 hours. In the general balance of thermal deformations of the face grinding machine, the displacement of the grinding wheels caused by the change in the temperature of the lubricating and cooling liquid is within 75-80%. The change in the position of the flanges of the spindles of the face grinding machine during 5 hours of work in the vertical plane amounted to 59 μm and is the reason for the non-parallelism of the ends of the rings.

Key words: *temperature, deformation, measurement, accuracy, bearing.*

© Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П.

УДК 621.317
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-16
[1]Сахновський М.Ю., *д.т.н,.* **[1]Домініков М.М.,** *к.ф-м.н.,* **[1]Стринадко М.Т.,** *к.ф-м.н.,*
[2]Тимочко Б.М., *к.ф-м.н.*
[1]Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна
[2]Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ ПЛОСКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

В роботі досліджуються критичні кути падіння поляризованого світла на плоску діелектричну поверхню середовища, при яких спостерігається ідентичність станів поляризації падаючого та відбитого оптичного випромінювання. Показано, що такі критичні кути падіння (критичні поляризаційні кути падіння) забезпечують умови для однакових фазових затримок S і P компонент у падаючому та відбитому світлі.
Ключові слова:*поляризація, еліпсометрія.*

Постановка проблеми. Дослідження границі розділу оптичних середовищ є актуальною задачею оскільки вона використовується для вводу - виводу випромінювання в речовину, для його вимірювання, обробки, зміну стану поляризації, тощо. Робота присвячена дослідженню зміни стану поляризації відбитого від границі розділу середовища з показником заломлення "n" та повітря.Для спрощення розрахунків вибирається модель оптично товстого середовища мало поглинаючого випромінювання діелектрика з обмеженою полірованими паралельними пластинами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливість дослідження поляризаційних властивостей поверхні об'єктів полягає в тому, що, в ідеалі, елементи оптичної вимірюючої системи не змінюють поляризації падаючого на них пучка [1,3].

Це легко реалізувати для дзеркальних оптичних систем з металічними оптичними елементами. Однак в більшості випадків вимірюючі системи містять певні діелектричні елементи, які змінюють поляризацію пучка аналізу [2]. Тому актуальною є задача дослідження умов вимірювання при яких в процесі вимірювання поляризація пучка аналізу не змінюється.

Мета роботи полягає у встановленні сукупності умов опромінення діелектричної поверхні з відомими оптичними характеристиками, при яких відбитий промінь повністю відновлює поляризацію падаючого.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо особливості взаємодії поляризованого випромінювання з плоскою границею розділу.

Розглянемо випадок, коли на границі розділу виконується умова $1 = n_1 < n_2 = n$. Як відомо, в ізотропному діелектрику з діелектричною проникливістю "ε" можуть розповсюджуватись плоскі електромагнітні хвилі [1]

$$E^P\left(r^p, t\right) = E_0^p e^{i\left(\omega t - k^p r^p\right)} \tag{1}$$

де E_0^P - комплексна амплітуда, а ω та k зв'язані дисперсійним співвідношенням

$$k = \frac{\omega}{c} n \tag{2}$$

де c – швидкість світла у вакуумі, $n = \sqrt{\varepsilon}$ – показник заломлення.

Нехай плоска, лінійно поляризована хвиля, що описується виразом

$$E_1^P\left(r^p, t\right) = E_{01}^p e^{i\left(\omega t - k^p r^p\right)} \tag{3}$$

падає на плоску границю розділу середовищ, з показниками заломлення $n_1 = 1$ та $n_2 = n$ під кутом θ_1 (кут між k^P та нормаллю) до границі розділу.

В силу неперервності тангенціальних складових E^P, на границі розділу виникають два відомі співвідношення: $\theta_1 = \theta_2$ – закон відбивання світла (θ_2 кут відбитого променю) та $n_1 Sin\theta_1 = nSin\theta_3$ - закон Снеліуса, закон заломлення світла. (θ_3 - кут заломлення світла).

© Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Відношення амплітуд падаючої хвилі E_1^P відбитої E_2^P та заломленої E_3^P хвилі описується відомими [1] формулами Френеля, та повністю визначаються кутом падіння θ_1. Відбитий та заломлений промінь має стан поляризації відмінний від поляризації падаючого випромінювання. Це пояснюється фазовими затримками на границі розділу, причому фаза заломленого променю E_3^P співпадає з фазою падаючого. А для відбитого променю фази E_1^S та E_2^S відрізняються на π при довільних θ_1 а фази E_1^P та E_2^P на π при $0 \le \theta_1 \le \theta_{Br}$ (кут Брюстера) і співпадають при $\theta_1 \ge \theta_{Br}$, причому при куті $\theta_1 = \theta_{Br}$ P – компонента поляризації падаючого випромінювання поверхнею не відбивається.

Отже поверхня розділу середовищ з заданими показниками заломлення характеризується критичним кутом Брюстера [2]

$$\theta_{кр1} = arctg\frac{n}{1} = \theta_{Br} \tag{4}$$

Розглянемо випадок, коли на границі розділу виконується умова $n = n_1 > n_2 = 1$. Якщо світло, електромагнітна хвиля, падає на границю розділу з оптично більш густого середовища в менш густе виникає граничний кут повного внутрішнього відбивання

$$\theta_{кр2} = arcSinn_{1,2} \tag{5}$$

де $n_{1,2} = \frac{1}{n}$.

Тобто поверхня розділу середовищ характеризується критичним кутом $\theta_{кр2}$ повного внутрішнього відбивання. При $\theta_1 > \theta_{кр2}$ заломлений промінь відсутній, рівняння (4) на θ_3 має лише уявний розв'язок $Cos\theta_3 = \pm i\sqrt{n^2 Sin\theta_1 - 1}$.

Як показав детальний аналіз, електромагнітне поле, що виходить за межі плоско-паралельного діелектрика, розповсюджується вздовж його поверхні розділу і експоненціально спадає при віддалені від даної поверхні [2].

Поляризація відбитого променю $E_2^P\left(R^s, R^p\right)$ пов'язана з поляризацією падаючого $E_1^P\left(A^s, A^p\right)$ комплексними співвідношеннями Френеля [1]

$$R^S = \frac{n_{1,2}^2 - Cos\theta_1 - i\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}}{n_{1,2}^2 - Cos\theta_1 + i\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}} A^S$$

$$R^P = \frac{Cos\theta_1 - i\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}}{Cos\theta_1 + i\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}} A^P \tag{6}$$

Виділивши у (6) дійсну та уявну частину легко показати, що $\left|R^S\right| = \left|A^S\right|$ та $\left|R^P\right| = \left|A^P\right|$ тобто виконується закон збереження енергії, однак змінюється фаза відбитого променю з S та P поляризацією в порівнянні з фазою падаючого випромінювання на величину

$$\Psi_S(\theta_1) = arctg\frac{2n_{1,2}^2 Cos\theta_1\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}}{n_{1,2}^4 Cos^2\theta_1 + Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2} \tag{7}$$

для S поляризації, та

$$\Psi_P(\theta_1) = arctg\frac{2Cos\theta_1\sqrt{Sin^2\theta_1 - n_{1,2}^2}}{1 - n_{1,2}^2} \tag{8}$$

для P поляризації відповідно.

Тобто лінійно поляризоване випромінювання стає еліптично поляризованим після одного відбивання від поверхні розділу середовищ. Не змінюється стан поляризації лише у випадку коли падаюче випромінювання має або тільки S або тільки P поляризацію [4].

© Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Залежність фазової затримки від кута падіння для *S* та *P* складових поляризованого випромінювання наведена на рис.1.

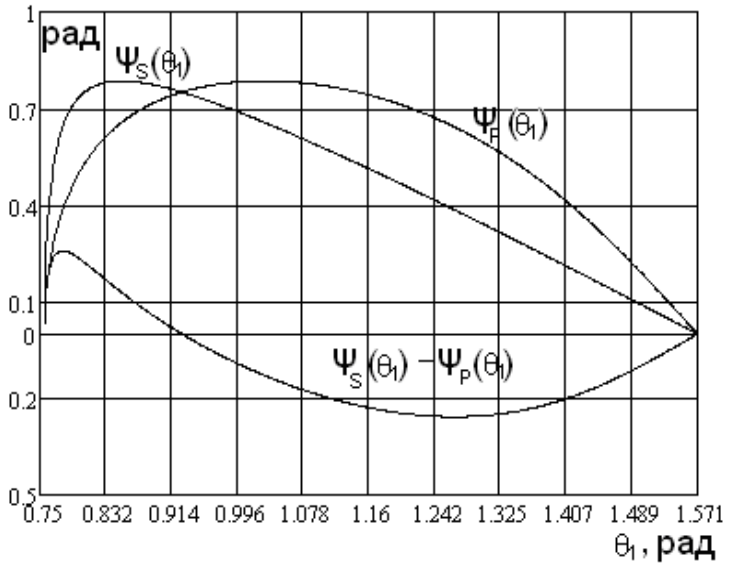


Рис.1. Залежність фазових затримок Ψ_S та Ψ_P від кута падіння θ_1 для плавленого кварцу.

Із рис.1 слідує, що для кута падіння

$$\theta_1 = \theta_{кр3} = arcSin\sqrt{\frac{2n_{1,2}^2}{1+n_{1,2}^2}} \tag{9}$$

$\Psi_S = \Psi_P$ і , відповідно, стан поляризації відбитого випромінювання повністю співпадає з поляризацією падаючого. Для плавленого кварцу з *n*= 1.4579 $\theta_{кр3} = 53.113^0$. При кутах $\theta_1 \neq \theta_{кр3}$ стан поляризації змінюється при кожному відбиванні від поверхні розділу середовищ, і стає, взагалі кажучи, еліптично поляризованим, причому для кутів $\theta_{кр2} < \theta_1 < \theta_{кр3}$ реалізується ліво-циркулярна а при $\theta_1 > \theta_{кр3}$ -право-циркулярна поляризація.

Отже границя розділу середовищ визначається критичним поляризаційним кутом $\theta_{кр3}$, при якому довільне число відбивань не призводить до зміни стану поляризації.

Управління станом поляризації за допомогою контрольованої зміни довжини діелектрика. Однак реалізувати на практиці абсолютно плоско-паралельні границі розділу середовищ не представляється можливим то виникає запитання: чи можливо, в принципі, відновити початковий стан поляризації хоча б для великої множини значень кутів θ_1? Оскільки при кожному відбиванні від границі міняються фазові затримки то, очевидно, що стан поляризації періодично змінюється в залежності від віддалі, що проходить світло в діелектричні пластині. Тобто змінюючи довжину діелектричної пластинки в рамках одного періоду, виконуючи контрольовану зміну кількості відбивань від поверхні можна досягти повного відновлення поляризації світла. Виявляється, що таке відновлення можливе лише у випадку, коли різниця набігу фаз між *P* та *S* компонентами буде кратна 2π.

Характерний графік залежності кількості відбивань променів від дискретного набору кутів падіння зображено на рис.2 та рис.3

© Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

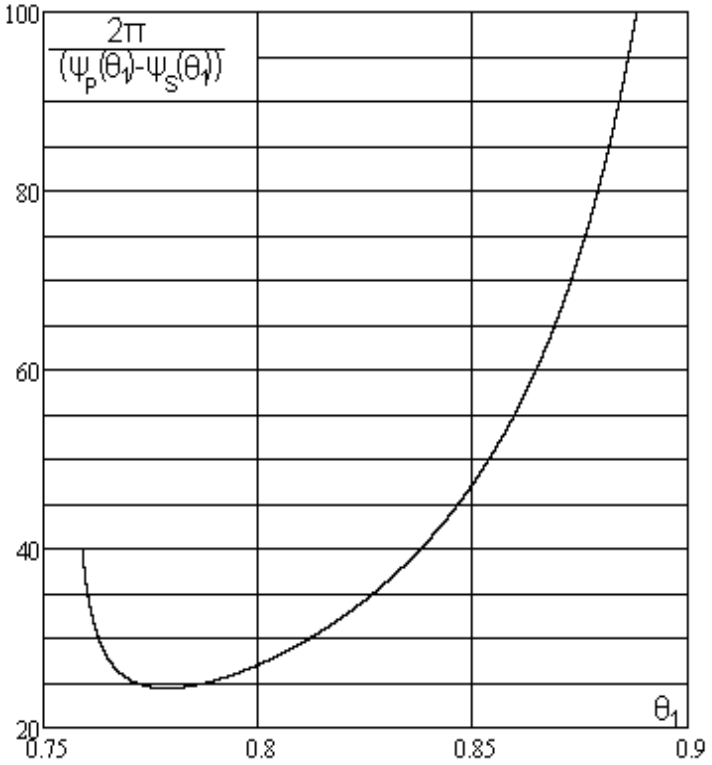


Рис.2. Залежність кількості відбивань випромінювання від θ_1, що забезпечують повне відновлення поляризації при $\theta_{кр2} < \theta_1 < \theta_{кр3}$

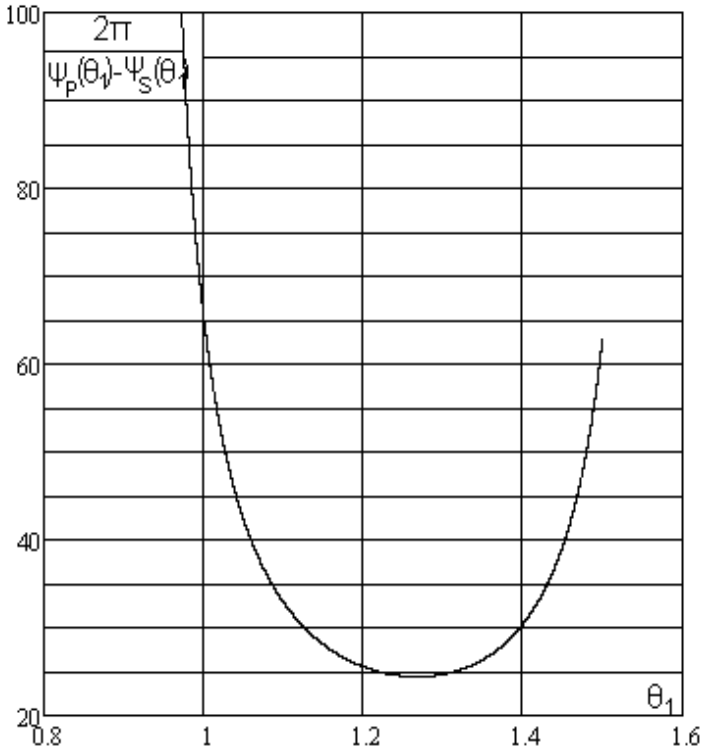


Рис.3. Залежність кількості відбивань випромінювання від θ_1, що забезпечують повне відновлення поляризації при $\theta_1 > \theta_{кр3}$

Із Рис.2.та Рис.3. слідує, що існує великий дискретний набір кутів падіння на поверхню діелектрика при яких можна відновити стан поляризації. Для діелектричної пластинки товщиною порядку 1мм. існує технічна можливість відновити стан поляризації.

© Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

Отже, при незначних деформаціях поверхні плоско-паралельної діелектричної пластинки, при довільному куті падіння та стану поляризації, шляхом підбору довжини діелектричної пластинки в рамках одного періоду зміни стану поляризації, можна відновити поляризацію початкового поля.

Висновки. Поверхня розділу середовищ повністю визначається показником заломлення *n* а поляризаційні характеристики відбитого випромінювання кутом Брюстера та критичним поляризаційним кутом $\theta_{кр3} = arcSin\sqrt{\frac{2n_{1,2}^2}{1+n_{1,2}^2}}$.

Стан поляризації поля, що розповсюджується по плоско-паралельній діелектричній пластинці періодично змінюється,що дозволяє, при необхідності, відновлювати довільний початковий стан поляризації, шляхом контрольованої зміни геометричних розмірів пластинки.

Інформаційні джерела

1. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 426 с.

2. Hinrichs K., Eichhorn K. J. (ed.). Ellipsometry of functional organic surfaces and films. – Springer, 2018. – Т. 52.

3.Романюк М. О., Крочук А. С., Пашук І. П. Оптика. — Л. : ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. — 564 с.

4. Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. — 7th ed. — CUP, 1999. — 952 p. — ISBN 0-521-64222-1

[1]Sakhnovskyj M.Yu., [1]Dominikov M.M.,[1]StrinadkoM.T., [2]TymochkoB.M.
[1]Chernivtsi NationalUniversity, Chernivtsi, Ukraine
[2]Bukovinian StateMedicalUniversity, Chernivtsi, Ukraine

FEATURES OF THE INTERACTION OF POLARIZED RADIATION WITH A FLAT DIELECTRIC SURFACE

The work examines the critical angles of incidence of polarized light on a flat dielectric surface of the medium, at which the identity of the polarization states of the incident and reflected optical radiation is observed. It is shown that such critical angles of incidence (critical polarization angles of incidence) provide conditions for the same phase delays of S and P components in incident and reflected light.

***Keywords*:** *polarization, ellipsometry.*

© Сахновський М.Ю., Домініков М.М., Стринадко М.Т., Тимочко Б.М.

УДК 620.3; 621.7; 62-93; 615.4; 616-78; 681.1
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-17
Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.
Луцький національний технічний університет

ДО АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ

У даній статті розглядаються сучасні технічні досягнення в галузі мікро- та наносистемної техніки, матеріалів і програмного забезпечення які відкрили можливість 3D-друку за технологією SLS різних галузей, особливо при виготовленні невеликих за розміром та крихких по структурі деталей мікро- та наносистемної техніки. Виявлено, що порівняно з інструментами, необхідними для створення одиничних або короткострокових деталей та прототипів на замовлення за допомогою лиття під тиском, 3D-друк SLS виявляється більш доступним рішенням. Також, запропоновано вдосконалити робочий прилад шляхом використання магнітного поля. Магнітне поле малої сили буде використовуватись для закріплення і утримування часток металічного порошку.

Ключові слова: *3D-друк, сипучий порошок, магнітне поле, крихкі деталі, мікро- та наносистемна техніка, частки металічного порошку, біомедичні матеріали SLS.*

Постановка проблеми. Відомий своєю здатністю неймовірно швидко створювати деталі інженерного класу з відмінними механічними властивостями та високою роздільною здатністю, 3D-друк SLS (селективне лазерне спікання) - це те, до чого звертаються інженери та промислові дизайнери для швидкого створення функціональних прототипів та деталей кінцевого використання.

Останні досягнення в галузі техніки, матеріалів і програмного забезпечення відкрили можливість друку за технологією SLS ширшому колу компаній. Раніше такі інструменти використовувалися лише в кількох високотехнологічних галузях.

Розвиток технологій зробив SLS-принтери більш доступними та компактними. Ще не так давно всі SLS-принтери були громіздкими і дорогими. Зараз на ринку є велика кількість зручних для офісу настільних SLS 3D-принтерів, і навіть машини промислового розміру стали менш дорогими в порівнянні з традиційними методами виробництва.

3D-друк SLS може створювати деталі, які одночасно є відносно дрібними, міцними, довговічними, термостійкими та гнучкими.

SLS також пропонує високий ступінь передбачуваності матеріальних і механічних властивостей, тому він популярний в аерокосмічній, медичній та регульованих галузях промисловості. Крім того, SLS-друк здебільшого не потребує підтримки, що розширює можливості проектування та виробництва дуже складних геометричних форм.

Ця технологія популярна для функціональних прототипів, моделей оцінки дизайну, невеликих виробничих циклів, споживчих товарів кінцевого використання та тестування продукції, серед інших застосувань.

Селективне лазерне спікання – це метод плавлення порошкового шару з використанням потужного лазера для вибіркового спікання (не плавлення) частинок полімерного порошку, з'єднуючи їх разом за допомогою тепла і тиску пошарово, поки не буде виготовлений 3D-макет чи готовий виріб.

Процес виготовлення починається з нагрівання бункера для порошку і робочої зони до температури трохи нижче температури плавлення полімеру. Лезо для нанесення покриття розподіляє тонкий шар порошку по робочій платформі. Потім лазер (або лазери) сканує контур наступного шару і розплює частинки порошку. Щоб переконатися, що деталь повністю суцільна, сканується весь поперечний переріз потрібного компонента. Після того, як шар завершений, платформа переміщається вниз, і лезо повторно покриває поверхню чистим шаром порошку. Цей процес повторюється до тих пір, поки деталь або деталі не будуть завершені.

SLS 3D друк на сьогоднішній день більш широко використовується, але це не досконала технологія. Незважаючи на свої досягнення, SLS-друк все ще залишається відносно дорогим, а робота з порошком може бути брудною, якщо робити це вручну (хоча деякі постачальники пропонують закриті рішення). Позитивним моментом є те, що більша частина сипучого

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

порошку може бути перероблена, що знижує матеріальні витрати і робить SLS більш стійкою технологією, ніж лиття під тиском або механічна обробка.

Після завершення процесу друку виконується значна кількість постобробки. Контейнер повинен охолонути, перш ніж деталь можна буде витягти, і цей процес охолодження може зайняти кілька годин.

Після того, як деталь виймається з камери спікання, вона очищається щіткою, станцією стисненого повітря або іншим способом. Сипучий порошок, що залишився після процесу друку, може бути зібраний і перероблений під час наступного завдання друку.

При правильному використанні SLS 3D-друк має ряд переваг в порівнянні з іншими цифровими технологіями виробництва. Те, чи підходить ця технологія для конкретних потреб у створенні прототипів або виробництві, залежить від застосування, конструкції деталі та необхідного матеріалу.

До недоліків даного виробництва варто віднести і той факт, що не всі SLS-принтери можуть друкувати усіма існуючими SLS-матеріалами.

Постановка завдання та аналіз стану. Враховуючи переваги, недоліки, широку гаму застосовуваних матеріалів, обладнання, способів та засобів виробництва є необхідність у проведенні аналізу всіх існуючих факторів впливу на якість та продуктивність продукції.

Деякі SLS-принтери можуть друкувати лише двома найпоширенішими матеріалами (PA 12 і PA 11), тоді як інші можуть друкувати набагато більшою кількістю матеріалів. Деякі принтери мають лазери, недостатньо потужні для певних матеріалів, тоді як багато виробників пропонують матеріали, які були спеціально розроблені для найкращого друку на їхніх принтерах.

Завжди потрібно з'ясовувати у виробника принтера, які матеріали схвалено для використання, оскільки, хоча деякі матеріали можуть працювати, відбиток може не мати обіцяної міцності або гнучкості, якщо він не надрукований на схваленій машині.

Принтер SLS з відкритою системою матеріалів може виробляти якісні деталі з широкого спектру матеріалів, що поставляються настільки ж широким спектром виробників. Машина SLS із закритою системою схвалена для використання тільки матеріалів, рекомендованих одним виробником (зазвичай виробником принтера). Як правило, відбитки SLS мають матову, шорстку поверхню, яку можна згладити за допомогою постобробки.

Нижче наведено огляд найбільш популярних матеріалів для 3D-друку SLS, які використовуються сьогодні (хоча є й інші).

PA 12. Міцні деталі з довготривалою стабільністю та мінімальним водопоглинанням, що робить його ідеальним для функціональних прототипів та деталей кінцевого використання. Деякі матеріали PA 12 є біосумісними та безпечними для харчових продуктів за певних умов.

PA 11. Хоча механічні властивості можна порівняти з PA 12, PA 11 пропонує поліпшену термічну і хімічну стійкість і вищу еластичність, ніж PA 12, а також повністю ізотропну поведінку. PA 11 також залишається стабільним під впливом світла, ультрафіолету і погодних умов. PA 11 зазвичай має менший вплив на навколишнє середовище, оскільки виготовляється з відновлюваної сировини, отриманої з рослинної олії. Зазвичай він поставляється у вигляді дрібного чорного порошку.

TPU. Як гнучкий і міцний матеріал, порошки TPU ідеально підходять для прототипів і деталей кінцевого використання, які вимагають еластичності. Цей термопластичний еластомер пропонує гумоподібну гнучкість і високий ступінь функціональності. Матеріали TPU, як правило, стійкі до зносу і мають високоякісну обробку поверхні та деталей. Поширені сфери застосування включають ущільнення, прокладки, шланги, ручки та іграшки.

PA 12 CF (нейлон, наповнений вуглецевим волокном). У випадку з цими порошками наповнення відноситься до нейлонового порошку, який "змішується" з добавками для підвищення загальних механічних властивостей 3D-друкованої деталі. Нейлон, наповнений вуглецевим волокном, пропонує виняткове співвідношення ваги до міцності та жорсткості. Однак він має тенденцію до високої анізотропії, що означає те, що властивості матеріалу будуть змінюватися в залежності від орієнтації деталі під час друку.

PA 12 – GF (склонаповнений нейлон). Для деталей з високою міцністю на розрив і стійкістю до зносу і температури, склонаповнений нейлон став життєздатним варіантом. Ці матеріали, як правило, містять від 10% до 40% скляного порошку, кількість якого впливає на міцність і крихкість кінцевої деталі.

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

Алюмідний (алюмінієво-наповнений нейлон) поліамідний порошок також може бути змішаний з алюмінієвим порошком для створення матеріалу для 3D-друку SLS, який має металевий вигляд і високий ступінь жорсткості. Цей матеріал може бути використаний для виробництва непористих компонентів, які стійкі до високих температур і легко піддаються механічній обробці. Алюмінієнаповнений нейлон добре підходить для автомобільних деталей, випробувань в аеродинамічній трубі, невеликих виробничих циклів тощо.

Біомедичні матеріали SLS для біомедичних застосувань, включаючи тимчасові імплантати і для заміни трупних матеріалів, доступні від різних виробників, таких як FibreTuff. Цей кісткоподібний матеріал має рентгеноконтрастність, відмінну фіксацію гвинтів, а також здатність до пиляння та різання.

Виклад основного матеріалу. Варто розглянути технологію виготовлення деталей із мікропорошків на приладі мікро- та наносистемної техніки, а саме, принтері Fuse 1.

Перший промисловий 3D-принтер з технологією SLS для майстерень. Як і в разі інших технологій 3D-друку, як-от моделювання методом наплавлення (FDM) і стереолітографія (SLA), нещодавно на ринку почали з'являтися більш доступні, компактні системи з технологією SLS. Однак ці рішення мали значні недоліки. Серед них низька якість моделей і складні процеси роботи вручну через брак рішень для постобробки. Це сильно обмежувало їх застосування в промисловому виробництві.

Принтер Fuse 1 компанії Formlabs належить до нової категорії, в якій зазначені недоліки усунуто. Це перший промисловий 3D-принтер з технологією SLS для майстерень, який забезпечує високу якість, має компактні розміри, спрощує весь робочий процес і коштує набагато дешевше традиційних промислових систем аналогічного типу.

У Fuse 1 використовується один лазер, і в нього менш об'ємна робоча камера, що вимагає меншого нагрівання. Порошок піддається впливу підвищених температур протягом коротшого періоду часу, тому немає необхідності в інертних газах і спеціалізованому вентиляційному обладнанні. Завдяки меншому енергоспоживанню він може працювати від стандартного джерела живлення змінного струму, не вимагаючи спеціальної інфраструктури.

У принтері Fuse 1 реалізовано технологію Surface Armor, на яку очікується видача патенту. Завдяки їй створюється напівзіпріла оболонка, що забезпечує рівномірне нагрівання області навколо моделей у міру їхнього друку. Це дає змогу домогтися чудової якості поверхні, стабільних механічних властивостей, високої надійності та високого коефіцієнта оновлення матеріалу.

Крім того, щоб забезпечити компактну, самодостатню екосистему і можливість комплексної обробки порошку, Fuse 1 доповнюється станцією Fuse Sift - окремим автономним пристроєм для витягання моделей, відновлення, зберігання і змішування порошку.

Загалом, промисловий 3D-принтер Fuse 1 з технологією SLS для майстерень вирізняється дещо меншим об'ємом друку, як порівняти з традиційними SLS-системами початкового рівня, але водночас є більш компактним, спрощує робочий процес і коштує дешевше.

Найпоширеніший матеріал для технології SLS - це нейлон. Це високоефективний інженерний термопластик як для функціонального прототипування, так і для виготовлення виробів для кінцевого використання. Нейлон ідеально підходить для виробництва складних вузлів і міцних моделей з високою стійкістю до впливу навколишнього середовища.

3D-моделі, надруковані з нейлону за технологією SLS, мають міцність, жорсткість і довговічність. Кінцеві моделі вирізняються ударостійкістю і високою зносостійкістю. Нейлон стійкий до впливу ультрафіолету, світла, тепла, вологи, розчинників, температури і води. Нейлонові моделі, надруковані на 3D-принтері, також біосумісні і не викликають алергічних реакцій. Це означає, що їх можна носити і безпечно використовувати в багатьох ситуаціях.

У 2021 році Formlabs вийшла на новий ринок, випустивши Fuse 1, перший 3D-принтер компанії з селективним лазерним друком (SLS). Fuse 1, створений в результаті більш ніж семирічних досліджень і розробок, був представлений на ринку як перший в світі настільний SLS-принтер промислового класу, що поєднує в собі високу продуктивність і компактні розміри.

Система призначена для інженерів, дизайнерів і виробників, які прагнуть створювати функціональні прототипи і виробляти полімери для кінцевого використання - і все це за частку вартості традиційних SLS-конкурентів.

Однією з найбільш вражаючих особливостей Fuse 1 є його компактна рама. У порівнянні з іншими SLS 3D-принтерами, система дуже компактна і має розміри всього 645 x 685 x 1070

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

мм (1655 мм у висоту з підставкою). Вона також відносно легка, важить 114 кг без робочої камери та порошку. Як результат, Fuse 1, швидше за все, буде відчувати себе як вдома практично в будь-якій переповненій майстерні і є досить портативним, щоб пересуватися без особливих зусиль.

Машина має суцільнометалеве шасі з одними дверима спереду, що забезпечують доступ до робочої зони. Закрита робоча камера може нагріватися до 200°C і навіть оснащена змінним фільтром HEPA з активним вугіллям для безпечної роботи в приміщенні. У цьому випадку наявність камери з підігрівом має вирішальне значення, коли мова йде про те, щоб уникнути проблем зі стисненням матеріалу, гарантуючи, що деталі не деформуються під час друку.

Formlabs оснастив Fuse 1 робочим об'ємом 165 x 165 x 300 мм, що означає, що користувачі мають 8,17 л робочого простору для роботи. Бак для порошку, або бункер, має максимальне навантаження 8,5 кг, що є достатньою ємністю для порошку для наданого робочого об'єму. Крім того, робоча камера є модульною, тобто її можна повністю зняти. Це дозволяє користувачам переносити робочу камеру на станцію постобробки Sift, навіть не бачачи надрукованої частини, що робить видалення та переробку порошку легкою справою.

Що стосується джерела енергії, Fuse 1 оснащений одним 10-ватним лазерним діодом з іттербієвого волокна з довжиною хвилі 1065 нм, розбіжністю променя 4,01 мрад і розміром плями 200 мікрон. В даний час система здатна здійснювати 3D-друк двома різними полімерними матеріалами (Nylon 11 і Nylon 12), і компанія Formlabs наполегливо працює над розширенням асортименту сумісних порошків.

Що стосується системи управління, фірма впровадила власний набір спеціальних гальванометрів, що працюють в полярній системі координат. Таким чином, лазер рухається по осях X і Y, в той час як станина рухається по осі Z. Система використовує ролик для нанесення свіжого шару порошку на порошкове полотно після кожного надрукованого шару, на відміну від використання статичного леза. Використання ролика дозволяє поліпшити укладання порошку і більш рівномірний розподіл порошку, що має вирішальне значення для досягнення високої якості деталей.

З боку електроніки Fuse 1 має 10,1-дюймовий повнокольоровий сенсорний екран на передній панелі (роздільна здатність 1280 x 800). Крім того, що на сенсорний екран виводиться вся основна функціональність принтера, включаючи калібрування принтера, управління файлами та управління збіркою, він також використовується в якості відеоканалу для моніторингу внутрішньої частини робочої камери під час друку деталі. Користувальницький інтерфейс дуже досконалий і простий у навігації з мінімальною затримкою. Варіанти підключення включають USB, Wi-Fi та Ethernet.

Fuse Sift, що використовується разом з Fuse 1, є автоматизованою системою пост-обробки, призначеною для розпилення полімерних 3D-друкованих деталей. Вона містить всі інструменти, необхідні для розпакування збірки, очищення деталей і повторного використання незапеченого порошку. Робочий простір, захищений прозорим акриловим екраном, продуманий до дрібниць, всі окремі станції розташовані в акуратному порядку. Розглянемо детальніше кожну з цих станцій та пояснимо, як вони працюють.

Після того, як користувач переносить робочу камеру запобіжника 1 до сита запобіжника, надрукована деталь і гора порошку, що не сплавляється (так званий "пиріг"), з'являються з лівого боку робочого простору за допомогою ліфта.

Потім деталь переміщується в середину робочої зони, де знаходиться сито - саме тут відбувається видалення порошку. Сито складається з широкої сітки дрібних отворів, які пропускають невикористаний порошок, затримуючи при цьому більші грудки порошку, які були нагріті і сплавлені між собою. Порошок, якому вдається пройти, зберігається в бункері безпосередньо внизу, де він незабаром буде перероблений зі свіжим порошком і використаний повторно.

Для полегшення процесу видалення порошку користувачі можуть скористатися пилососом, що входить до комплекту поставки. Він швидко прибирає порошок, який неминуче розлітається по всьому робочому простору, тому потрібно ретельно очищати сито (і запобіжник 1) після кожної збірки.

Після того, як основна частина порошку буде видалена з деталей, все одно можна виявити, що невеликі куточки та щілини будуть завантажені порошком, що не розплавився. Щоб виправити це, Fuse 1 також постачається з різноманітними меншими ручними

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

інструментами, які можуть допомогти вирішити більш складну геометрію деталей, включаючи щітки та голкоподібні шипи.

Нарешті, з правого боку робочої зони знаходиться резервуар для свіжого порошку. Тут користувачі можуть засипати свіжий нейлоновий порошок, який буде перероблений разом з використаним порошком, попередньо регенерованим на просіювальній станції. Резервуар оснащений гумовим ущільнювачем, щоб запобігти передчасному змішуванню використаного порошку зі свіжим порошком.

Поєднання Fuse 1 і Fuse Sift забезпечує дуже спрощений робочий процес 3D-друку SLS, але є кілька моментів, про які слід пам'ятати при використанні цих систем.

По-перше, важливо ретельно продумати розташування як Fuse 1, так і Fuse Sift в майстерні. Порошки, що використовуються в SLS, надзвичайно дрібні і схильні до забруднення, тому дуже важливо, щоб робоча зона була вільна від потенційних забруднювачів, таких як пил або відходи від інших машин. Наприклад, жодна з систем не повинна бути розміщена поруч з піскоструминною машиною, оскільки пісок може дуже легко забруднити нейлон в шарі порошку.

Через дрібнодисперсність частинок порошку також рекомендується постійно носити відповідні ЗІЗ при контакті з порошком, що знаходиться в повітрі. Як мінімум, завжди потрібно мати маску при використанні Sift або медіа-бластера. Робоча зона також повинна добре провітрюватися, щоб забезпечити загальне безпечне робоче середовище в приміщенні.

Після того, як належні заходи безпеки були введені в дію, важливо розуміти, що SLS - це гарячий процес. Fuse 1 потрібно близько години, щоб нагріти робочу камеру, перш ніж фактично запустити лазер, хоча цей процес нагрівання перед друком відбувається автоматично. Після завершення друку потрібно дати йому охолонути, перш ніж переносити робочу камеру до відсікача запобіжників.

Обслуговування принтера є неминучою частиною 3D-друку. Більшість проблем, з якими можна зіткнутись з Fuse 1, можна віднести до двох ключових компонентів принтера: інфрачервоного датчика та оптичної касети. ІЧ-датчик вимірює температуру порошку, в той час як касета є елементом, через який проходять інфрачервоні хвилі та лазерний промінь, щоб досягти шару порошку. Підтримання цих двох компонентів в чистоті між збірками повинно бути пріоритетом, інакше можна очікувати неправильних показань температури і відхилення лазерного променя. Стандартний процес очищення вимагає швидкого протирання етанолом.

Formlabs надає власне програмне забезпечення для нарізки для використання з Fuse 1 - PreForm. Для тих, хто використовував системи Formlabs раніше, це те ж саме програмне забезпечення для нарізки, яке доповнює 3D-принтери SLA компанії.

Однією з головних переваг PreForm є те, що вона має лише один набір попередньо визначених параметрів процесу, які не можуть бути змінені. Параметри, які вибрала компанія Formlabs, працюють добре і дають високоякісні відбитки, хоча це означає, що система сумісна лише з власними нейлоновими порошками компанії.

Слайсер пропонує друк в один клік, інтелектуальну функцію, яка автоматично вкладає вибрані 3D-моделі в область побудови, щоб мінімізувати використання порошку і час друку. Крім того, принтер заповнює робочу камеру тільки до найвищої точки вкладених моделей, що означає відсутність необхідності в надлишку порошку. Користувачі також знайдуть функцію укладання особливо корисною, особливо на SLS-принтерах, оскільки вона допомагає повністю використовувати робочий об'єм.

Крім того, користувачі можуть підключити свої принтери Fuse 1 до онлайн-платформи компанії, яка надає корисну інформацію про минулі, чергові та невдалі замовлення, стан підключених принтерів та використання матеріалів у кожному завданні друку. Це виявилося дуже корисним інструментом огляду робочого процесу.

Висновки. Проаналізувавши стан проблеми, пропонується вдосконалити робочий прилад за допомогою використання магнітного поля. Магнітне поле малої сили буде використовуватись для закріплення і утримування часток металічного порошку. Це допоможе усунути вплив мікровібрацій, що значно покращить точність отримуваної деталі. Магнітне поле не вплине на якість сплавлення часток порошку.

Використання магнітного поля має ще одну мету. В аналогічних пристроях порошок утримується в друкувальному резервуарі силою тяжіння. Коли прокатується валик, який наносить новий шар порошку, він не дає товщину шару, яка дорівнює товщині однієї частинки порошку. Це означає, що отримуваний, за допомогою валика, шар порошку може містити в два,

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

три і більше шарів частинок. Це значно погіршує точність і міцність отримуваної деталі, оскільки лазер розрахований на сплавлення одного шару часток, тому він не зможе надійно спаяти поверхню, де є одна частинка зверху, і ще одна частинка під нею. Отримувана деталь може мати погано спаяні між собою мікрочастинки. Це в подальшому призведе до появи мікротріщин, що можуть призвести до руйнування деталі, або до пришвидшеного зношування.

Вирішити цю проблему можна за допомогою магнітного поля. Різниця мас, хімічний склад і намагнічуваність частинок порошку між собою дуже мала, тому нею можна нехтувати. В такому разі, можна використати дуже точний електромагніт, і створити за допомогою нього магнітне поле такої сили, яка необхідна для утримування шару порошку, який складається тільки з одного рівня частинок порошку. Таким чином, інші рівні частинок порошку не будуть утримуватись магнітним полем, і від них можна позбутись прокатуванням валика.

Коли необхідно нанести ще один шар порошку, ми збільшуємо напругу на електромагніт так, щоб можна було намагнітити новий шар частинок порошку і прокатуємо валиком. Таким чином ми отримуємо новий шар частинок порошку, ідеально точний, гладкий і рівний, і крім того, захищений від мікровібрацій, зовнішніх електричних полів, і зміщень, пов'язаних із прокатуванням валика. Це дозволить нам отримати шар порошку товщиною до 0,01 мм, що в 11 разів менше, ніж в обраному мною прототипі приладу Fuse 1, від компанії Formlabs, і більш ніж в 7 разів менше, ніж в більшості аналогів інших компаній.

Таке зменшення товщини шару порошку дозволить зменшити необхідну потужність лазера, а значить і зменшити витрати енергії, що вплине, на економічність виробу. З іншої сторони, сила магнітного поля, яке буде використовуватись є дуже мала, тому великих витрат енергії на неї також не буде. Витрати енергії на такий 3д принтер з магнітним полем, будуть менші, або приблизно такі ж як і у аналогів, але точність нашого приладу буде в 6 — 10 разів більшою. Ми зможемо отримувати складні, і дуже надійні деталі з мікроскопічною деталізацією поверхні. Неточності і проблеми зі спаюванням частинок порошку будуть усунуті в таких деталях. Це відкриє перед нами нові можливості в створенні найскладніших деталей і приладів на мікроскопічному рівні. Це можуть бути деталі в найрізноманітніших приладах і галузях: від дорогих механічних годинників і прикрас, до приладів космічної, авіаційної промисловості, мікро-медицини і мікро-робототехніки.

Інформаційні джерела

1. The Different SLS 3D Printers on the Market. [Електронний ресурс] / Published on July 14, 2022 by Niru K. – Режим доступу: https://www.3dnatives.com/en/different-sls-3d-printers-220320184/

2. The Best SLS 3D Printers of 2022. [Електронний ресурс] / by Ile Kauppila. Updated Mar 15, 2022 – Режим доступу: https://all3dp.com/1/best-sls-3d-printer-desktop-industrial/#sintratec-kit.

3. Selective Laser Sintering [Електронний ресурс] / Protolabs, 2022– Режим доступу: https://www.protolabs.com/services/3d-printing/selective-laser-sintering/

4. Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. [Електронний ресурс] / Formlabs, 2022 – Режим доступу: https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/

5. What is SLS 3D printing? [Електронний ресурс] / Sinterit, 2022 – Режим доступу: https://sinterit.com/blog/sls-technology/what-is-sls-3d-printing/

6. SLS 3D Printing – The Ultimate Guide. [Електронний ресурс] / by Carolyn Schwaar. Published Jul 21, 2022 – Режим доступу: https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/

V. Simonyuk, V.Ptashenchuk, A.Timoshchuk
Lutsk National Technical University

TO THE ANALYSIS OF THE TECHNICAL POSSIBILITIES AND TECHNICAL STATE OF THE EQUIPMENT FOR MANUFACTURING PARTS USING 3D PRINTING

This article discusses modern technical achievements in the field of micro- and nanosystem engineering, materials and software that have opened up the possibility of 3D printing using SLS technology in various industries, especially in the manufacture of small and fragile micro- and nanosystem engineering parts. Compared to the tooling needed to create one-off or short-run parts and custom prototypes using injection molding, SLS 3D printing is found to be a more affordable solution. It is also proposed to improve the working device by using a magnetic field. A low-power magnetic field will be used to fix and hold the metal powder particles.

Keywords: *3D printing, bulk powder, magnetic field, fragile parts, micro- and nanosystem engineering, metal powder particles, SLS biomedical materials.*

© Симонюк В.П., Пташенчук В.В, Тимощук А.А.

УДК 658.512
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-18
Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КАРБАМІДУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

У статті висвітлено актуальність процесу отримання твердого карбаміду та області його застосування у сучасному господарства. А також розглянуті методи його отримання. Крім цього описаний технологічний процес виробництва карбаміду, властивості продукту і його технічні характеристики. У статті зазначені контролюючі і регулюючі параметри технологічного процесу виробництва карбаміду. Представлені технічні характеристики до продукту карбаміду і схема взаємозв'язків параметрів процесу отримання сировини в ректифікаційній колоні.

Ключові слова: *карбамід, азот, амоній, плат, кристали, продукт.*

Постановка проблеми. Процес отримання твердого карбаміду є важливим завданням сучасної промисловості, оскільки його застосування широко розповсюджене у сільському господарстві як мінерального добрива, а також під час виробництва карбамід-формальдегідних полімерів, пластмас, штучних волокон і клеїв. Завдяки високій концентрації азоту в добриві, карбамід дуже швидко перетворюється в грунті у вуглекислий амоній з подальшою нітрифікацією та легким засвоєнням рослинами, що в основному і визначає економічну доцільність його використання в якості добрива. Оскільки розвиток сільського господарства потребує великої кількості добрив, то виготовлення їх за мінімальними цінами є надзвичайно важливим завданням для економічного розвитку нашої країни [1-2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями особливостей сполук карбаміду займалися такі вчені, як: Голік (2000 р.), Каленчук В.Г. (2000 р.), Смотраєв Р.В., Краснюк А.В. (2002 р.), Римар Т.Е., Федорченко С.В. (2004 р.), Савченко М.О. (2008 р.), Дробчак О.З., Василенко І. А. (2010 р.), Салдан Р. Й. (2011 р.), Шатрава Ю. О. (2021 р.). Проте, невирішеним залишилося питання енерго-ефективної системи керування процесом виготовлення карбаміду.

Мета роботи. Зробити аналіз процесу виробництва твердого карбаміду з метою його управління та вибрати контролюючі і регулюючі параметри.

Викладення основного матеріалу. Карбамід (сечовина) є дуже реакційно-здатним з'єднанням, що утворює комплекси з багатьма сполуками, наприклад з перекисом водню, які використовуються як зручна і безпечна форма «сухий» перекис водню. Здатність сечовини утворювати комплекси включення з алканами використовується для депарафінізації нафти.

Під час нагрівання до 150-160 °С карбамід розкладається з утворенням біуретану, аміаку, вуглекислого газу та інших продуктів. У водному розчині гідролізується до CO_2 і NH_3, що обумовлює його застосування в якості мінерального добрива. Під час взаємодії з кислотами речовина утворює солі, під час алкування - алкілсечовини, під час взаємодії зі спиртами - уретани, а під час ацилювання - урєїди (N-ацілсечовини). Остання реакція широко застосовується в синтезі гетероциклічних сполук, наприклад, піримідинів. Карбамід легко конденсується з формальдегідом, що обумовлює широке його застосування під час виробництва смол.

Хімічні властивості карбаміду обумовлюють широке його застосування в хімічній промисловості під час синтезу карбамідо-альдегідних (в першу чергу карбамідоформальдегідних) смол, широко використовуються в якості адгезивів, у виробництві деревоволокнистих плит (ДВП) і меблевому виробництві. Похідні сечовини - ефективні гербіциди.

Частина виробленого карбаміду використовується для виробництва меламіну. Значно менша частка використовується для потреб фармацевтичної промисловості.

Цікаві напрямки застосування карбаміду пов'язані з використанням його для очищення викидів ТЕЦ і сміттєспалювальних установок, де в якості відновника оксидів азоту використовуються продукти термічного розкладання карбаміду. Причому карбамід може

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

застосовуватися як у твердому вигляді, так і у вигляді водного розчину. Сьогодні дана технологія вже впроваджується на сміттєспалювальних заводах.

Ще одним перспективним напрямком використання карбаміду є виробництво продукту AdBlue - 32,5%-го розчину карбаміду, що використовується для обробки вихлопних газів дизельних двигунів. Застосування даного розчину дозволяє домогтися відповідності складу вихлопних викидів нормам Euro-4 і Euro-5. У цьому випадку більш доцільним є застосування пріллірованного карбаміду зважаючи на його фізичні властивості.

Першим методом отримання карбаміду був синтез карбаміду з сульфату амонію і ціаната калію у 1828 р німецьким хіміком Ф. Велером. Це була перша органічна речовина, отримана синтетичним шляхом. Практичного значення дані реакції не мали, однак робота Ф. Велера поклала початок розвитку органічної хімії і дозволила зруйнувати пануюче в той час віталістичне уявлення про життєві процеси, пояснюючи їх наявністю в живому організмі особливої «життєвої сили».

Надалі для отримання синтетичного карбаміду було запропоновано кілька методів. Більшість з яких не знайшли практичного застосування в промисловості через серйозні труднощі їх реалізації. Один з них, ціанамідний, полягає у взаємодії ціанаміду кальцію з водою в присутності двоокису вуглецю або сірчаної кислоти:

$$CaCN_2 + H_2O + CO_2 \rightarrow CN\text{-}NH_2 + CaCO_3. \quad (1)$$

Після відфільтровування карбонату кальцію розчин ціанаміду підкисляють сірчаною кислотою і нагрівають до 50-70 °С під тиском 0,1-0,5 МПа. У цих умовах ціанамід перетворюється в карбамід:

$$CN - NH_2 + H_2O \rightarrow CO(NH_2)_2. \quad (2)$$

Цей процес, що протікає в освинцьованому автоклаві в атмосфері інертного газу, супроводжується утворенням побічних продуктів, що забруднюють карбамід. Через дорожнечу і нерентабельність він не знайшов промислового застосування.

Більш досконалим і рентабельним методом, отримання карбаміду є діоксин (двоокис) вуглецю і аміак. Синтез карбаміду протікає в дві стадії. У першій стадії відбувається утворення карбаміново-кислого амонію (карбомату):

$$2NH_3 + CO_2 \leftrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O. \quad (3)$$

Потім карбомат дегідратується з утворенням карбаміду:

$$2NH_3 + CO_2 \leftrightarrow NH_4 - COO - NH_2. \quad (4)$$

Сумарно отримання карбаміду є гетерогенним процесом у системі «Г - Р», що протікає в кінетичній області

$$NH_4 - COO - NH_2 \leftrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O. \quad (5)$$

Обидві останні реакції зворотні, стан їх рівноваги і вихід карбаміду залежать від умови процесу синтезу - температури, тиску, співвідношення аміаку і двоокису вуглецю, якості вихідної сировини, тривалості реакції і ін. У результаті численних досліджень встановлено вплив різних чинників на процес синтезу і обрані його оптимальні умови [1].

Вихідні компоненти перетворюються в карбамід у повному обсязі, внаслідок чого продукти реакції містять крім карбаміду і води ще карбонат амонію і аміак. У промисловому масштабі процес синтезу карбаміду проводиться за тиску 13-28 МПа і температури 170-200 °С і надлишку аміаку понад стехіометрично необхідну кількість.

Розглянемо більш детально стадії технологічного процесу отримання карбаміду. Синтез карбаміду з аміаку і двоокису вуглецю протікає за сумарною реакцією:

$$2NH_3 + CO_2 \rightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O \quad (6)$$

і складається зі стадії освітлення карбамат амонію:

$$2NH_3 + CO_2 \rightarrow NH_4 - COO - NH_2 \quad (7)$$

і дегідратації карбамат амонію:

$$NH_4 - COO - NH_2 \rightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O. \quad (8)$$

Згідно з технологічною схемою, газоподібний CO_2 стискається в чотириступінчатому компресорі 1 від 1 до 200 атм. за 35 °С, а звідти подається в змішувач 4, рис. 1. У змішувач також під тиском 200 атм. подається рідкий аміак, а плунжерним насосом 14 розчин повертає в цикл не перетворені в карбамід NH_3 і CO_2. У змішувачі утворюється карбомат амонію за тиску 200 атм. і температури 175 °С. Зі змішувача реакційна суміш надходить в колону синтезу 5, в якій за 200 °С і 280 атм. протікає освітлений карбамід.

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

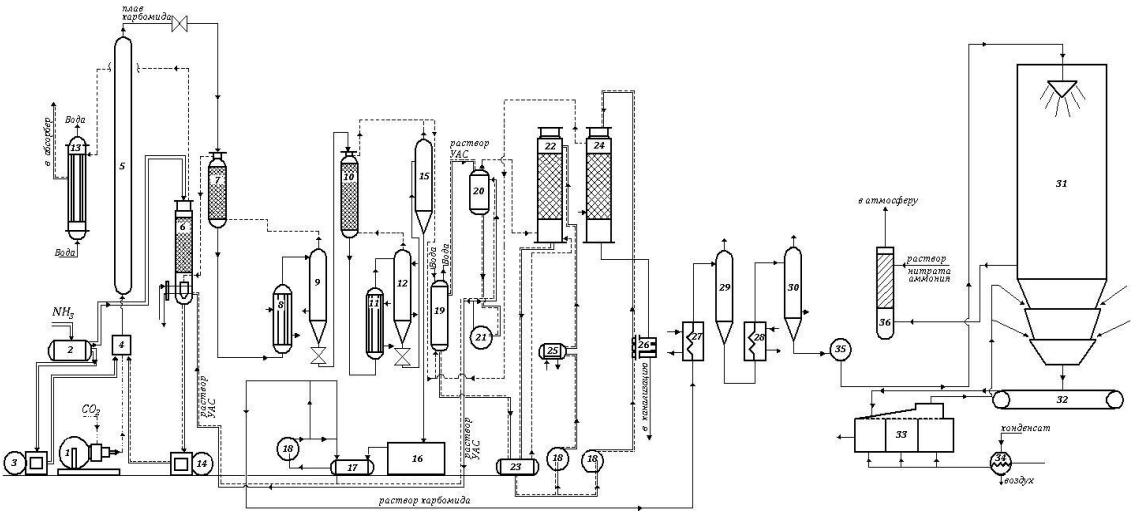


Рис. 1. Технологічна схема виробництва карбаміду

Утворений в колоні синтез плаву, що містить 30-31% карбаміду, 21-22% карбамат амонію, 33-34% надлишкового аміаку, 14-16% води направляються на двоступеневу дистиляцію. Агрегат дистиляції кожного ступеня складається з трьох апаратів: ректифікаційної колони, підігрівача і сепаратора.

Плав карбаміду, що виходить з колони синтезу 5, дроселюється від 200 до 20 атм. і надходить в колону ректифікації 7 агрегату дистиляції першого ступеня. У ньому відбувається виділення в газову фазу надлишкового аміаку. Потім у підігрівачі 8 температура плаву підвищується до 165 °С. При цьому майже повністю виділяється надлишковий аміак і розкладається велика частина карбамат амонію. Новоутворена парорідинна суміш розділяється в сепараторі 9.

Газова фаза з сепаратора 9 повертається в колону ректифікації 7, а рідка фаза дроселюється до 3 атм. і направляється на дистиляцію другого ступеня.

Газова фаза з ректифікаційної колони 7, що містить 76% NH_3, 21-22% CO_2 і близько 3% води, направляється в промивну колону 6. Тут NH_3 і CO_2 поглинаються аміачною водою з утворенням розчину амонійних солей, а газоподібний аміак очищується від двоокису вуглецю і направляється в конденсатор першого ступеня 13, де конденсується і повертається через танк 2 у цикл.

Рідка фаза, що являє собою концентрований розчин амонійних солей, з температурою 100 °С плунжерним насосом 14 подається під тиском 200 атм. у змішувач 4.

Розчин, що надходить на дистиляцію другого ступеня містить 60-61% карбаміду, 4-5% карбамат амонію, 6-7% надлишкового аміаку і 29-30% води. Дистиляція другого ступеня протікає так само, як і першого. А саме: спочатку розчин проходить через колону ректифікації 10, а потім в підігрівачі 11 нагрівається до 145 °С і надходить в сепаратор 12, де відбувається поділ газоподібної і рідкої фаз. У другому рівні дистиляції відбувається остаточний розпад карбамат амонію і завершується відгонка аміаку і двоокису вуглецю.

Розчин який залишився і містить 70-72% карбаміду, з сепаратора 12 дроселюється і надходить у вакуум-випарник 15, в якому за залишкового тиску 300 мм.рт.ст. відбувається його концентрація до 74-76% за рахунок самовипаровування. Далі цей розчин через збірник 16 і масловіддільник 17 направляється на переробку в готовий продукт.

Газова фаза з ректифікаційної колони 19, що містить 55-56% NH_3, 24-25% CO_2 і 20-21% води, направляється в конденсатор другого ступеня 19 для конденсації водяної пари. Тут утворюється слабкий розчин ВАС (вуглеамонійних солей) і через напірний бак 20 він відцентровим насосом 21 подається в промивну колону 6.

Газова фаза з конденсатора 19 і інші гази, що містять NH_3 і CO_2, направляються в абсорбер 22, в якому NH_3 і CO_2 за 40 °С поглинаються розчином амонійних солей, що циркулює через холодильник 25.

У абсорбері 22 утворений розчин ВАС, підігрівається в теплообміннику 26 до 95 °С і подається в десорбер 24. Тут при 3 атм. і 135 °С за допомогою гострої пари відбувається повне розкладання амонійних солей на NH_3 і CO_2. Газоподібні NH_3 і CO_2 разом із водяними парами направляються в конденсатор другого ступеня, а решта води видаляється в каналізацію.

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

Колона синтезу 5 розміщена на відкритому майданчику, а інше обладнання - в будівлі. Отриманий розчин карбаміду послідовно випарюють у випарних апаратах першого і другого ступеня 27 і 28 відповідно за температури 120-125 °С і тиску 30-40 кПа і 130-140 °С і тиску близько 3-5 кПа. Отриманий плав карбаміду концентрацією 99,7-99,8 мас.% надходить в грануляційну вежу 31 і розпорошується в ній. Утворені дрібні частинки під час падіння вниз охолоджуються потоком повітря, що йде від низу до верху, і перетворюються в гранули. У нижню частину вежі засмоктується атмосферне повітря, і подається повітря з апарату для охолодження гранул «КС» 33. Утворені гранули нітрату амонію з нижньої частини вежі надходять на транспортер 32 і в апарат киплячого шару 33 для охолодження гранул, в який через підігрівач 34 подається сухе повітря. З апарату 33 готовий продукт направляється на пакування.

Кристалічний карбамід отримують в кристалізаторах. На сучасних установках потік повітря з грануляційних веж промивається для видалення дрібних частинок карбаміду і потім викидається в атмосферу [2-9]. Система управління повинна забезпечувати досягнення мети управління за рахунок заданої точності підтримки значень технологічних параметрів у будь-яких умовах виробництва за надійної безаварійної роботи устаткування, а також задовольняти вимоги вибухо- та пожежобезпеки. Карбамід складається з безбарвних кристалів, які легко розчиняються у воді, спирті, рідкому аміаку, сірчистому ангідриді. Температура його плавлення 132,7 °С, щільність 1,33 - 103 кг/м^3. Карбамід за нормальних умов не пожежо- і не вибухобезпечний, не токсичний. Карбамід пакують у клапанні паперові і полімерні мішки згідно нормативно-технічної документації. Транспортують в упакованому вигляді і насипом всіма видами критого транспорту, крім повітряного. Зокрема, навалом у залізничних вагонах типу «хопер», мінераловозах, а також у спеціалізованих металевих контейнерах.

Для роздрібної торгівлі продукт пакують у поліетиленові пакети, масою не більше 3 кг. Зберігають у закритих сухих складських приміщеннях. Контейнери з карбамідом і транспортні пакети допускається зберігати на відкритих майданчиках.

Випускають карбамід двох марок: А - для використання в хімічній промисловості і тваринництві, і Б - для використання в сільському господарстві.

У табл.1 представлені технічні характеристики до продукту карбаміду [10-11].

Таблиця 1

Технічні характеристики карбаміду

№ з/п	Технічні характеристики	Марка А	Марка Б		
		I сорт	вищий сорт	I сорт	II сорт
1	Зовнішній вигляд	Білі і слабозабарвлені гранули			
2	Масова частка: - азоту в перерахунку на суху речовину,%, не менше	46,2	46,2	46,2	46,2
	- біурета,%, не більше	1,4	1,4	1,4	1,4
	- води,%, не більше				
3	Метод висушування	0,3	0,3	0,3	0,3
	- метод Фішера	0,6	0,5	0,5	0,6
4	Вільного аміаку,%, не менше	0, 03			
5	Гранулометричний склад, масова частка гранул розміром,%: - від 1 до 4 мм, не менше		94	94	94
	- від 2 до 4 мм, не менше		70	50	
	- менше 1 мм, не більше		3	5	5
	- залишок на ситі 6 мм, не більше	Відсутнє			
6	Розсипчатість,%, не менше		100	100	100
7	Статична міцність гранул, кгс/ гранулу, не менше		0,7	0,5	0,3
8	Конденсується добавка: карбамідоформальдегідна смола,%	0,2-0,5			

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

Одною з головних операцій, що впливаю на якість готової карбаміду є: забезпечення температури сировини в ректифікаційній колоні; забезпечення тиску сировини в ректифікаційної колони. Значення температури сировини в колоні залежить від кількості карбаміду, карбамату амонію та води.

Однак основним чинником, від якого залежить вологість суміші є кількість рідких компонентів, що подаються в змішувач.

Схема взаємозв'язків параметрів технологічного процесу виробництва карбаміду в ректифікаційній колоні наведена на рисунку 2.

При цьому: вхідними параметрами є Qк. – кількість карбаміду, Qка. – кількість карбамату амонію, Qв. – кількість води; керуючим - U – напруга на тенах; вихідними - Tсиров – кількість суміші; Pсиров – вологість суміші; збурюючими - tпов. – температура повітря навколишнього середовища, Qна. – кількість надлишку аміаку.

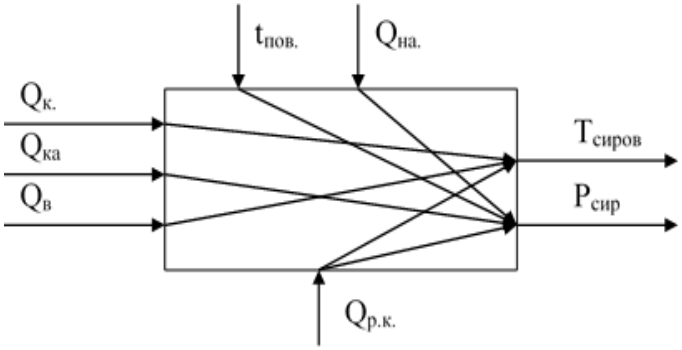


Рис. 2. Схема взаємозв'язків параметрів процесу отримання сировини в ректифікаційній колоні

Висновки. З точки зору управління виробництвом карбаміду він має наступні особливості: послідовна технологічна структура, відсутність проміжних ємкостей, велика потужність агрегатів (1000 т/добу) та кількість контролюючих параметрів процесу. Найважливішими вимогами до сучасної системи управління виробництвом карбаміду є забезпечення високої надійності управління процесом, що майже повністю виключатиме виникнення аварійних ситуацій.

Під час розробки системи управління виробництвом основним завданням є вибір контролюючих і регулюючих параметрів технологічного процесу. Зокрема до регулюючих слід віднести: температура плаву карбаміду на виході з випарного апарату, що надходить у міжтрубний простір випарника та до «сорочки» сепаратора, концентрація карбаміду на виході з випарного апарату, витрата розчину карбаміду перед випарним апаратом. А до контролюючих - режимні параметри, під час зміни яких у об'єкт надходитимуть збурення. Основними з яких є контроль технологічних параметрів вибухонебезпечних об'єктів управління, а також пуск і зупинка обладнання.

Подальшими дослідженнями будуть складання функціональної схеми і вибір технічних засобів автоматизації.

Інформаційні джерела

1. Кучкін О.М., Ковалевський В.М. Оптимізація керування дистиляційною колоною у процесі отримання карбаміду // Автоматизація та комп'ютерна підтримка виробничих процесів. URL: ela.kpi.ua (дата звернення: 12.12.2022)

2. Клімчук О.С., Данькевич А.О. Аналіз випарного апарата як об'єкт автоматизації у виробництві карбаміду // Автоматизація та компютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей XI-ї науково-практичної конференції студентів. Київ, 06-07 грудня 2017р. [Електронний ресурс]. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С.39

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

O. Smolyankin, L. Fedik
Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF OBTAINING UREA AS A MANAGEMENT OBJECT

The article reflects the relevance of the process of obtaining solid urea and its scope in the modern economy. And also considered ways to obtain it. In addition, the technological process for the production of urea, the properties of the product and its technical characteristics are described. The article indicates the controlling and regulating parameters of the technological process for the production of urea. The technical characteristics of the carbamide product and the diagram of the relationship between the parameters of the process of obtaining raw materials in a distillation column are presented.

Key words: *urea, nitrogen, ammonium, plat, crystals, product.*

© Смолянкін О.О., Федік Л.Ю.

УДК 621.867.4
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-19
Станько А.І.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛАСТИЧНИХ ЩІТКОПОДІБНИХ ГВИНТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

У статті представлено розроблену технологію виготовлення запатентованих еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів з обґрунтуванням їх вартості та дослідження впливу їх конструктивних параметрів на величину деформації волокон щіткоподібного гвинтового робочого органу з можливістю прогнозування протидії навантаженню зі сторони матеріалу, що транспортується. із забезпеченням деформації волокон в межах гранично допустимої величини без зворотного руху окремих елементів сипкого матеріалу із зменшенням його травмування. Представлено конструкцію розробленого на основі отриманих патентів України гвинтового робочого органу із щіткоподібною еластичною поверхнею та додаткові операції його виготовлення із розрахунком додаткових витрат, що пов'язані із особливістю конструкції. Представлено результати експериментальних досліджень величини максимальної деформації нейлонових волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Виведено рівняння регресії для прогнозування величини деформації волокон залежно від діаметра поперечного перерізу волокна, довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу та навантаження від мірних вантажів. Побудовано відповідні поверхні відгуку.

Ключові слова: *технологія, щіткоподібний гвинтовий робочий орган, деформація, витрати.*

Постановка проблеми. Гвинтові конвеєри широко використовуються у різних галузях економіки, особливо у сільськогосподарському виробництві при переміщенні насіннєвих зернових матеріалів, міндобрив тощо [1]. Однією із вимог, які ставляться до них, є мінімізація пошкодження при транспортуванні насіннєвих зернових матеріалів, що зумовило розроблення прогресивних конструкцій гвинтових робочих органів із еластичними робочими поверхнями, зокрема щіткоподібними.

Суттєвий вплив на процес переміщення вантажів еластичним щіткоподібним гвинтовим робочим органом та технологію виготовлення такого конвеєра має технологічність конструкції його елементів. Забезпечення технологічності конструкції виробу - функція підготовки виробництва, яка передбачає взаємозв'язане вирішення конструкторських і технологічних задач спрямованих на підвищення продуктивності праці, досягнення оптимальних трудових та матеріальних затрат і скорочення часу на виробництво, технічне обслуговування та ремонт виробу [2]. Відпрацювання конструкції виробу на технологічність передбачає: зниження трудомісткості і собівартості виготовлення виробу та його монтажу поза межами заводу-виробника; зниження трудомісткості, вартості і часу технічного обслуговування та ремонту виробу; зниження загальної матеріаломісткості виробу – витрат металу і паливно-енергетичних ресурсів при виготовленні, монтажі поза межами підприємства-виробника, а також технічному обслуговуванні і ремонті [3].

В основному технологічність конструкції виробу залежить від наступних груп факторів, таких, як його властивостей, запроектованої якості, умов експлуатації та вимог до ремонту. Оцінюється виробнича та експлуатаційна технологічність виробу показниками трудомісткості виготовлення і технологічною собівартістю, коефіцієнтом використання матеріалу, витратами на конструкторську і технологічну підготовку виробництва, витратами часу і ресурсів на реалізацію виробничих процесів і ремонтних робіт тощо [4].

При проектуванні еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів необхідно передбачати відповідність не лише експлуатаційним вимогам, але й раціонального та економічного їх виготовлення згідно вимог принципів технологічності конструкції виробу. Згідно [4] базовими критеріями технологічності конструкції виробу є трудомісткість і собівартість його виготовлення. Загалом технологічність конструкції виробу згідно [5, 6] – це сукупність властивостей, які визначають його пристосованість до досягнення оптимальних

© Станько А.І.

витрат у процесі виробництва, експлуатації та ремонту для заданих показників якості й умов виконання своїх функцій.

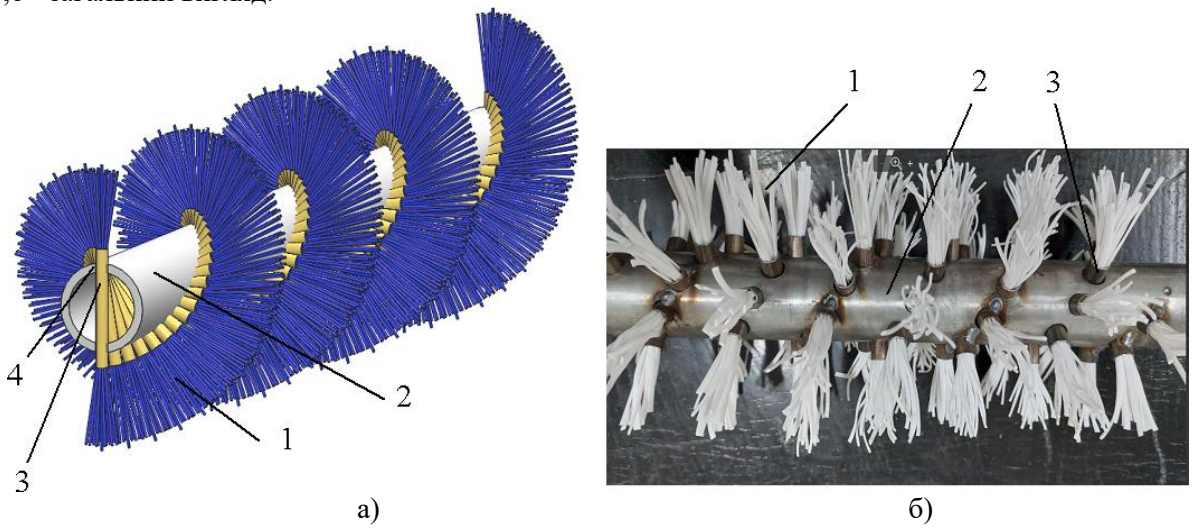
При проектуванні еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів згідно [4] слід використовувати уніфіковані складальні одиниці, стандартизовані й нормалізовані деталі, що забезпечить високу якість, експлуатаційну надійність та довговічність виготовлення цих гвинтових робочих органів.

Важливим є дослідження деформацій гвинтових робочих органів під час транспортування сипких матеріалів із встановленням величин їх коливань [11], [12], деформацій окремих волокон щіткоподібного шнека [13], або еластичних секцій шнека [14], під дією навантажень, що виникають при транспортуванні сипких матеріалів. Розроблені нові конструкції гвинтових конвеєрів із еластичними щіткоподібними гвинтовими робочими органами потребують додаткових досліджень впливу їх конструктивних та кінематичних параметрів на величину деформації волокон щіткоподібного гвинтового робочого органу з можливістю прогнозування протидії навантаженню зі сторони матеріалу, що транспортується із забезпеченням деформації волокон в межах гранично допустимої величини без зворотного руху окремих елементів сипкого матеріалу.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є розроблення технології виготовлення запатентованих еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів з обґрунтуванням їх вартості та дослідження впливу їх конструктивних параметрів на величину деформації волокон щіткоподібного гвинтового робочого органу з можливістю прогнозування протидії навантаженню зі сторони матеріалу, що транспортується.

Враховуючи специфіку виготовлення дослідних зразків гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею, слід зазначити, що на відміну від традиційних гвинтових робочих органів технологія їх виготовлення є значно складнішою і передбачає виконання, окрім традиційних операцій, таких як навивання, калібрування, зварювання також додаткових, пов’язаних із створенням на периферійній частині шнека еластичної поверхні. Причому створення на периферійній частині шнека еластичної поверхні залежно від її форми і матеріалів у кожному конструктивному варіанті потребує індивідуального технологічного вирішення.

Розглянемо детальніше технологічні особливості виготовлення гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею. На рис. 1 представлено розроблений на основі отриманих патентів України [7-9] гвинтовий робочий орган із щіткоподібною еластичною поверхнею, зокрема на рис. 1,а представлено його конструктивну схему, а на рис. 1,б - загальний вигляд.



а) б)

Рис. 1. Гвинтовий робочий орган із щіткоподібною еластичною поверхнею:
а) конструктивна схема; б) загальний вигляд

Виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом передбачає таку послідовність технологічних операцій [1]:

1. Попередня розмітка (відповідно до прийнятого кроку витків) і свердління отворів 4 по гвинтовій лінії вздовж пустотілого вала 2.

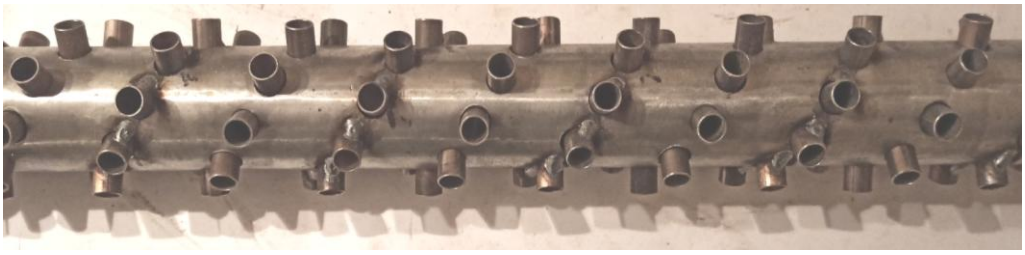
© Станько А.І.

2. Закріплення пустотілих циліндричних трубок 3 в отворах 4 по гвинтовій лінії у пустотілому валі 2 (зварюванням, посадкою з натягом, паянням).

3. Закріплення в пустотілих циліндричних трубках 3 пучків еластичних щіткоподібних елементів (еластичних щіток) 1 (клеєнням).

4. Закріплення на торцевих поверхнях пустотілого вала двох цапф (механічно, зварюванням).

Окремі елементи технологічних операцій виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом представлені на рис. 2, зокрема на рис. 2,а представлено пустотілий вал із привареними циліндричними трубками, а на рис. 2,б - пучки еластичних щіткоподібних елементів перед з'єднанням із валом



а)

б)

Рис. 2. Елементи технологічних операцій виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом: а) пустотілий вал із привареними циліндричними трубками по гвинтовій лінії б) пучки еластичних щіткоподібних елементів перед з'єднанням із валом

При використанні даної технології можна одержати лише двохзахідні еластичні гвинтові робочі органи (з подвійною спіраллю).

Проведений аналіз вихідних даних до процесу виконання відмінних від традиційних (додаткових) операцій при виготовленні гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею дозволив отримати відповідні результати, які представлено нижче (для параметрів: довжина робочого органу L = 4 м; діаметр D = 96 мм; крок витків T = 80 мм):

1. Операція свердління отворів в пустотілому валу:

- обладнання: верстат вертикально-свердлильний 2С132 (сумарна потужність електродвигунів встановлених на верстаті 4,12 кВт);
- вартість обладнання (б/к) - 37 тис. грн.;
- розряд робітника – 4;
- тривалість операції (5 отв. на 1 крок по 8 с) - 2000 с (0,56 год.).

2. Операція закріплення пустотілих циліндричних втулок в отворах пустотілого вала:

- оснащення: прес гідравлічний настільний 10т TY10003 TORIN;
- вартість оснащення – 16,6 тис. грн.;
- розряд робітника – 2;
- тривалість операції - (250 втулок по 6 с) - 1500 с. (0,42 год.).

3. Операція нарізання еластичних щіткоподібних елементів:

- інструмент: ножиці ручні гільйотинні 90/125 мм;
- вартість інструменту – 1,45 тис. грн.;
- розряд робітника – 2;
- тривалість операції - (20 хв.) - 1200 с. (0,33 год.).

© Станько А.І.

4. Операція закріплення в пустотілих циліндричних трубках еластичних щіток:
- інструмент: кліщі затискні YATO YT-2449;
- вартість інструменту – 0,3 тис. грн.;
- розряд робітника – 2;
- тривалість операції - (500 затисків) - 3500 с. (0,97 год.).

Проведемо розрахунок окремих видів витрат на виконання додаткових операцій у процесах виготовлення гвинтових робочих органів з щіткоподібними елементами та із кріпленням еластичного елемента на торцевій поверхні спіралі.

Витрати на заробітну плату робітника, зайнятого виконанням операцій, з врахуванням єдиного соціального внеску (0,22) визначатимуться за формулою [10]:

$$З = \Sigma T_i \cdot T_{c1} \cdot K_i \cdot K_н, \quad (1)$$

де $З$ - затрати на зарплату робітника; T_i - трудомісткість i-ї операції чи переходу, год.; T_{c1} - величина тарифної ставки 1-го розряду (з 01.10.2022 року мінімальна заробітна плата становить 6700,0 грн.; 6700,0 / (21 · 8) = 39,88 грн.); K_i - тарифний коефіцієнт i-го розряду (K_2 = 1,09; K_2 = 1,35 [10]); $K_н$ – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок $K_н$ = 1,22 (згідно закону України № 1774-VIII ЄСВ становить 0,22%).

Витрати на заробітну плату для виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$З = (0,56 \cdot 1,35 + (0,42 + 0,33 + 0,97) \cdot 1,09) \cdot 39,88 \cdot 1,22 = 128,0 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію при вказаних параметрах визначатимуться за формулою [10]:

$$ЕЕ = \Sigma T_i \cdot Ц_{ел.ен} \cdot B_{кгод}, \quad (2)$$

де $Ц_{ел.ен}$ – ціна 1 кВт/год. електроенергії (тариф на електроенергію для не побутових споживачів з 01.10.2022 року II клас – 491,473 коп./кВт·год.); $B_{кгод}$ – приведений обсяг споживання електроенергії обладнанням при виконанні операції чи переходу, кВт/год.

Витрати на електроенергію для виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$ЕЕ = 0,56 \cdot 4,91 \cdot 4,12 = 11,33 \text{ грн.}$$

Затрати на амортизацію обладнання (при використанні в одну зміну), при обробленні одиниці продукції, визначаємо із залежності [10]:

$$А = B_o \cdot K_a \cdot \Sigma T_i / T_д \quad (3)$$

де B_o - вартість обладнання, яке використовується в процесі, грн.; K_a - коефіцієнт амортизації, 0,2; $T_д$ - дійсний час роботи обладнання протягом року, 2070 год.

Витрати на амортизацію обладнання для виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$А = 0,56 \cdot 37000 \cdot 0,2 / 2070 = 2,0 \text{ грн.}$$

Провівши відповідні розрахунки за елементами витрат для виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними еластичними поверхнями, їх результати відобразимо в таблиці 1. При цьому врахуємо вартість додаткових елементів, які необхідні для створення еластичних поверхонь, а також загально виробничі (200% від основної заробітної плати основних робітників) та адміністративні витрати (40% від основної заробітної плати основних робітників) [10].

При виготовленні гвинтового робочого органу із щіткоподібним елементом довжиною L=4 м з кроком T=80мм використовуються 250 циліндричних втулок за ціною 1,87 грн., а також еластичні щітки за ціною 0,22 грн. за пучок.

© Станько А.І.

Таблиця 1

Витрати на виготовлення щіткоподібних еластичних поверхонь гвинтових робочих органів

Елементи витрат на виготовлення щіткоподібних еластичних поверхонь гвинтових робочих органів	Вартість, грн
Витрати на матеріали	522,5
Затрати на зарплату	128,0
Витрати на електроенергію	11,33
Витрати на амортизацію обладнання	2,0
Загальнозаводські витрати	256,0
Адміністративні витрати	51,2
Всього витрат	971,03

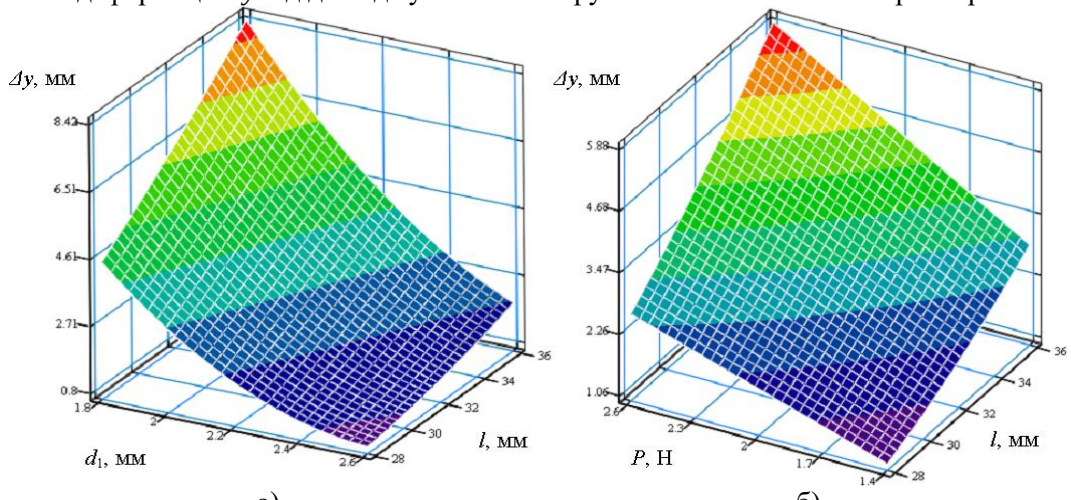
В процесі транспортування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з щіткоподібними еластичними поверхнями виникає деформація волокон еластичного щіткоподібного шнека. Для встановлення її значення проведено експериментальні дослідження величини максимальної деформації Δy нейлонових волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу за методикою, що описана у статті [14]. Навантаження на волокна еластичного щіткоподібного робочого органу зі сторони, що дотикається кожуха конвеєра здійснювалось за допомогою мірних вантажів у вигляді кульок, при цьому кут нахилу кожуха β становив 90 градусів. Вимірювання деформації Δy виконувалось за допомогою штангенциркуля. Під час проведення експериментів здійснювалось варіювання трьох основних факторів: діаметра поперечного перерізу волокна d_1, довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу l та навантаження P від мірних вантажів.

Щоб знайти залежність $\Delta y=f(d_1,l,P)$ використовували повний факторний експеримент. Враховуючи те, що дисперсії в кожній точці факторного простору однорідні, було вирішено скористатись схемою реалізації експерименту з дублюванням в одній точці (у центрі плану) чотири рази. Після статистичного оброблення результатів експериментальних досліджень вивели рівняння регресії для прогнозування величини деформації Δy:

$$\Delta y = 3,397 - 9,34d_1 + 0,425l + 3,04P - 0,432d_1 l - \\ - 2,696d_1 P + 0,148lP + 5,05d_1^2 + 0,0086l^2 + 0,012P^2. \quad (4)$$

Емпірична залежність (4) адекватно відображає досліджуваний параметр на проміжках змінних факторів: 1,8 мм< d_1 <2,6 мм, 28 мм< l <36 мм, 1,4 Н < P <2,6 Н.

На основі рівняння регресії (4) побудовано поверхні відгуку (рис. 3) залежності величини максимальної деформації Δy від досліджуваних конструктивних та силового параметрів.



а) б)

Рис.3. Поверхні відгуку величини максимальної деформації Δy як функціонал:
а – $\Delta y = f(d_1,l)$ при P=2 Н; б – $\Delta y = f(l,P)$ при d_1=2,2 мм

Реальне значення величин деформації волокон еластичного щіткоподібного шнека в процесі транспортування сипких матеріалів є вищими внаслідок виникнення динамічних навантажень. Оскільки ймовірність виникнення резонансу є незначною, реальне значення величини деформації волокон еластичного щіткоподібного шнека в процесі транспортування сипких матеріалів визначається добутком величини деформації волокон при статичних розрахунках на коефіцієнт динамічності: $y_r = y \cdot k_d$.

Висновоки. Представлено конструкцію розробленого на основі отриманих патентів України гвинтового робочого органу із щіткоподібною еластичною поверхнею та додаткові операції його виготовлення із розрахунком додаткових витрат, що пов'язані із особливістю конструкції. Представлено результати експериментальних досліджень величини максимальної деформації нейлонових волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу.

На основі аналізу рівняння регресії та побудованих графіків встановлено, що із зменшенням діаметра поперечного перерізу волокна d_1 та збільшенням довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека l та навантаження P величина деформації Δy нейлонових волокон еластичного щіткоподібного шнека зростає. Максимальне значення деформації Δy становить 10,5 мм, а мінімальне – 0,7 мм. Збільшення параметру d_1 від 1,8 мм до 2,6 мм призводить до зменшення деформації Δy у 4,4 рази. Збільшення параметра l від 28 мм до 36 мм призводить до збільшення деформації Δy у 2,4 рази, при цьому збільшення навантаження P від 1,4 Н до 2,6 Н призводить до збільшення деформації Δy у 2,36 рази. Відхилення теоретичних результатів досліджень від експериментальних становить до 17%.

Інформаційні джерела

1. Гевко І., Ляшук О., Цьонь О., Станько А. Технологія виготовлення еластичних шнеків. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ-2022». Івано-Франківськ – Яремче, 1-5 лютого, 2022. - с. 69-71.

2. Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Драган А.П., Новосад І.Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

3. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения : ГОСТ 14.205:83. – М. : Госстандарт, 1983. – 43 с.

4. Гевко І.Б. Управління процесом розробки і освоєння виробництва нових виробів: Підручник. – / [І.Б. Гевко, Б.М. Гевко]. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2015. – 199 с.

5. Правила выбора показателей технологичности конструкции изделий : ГОСТ 14.202:83. – М. : Госстандарт, 1983. – 27 с.

6. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения : ГОСТ 14.205:83. – М. : Госстандарт, 1983. – 43 с.

7. Патент на корисну модель № 123753. Україна, МПК B65G 33/26 (2006.01). Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею / Гевко Р.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Довбуш Т.А., Рогатинська Л.Р., Станько А.І. (Україна). – № a201911228. Заявл. 18.11.2019р.; Опубл. 27.05.2021р., Бюл.№21.

8. Патент на корисну модель № 142241. Україна, МПК B65G 33/26 (2006.01). Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею / Гевко Р.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Довбуш Т.А., Рогатинська Л.Р., Станько А.І. (Україна). – № u201911236. Заявл. 18.11.2019р.; Опубл. 25.05.2020р., Бюл.№10.

9. Патент на корисну модель № 124326. Україна, МПК B65G 33/26 (2006.01). Комбінований еластичний гвинтовий транспортер. Гевко Р.Б., Рогатинський Р.М., Довбуш Т.А., Ляшук О.Л., Ткаченко І.Г., Хомик Н.І., Станько А.І. (Україна). – № a202003160. Заявл. 26.05.2020р.; Опубл. 26.08.2021р., Бюл.№34.

10. Гевко І. Б. Організація виробництва: теорія і практика: підручник / І. Б. Гевко, А. О. Оксентюк, М. П. Галущак. – К. : Кондор, 2008. – 178 с.

11. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Gud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M., (2015), Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces, *INMATEH: Agricultural engineering*, vol.45, no.1 pp. 77-86, Bucharest/Romania.

12. Rohatynskyi R. M., Hevko Iv. B., Diachun A. Ye., (2015), The research of the torsional vibrations of the screw in terms of impulsive force impacts, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho*

© Станько А.І.

Hirnychoho Universytetu (Науковий вісник Національного гірничого університету), vol.149, no.5, pp. 64-68, Dnipropetrovsk/ Ukraine.

13. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q., (2018), Research on the Principle of a New Flexible Screw Conveyor and Its Power Consumption, *Applied Sciences*, vol.8, no.7.

14. Hevko R.B., Dzyadykevych Y.V., Tkachenko I.G., Zalutskyi S.Z., (2016), Parameter justification for interworking relationship of elastic screw operating element with grain material, *Bulletin of Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Вісник ТНТУ ім. І.Пулюя)*, vol.81, no.1, pp. 77-87, Ternopil/Ukraine.

Stanko A.I.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THE STUDY OF ELASTIC BRUSH SCREW WORK BODIES AND DESIGN OF THEIR MANUFACTURING TECHNOLOGY

The designed technology for patented brush screw work bodies manufacturing with the reasoning of their cost and the study of their design parameters influence of on the brush screw work bodies fibers deformation with the possibility of predicting resistance to the load from the side of the transported material with ensuring the deformation of fibers within the limits of the maximum allowable value without reverse movement of individual elements of the loose material with the reduction in its damage are presented in the article. The design of elastic brush screw work body received on the basis of the obtained Ukrainian patent and additional operations its manufacturing with the calculation of additional costs related to the design feature is presented. The results of experimental studies of the maximum brush screw work body nylon fibers deformation are presented. The regression equation is derived for predicting the amount of fiber deformation depending on the diameter of the cross-section of the fiber, the length of the working part of the brush screw work body fibers and the external load. Corresponding response surfaces are drawn.

Keywords: *technology, brush screw work body, deformation, cost.*

© Станько А.І.

УДК 681.121.84: 681.11.035
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-20
Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.
Національний університет „Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ВІД ДІАМЕТРА ПРОХІДНОГО ОТВОРУ ГОДИННИКОВИХ КАМЕНІВ ЯК ЗВУЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ МІКРОВИТРАТОМІРІВ ГАЗУ

У роботі на основі опрацювання та аналізу експериментально визначених значень коефіцієнта витрати α *годинникових каменів з різними діаметрами d їхнього прохідного отвору отримано аналітичну залежність між коефіцієнтом* α *та значенням діаметра d годинникових каменів. Отримана залежність забезпечує спрощення процедури визначення коефіцієнта витрати* α *годинникових каменів як звужувальних пристроїв газодинамічних витратомірів та дає можливість з високою точністю за відомим значенням діаметра d прохідного отвору конкретного годинникового каменя обчислювати значення його коефіцієнта* α*. Відхилення обчисленого значення коефіцієнта витрати* α *від експериментально визначеного не перевищує* 0,45 %.

Ключові слова: *мікровитрата газу, газодинамічний витратомір, звужувальний пристрій, коефіцієнт витрати, годинниковий камінь, діаметр прохідного отвору.*

Постановка проблеми. Для вимірювання мікровитрат газу, тобто витрат в межах від 0 до $3{,}0\cdot10^{-6}$ м^3/с в трубах діаметром від 1 до 5 мм [1], за методом змінного перепаду тиску як звужувальні пристрої мікровитратомірів застосовують годинникові камені з наскрізними отворами, відносна площа *m* яких досягає значень порядку 0,001, а витрату *G* газу визначають за абсолютними тисками P_1 і P_2 до і після годинникового каменя [2]. Коефіцієнт витрати α, що входить у рівняння витрати такого звужувального пристрою, залежить як від контрольованого газу, виду залежності $G=f(P_1, P_2)$, числа Рейнольдса *Re*, так і від значення діаметра *d* прохідного отвору годинникового каменя. Діаметр *d* таких каменів залежно від типорозміру набуває значень в межах від 0,07 до 2,2 мм, а відхилення значення *d* від номінального може досягати 5,0 %. Відповідно і значення коефіцієнта α для годинникових каменів як різних типорозмірів, так і того самого типу відрізняються між собою, що призводить до значних похибок вимірювання мікровитрат газів за допомогою газодинамічних витратомірів з годинниковими каменями як звужувальними пристроями. Відмінність між значеннями α для годинникових каменів з діаметрами *d* прохідних отворів в межах лише від 0,08 до 0,11 мм досягає 9,5 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коефіцієнт витрати α, що входить у рівняння витрати годинникового каменя як звужувального пристрою газодинамічного мікровитратоміра газу (витратоміра змінного перепаду тиску), визначають експериментально за допомогою витратомірної установки на основі плівкового методу вимірювання зі стабілізацією вимірюваної витрати, межа основної відносної похибки якої становить 0,25 %. Витратомірна установка оснащена газовими редукторами, стабілізаторами тиску, взірцевими манометрами і термометрами, барометрами та взірцевим плівковим витратоміром [1, 2]. Процедура визначення коефіцієнта витрати α годинникових каменів за допомогою такої витратомірної установки є складною і трудомісткою, так як під час дослідження годинникового каменя вимагає застосування високоточних засобів вимірювання та стабілізації мікровитрат газу, а також параметрів газового потоку.

Тому постало завдання щодо спрощення і полегшення процедури визначення коефіцієнта витрати α годинникових каменів, а саме щодо розроблення заходів з визначення коефіцієнта витрати α годинникових каменів за значенням діаметра *d* їхнього прохідного отвору та, у результаті, підвищення точності вимірювання мікровитрат газу за допомогою газодинамічних витратомірів із годинниковими каменями як звужувальними пристроями.

Постановка завдання. Точність вимірювання газодинамічних мікровитратратомірів газу з годинниковими каменями як звужувальними пристроями, про що зазначено вище, визначається як точністю вимірювання тисків P_1 і P_2 до і після годинникового каменя, так і точністю визначення коефіцієнта витрати α таких пристроїв, значення якого залежить від діаметра *d* прохідного отвору каменя. Значення коефіцієнта витрати α визначають, як зазначено

© Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.

вище, експериментально на аналізованому газі для конкретного годинникового каменя за допомогою витратомірної установки, що є досить складним і трудомістким процесом. Тому дослідження залежності коефіцієнта витрати α від діаметра *d* годинникових каменів і встановлення аналітичного опису цієї залежності дасть можливість спростити процедуру і підвищити точність визначення коефіцієнта α конкретного годинникового каменя за значенням його діаметра *d*, а, отже, і підвищити точність вимірювання мікровитратратомірів газу з такими звужувальними пристроями.

Отже, метою цієї роботи є встановлення аналітичної залежності коефіцієнта витрати α годинникових каменів як первинних вимірювальних перетворювачів мікровитрат газу від діаметра *d* їхнього прохідного отвору на основі дослідження та аналізу експериментальних витратних характеристик таких перетворювачів витрати для підвищення точності визначення коефіцієнта витрати α конкретного годинникового каменя за відомим значенням його діаметра *d* і, відповідно, для підвищення точності вимірювання мікровитрат газів за допомогою газодинамічних витратомірів з такими первинними вимірювальними перетворювачами витрати.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою дослідження є розроблення заходів із підвищення точності вимірювання мікровитрат газів за допомогою газодинамічних витратомірів із годинниковими каменям як звужувальними пристроями. Вимірювану витрату *G* газу таким мікровитратоміром визначають за рівнянням [2]

$$G = \alpha f \sqrt{2\rho\Delta P}\left(P_2/P_1\right)^{0.5/\kappa} , \qquad (1)$$

де *G* – масова витрата газу; α – коефіцієнт витрати; *f* – площа прохідного отвору годинникового каменя; ρ – густина газу до звужувального пристрою; κ – показник адіабати газу; $\Delta P = P_1 - P_2$.

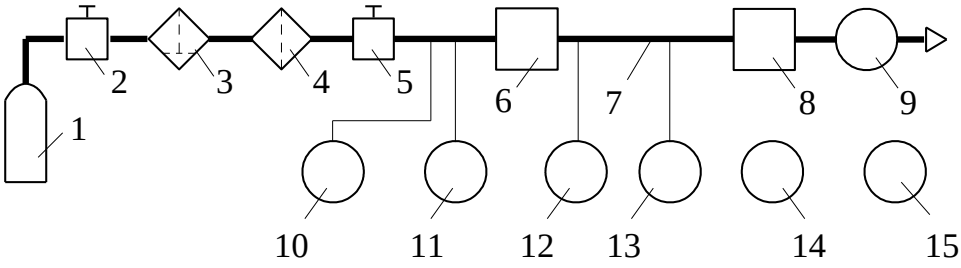


Рис. 1. Схема витратомірної установки для експериментальних досліджень витратних характеристик годинникових каменів:
1 – джерело стиснутого газу; 2 – регулятор тиску „після себе"; 3 – дегідратор; 4 – механічний фільтр; 5 – задавач тиску; 6 – пристрій для герметичного приєднання годинникового каменя до каналу 7 з газовим потоком; 8 – регульований дросель; 9 – плівковий витратомір;
10 і 11 – вимірювачі температури і тиску газу перед досліджуваним годинниковим каменем;
12 і 13 – вимірювачі температури і тиску газу після годинникового каменя;
14 – вимірювач температури зовнішнього повітря; 15 – барометр

Значення коефіцієнта α, що входить у рівняння витрати (1), про що зазначено вище, відрізняються між собою як для каменів різних типорозмірів, так і каменів того самого типу. Для встановлення залежності коефіцієнта α каменя від його діаметра *d* та виду контрольованого газу були проведені експериментальні дослідження витратних характеристик годинникових каменів різних типорозмірів і на різних газах. Експериментальні дослідження були виконані за допомогою витратомірної установки, схема якої наведена на рис. 1. Витратомірна установка реалізує плівковий метод вимірювання витрати газу і межа основної відносної похибки якої становить 0,25% та обладнаної газовими редукторами, стабілізаторами тиску, взірцевими манометрами і термометрами, барометрами і взірцевим плівковим витратоміром, структурно-функційна схема якого зображена на рис. 2 [3]. За отриманими експериментальними даними були обчислені згідно з рівнянням витрати (1) значення коефіцієнта витрати α досліджуваних каменів. Результати цих досліджень підтвердили залежність коефіцієнта витрати α для рівняння витрати (1) від числа *Re*, виду газу і типорозміру годинникового каменя.

© Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.

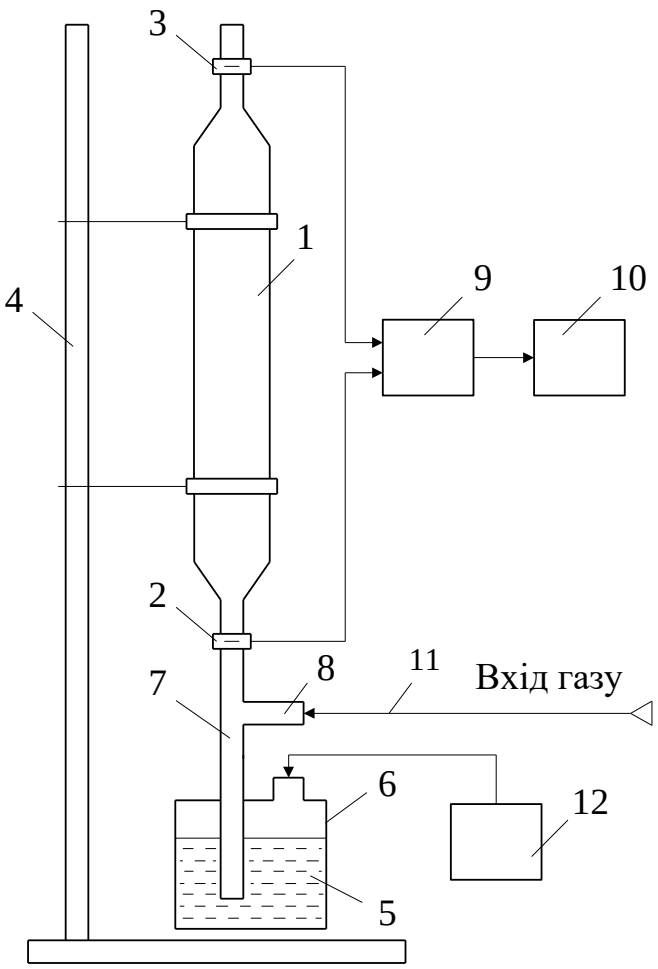


Рис. 2. Структурно-функційна схема взірцевого плівкового витратоміра газу:
1 – мірна трубка; 2 і 3 – оптико-електричні індикатори рівня; 4 – штатив; 5 – розчин поверхнево-активної речовини (ПАР); 6 – резервуар з розчином ПАР; 7 і 8 – штуцери для підведення на вхід мірної трубки відповідно розчину ПАР та газу; 9 – формувач імпульсів; 10 – обчислювач витрати; 11 – трубка для підведення газу на вхід мірної трубки; 12 – автоматизований плівкостворювач

Отже, отримані значення коефіцієнта витрати α досліджуваних годинникових каменів обчисленням згідно із рівнянням (1) на основі експериментальних витратних характеристик цих каменів на повітрі значно відрізняються між собою як для різних типорозмірів каменів, так і для різних газів. Так, коефіцієнт α на повітрі в діапазоні числа *Re* від 700 до 2700 для годинникового каменя з *d*=0,083 мм рівний 0,70, для каменя з *d*=0,093 мм – 0,73 і для каменя з *d*=0,113 мм – 0,77. Найбільше відхилення α кожного з наведених каменів у вказаному діапазоні числа *Re* не перевищує 1,3 %, а відмінність між значеннями α для різних з цих каменів становить 9,5 %. Графік залежності коефіцієнта витрати α від діаметра *d* прохідного отвору для різних типорозмірів годинникових каменів на повітрі наведений на рис. 3.

Аналогічною є відмінність між значеннями коефіцієнта α годинникових каменів на різних газах. Наприклад, для годинникового каменя з *d*=0,083 мм коефіцієнт α на гелії в межах числа *Re* від 200 до 500 дорівнює 0,63, а найбільше відхилення його в цьому діапазоні *Re* не перевищує 3,2 %. На вуглекислому газі ці ж величини і для цього самого каменя в діапазоні числа *Re* від 800 до 2500 відповідно дорівнюють 0,73 і 2,6 %. Тому значення коефіцієнта α конкретного годинникового каменя, зазвичай, визначають експериментально на основі дослідження його витратної характеристики за допомогою витратомірної установки, що реалізує плівковий метод вимірювання мікровитрат газу. Така процедура визначення коефіцієнта витрати α годинникових каменів, як зазначено вище, є складною і трудомісткою та вимагає застосування високоточних засобів вимірювання і стабілізації мікровитрат газу.

© Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.

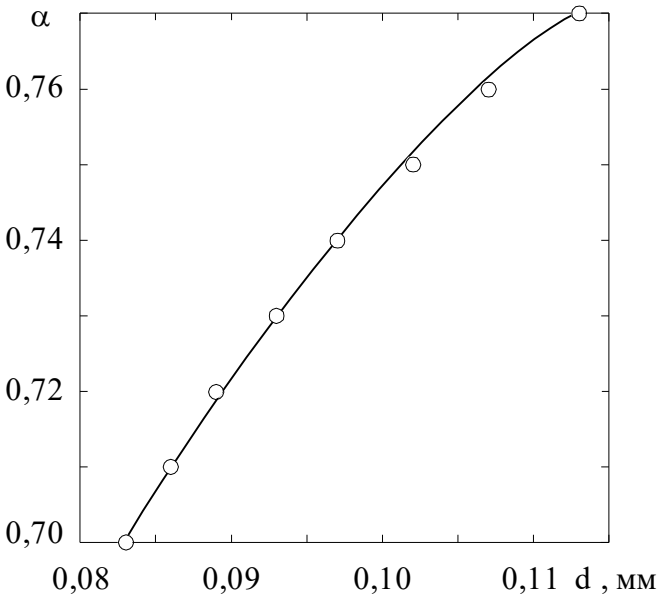


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта витрати α від діаметра *d* прохідного отвору годинникових каменів на повітрі

У цій роботі на основі опрацювання та аналізу експериментально отриманих значень коефіцієнта витрати α годинникових каменів з різними діаметрами *d* їхнього прохідного отвору пропонується аналітичний опис залежності коефіцієнта α від значення діаметра *d* годинникових каменів у формі квадратного полінома. Ця аналітична залежність, наприклад, для годинникових каменів з діаметрами *d* в межах від 0,08 до 0,11 мм на повітрі є такою:

$$\alpha = a_2 d^2 + a_1 d + a_0 , \qquad (2)$$

де a_2 = –41,9781; a_1 = 10,5357 і a_0 = 0,1155 – коефіцієнти запропонованого квадратного полінома, в якому діаметр *d* прохідного отвору досліджуваного годинникового каменя виражений у мм.

Відхилення значення коефіцієнта витрати α, визначеного за залежністю (2), від його значення, визначеного експериментально, не перевищує 0,45 %. Тобто ця аналітична залежність забезпечує з високою точністю обчислення значення коефіцієнта витрати α конкретного годинникового каменя за відомим значенням його діаметра *d* прохідного отвору.

Висновки. Отже, застосування запропонованої аналітичної залежності коефіцієнта витрати α годинникових каменів від діаметра *d* їхнього прохідного отвору забезпечує спрощення процедури та підвищення точності визначення коефіцієнта α за значенням діаметра *d* конкретного годинникового каменя як звужувального пристрою газодинамічного мікровитратоміра газу, тобто дає можливість значно підвищити точність вимірювання мікровитрат газу за допомогою таких витратомірів. Відхилення обчисленого за отриманою аналітичною залежністю (2) значення коефіцієнта витрати α від експериментально визначеного для годинникових каменів з діаметрами *d* в межах від 0,08 до 0,11 мм не перевищує 0,45 %.

У перспективі планується виконати подальші роботи з дослідження можливості аналітичного визначення коефіцієнта витрати α годинникових каменів і в іншому діапазоні значень діаметра *d* їхнього прохідного отвору, а також залежно від виду контрольованого газу чи газової суміші з метою розширення діапазону типорозмірів годинникових каменів для їхнього застосування як звужувальних пристроїв газодинамічних мікровитратомірів та підвищення точності вимірювання мікровитрат як індивідуальних газів, так і газових сумішей за допомогою таких витратомірів.

© Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.

Інформаційні джерела

1. Ivan Stasiuk. Gas Dynamical Capillary Flowmeters of Small and Micro Flowrates of Gases. - Energy Engineering and Control Systems, 2015, Volume 1. No. 2. – P. 117-126.
2. Стасюк И.Д. Разработка газодинамических дроссельных преобразователей малых и микрорасходов газов: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.01 / Каунас. политехн. ин-т им. А.Снечкуса. – Каунас, 1988. – 17 с.
3. І.Д.Стасюк, І.В.Ділай, О.З.Парнета, В.В.Шевчук. Зразкова установка на основі плівкового методу вимірювання малих і мікровитрат газів // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: Матеріали IX Міжнародної науково-технічної Internet–конференції (Київ, 25 листопада 2022 р.). – 2022. – с. 62-63.

Stasiuk I. D., Dilay I. V., Brylyns'kyy R. B.
Lviv Polytechnic National University

THE DEPENDENCE OF FLOW COEFFICIENT ON THE OPENING DIAMETER OF WATCH JEWELS AS DIFFERENTIAL PRESSURE DEVICES OF GAS DYNAMIC MICRO FLOWMETERS

In the work, based on the processing and analysis of the experimentally determined values of the flow rate coefficient α of watch jewels with different opening diameters d, an analytical relationship between the coefficient α and the value of the watch jewels diameter d was obtained.

The obtained dependence provides a simplification of the procedure for determining the flow rate coefficient α of watch jewels as differential pressure devices of gas dynamic flow meters and allows to calculate the value of its coefficient α with high accuracy based on the known value of the specific watch jewel opening diameter d.

The deviation of the calculated value of the flow coefficient α from the experimentally determined value does not exceed 0,45 %.

Key words: *gas micro-flow rate, gas-dynamic flow meter, differential pressure device, flow coefficient, watch jewel, opening diameter.*

© Стасюк І.Д., Ділай І.В., Брилинський Р.Б.

УДК 621.822.681.2:369.64
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-21
[1]Ліневич Я.О., [1]Коваль В.М., [1]Душейко М.Г., [2]Лакида М.О.
[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
[2]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВИХ НАНОНИТОК, ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ МЕТАЛО-СТИМУЛЬОВАНОГО ХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ

У даній роботі були виготовлені та досліджені сенсори температури на основі кремнієвих нанониток (SiNWs), які були синтезовані методом метало-стимульованого хімічного травлення (MACE). На основі SiNWs були отримані сенсори резистивного та діодного виду. Послідовність технологічних операцій для виготовлення сенсорів температури була наступною: трьохстадійне очищення поверхні кремнієвих пластин; метало-стимульоване хімічне травлення для синтезу SiNWs; дифузія для утворення p-n-переходу в нанонитках; нанесення фронтальної та тильної металізації. Для отриманих сенсорів були розраховані електричні та термочутливі характеристики: питомий опір, коефіцієнт випрямлення, коефіцієнти термочутливості. Вивчено вплив параметрів синтезу MACE на електричні та термочутливі характеристики сенсорів. Зокрема було встановлено вплив наявності текстури на поверхні кремнієвої пластини, тривалості першого та другого етапів MACE, додаткової обробки в ізотропному/анізотропному травнику та видалення залишків наночастинок срібла на характеристики приладів. Встановлено, що максимальні значення термочутливості сенсора температури резистивного типу спостерігалися для текстурованої підкладки з додатковою обробкою в кислотному травнику (2851 ppm/K). Для сенсора температури діодного типу максимальний коефіцієнт випрямлення становив 676, а максимальна термочутливість – 2,17 мВ/К для нетекстурованої підкладки з додатковою обробкою в кислотному травнику.

Ключові слова: *сенсори температури, метало-стимульване хімічне травлення, кремнієві нанонитки, термочутливість.*

Постановка проблеми. Кремній є незамінним і найбільш широко використовуваним напівпровідниковим матеріалом сучасної мікро- та наноелектроніки. Даний матеріал має відмінні електронні та сенсорні властивості, а також добре відпрацьовану технологію обробки, що робить його зручним та відносно дешевим для використання в мікросхемах та різноманітних електронних приладах (сенсорах, фотоприймачах, сонячних елементах тощо).

В останні роки пріоритети в розробці електронних сенсорних пристроїв були зосереджені на мініатюризації та високій чутливості. Для цього було успішно застосовано різні типи наноструктур: нуль вимірні структури (квантові точки [1], наночастинки [2], кластери [3] фулерени [4]), одновимірні структури (нанодроти [5], наностержні [6], нанострічки [7]) та двовимірні структури (квантові ями [8] та тонкі плівки [9]). Зокрема кремнієві нанонитки є дуже перспективними в сенсориці, оскільки наноструктури з великою площею бічної поверхні забезпечують сенсору збільшену площу чутливої поверхні, а отже його покращений відгук. Нанонитки (Silicon nanowires) – це одновимірні наноструктури, які мають ширину до 10 нм і довжину, яка набагато перевищує ширину, що забезпечує їм велике аспектне відношення (від 10 до 100). Ці наноструктури використовуються як тривимірні будівельні блоки, що призводить до інтеграції з високою щільністю.

На сьогодні кремнієві нанонитки отримують шляхом нанодрукованої літографії з реактивним іонним травленням (RIE/NIL), методом вирощування пара-рідина-тверде тіло (Vapor-Liquid-Solid – VLS growth) [10] або методом метало-стимульованого хімічного травлення (Metal Assisted Chemical Etching – MACE) [11]. Якщо порівняти масиви SiNWs, одержані різними методами (VLS, DRIE/NIL, MACE), то масиви кремнієвих нанониток, одержаних VLS та DRIE/NIL, характеризуються високою впорядкованістю у розташуванні нанониток, але малою їх густиною по поверхні [12]. Крім того, в методі DRIE/NIL присутня значна шорсткість бічних стінок нанониток. Враховуючи також високу вартість та складність такого технологічного обладнання, дуже перспективним у виробництві нанониток є метод метало-стимульованого хімічного травлення, до переваг якого можна віднести простоту

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

технології синтезу, низьку вартість, а також можливість виготовлення наноструктур з високим співвідношенням сторін та високою щільністю розподілу на поверхні. Кремнієві нанонитки, синтезовані методом МАСЕ, широко застосовуються в різних видах сенсорів: деформації [13], парів етанолу [14], оксиду азоту [15], білків [16], парів ацетону [17], парів нафти [18] та формальдегіду [19].

Температура – це один з найбільш вимірюваних фізичних параметрів, оскільки приблизно 50% всіх виготовлених сенсорних приладів на сьогодні є сенсорами температури. Температуру потрібно контролювати в промисловості під час виробничих процесів, для температурного моніторингу інтегральних мікросхем (ІМС), вимірювання температури навколишнього середовища, людського тіла тощо. При цьому кремнієві терморезистори та термодіоди є досить затребуваними, бо задовільняють наступним вимогам [20]: прийнятної точності та чутливості, компактності та малої ваги, можливості виготовлення по груповій інтегральній технології, а відтак низької вартості та сумісності з ІМС. При цьому залишається відкритим питання підвищення термочутливості сенсорних приладів. На сьогоднішній день нанонитки були використані в сенсорах температури резистивного типу, де завдяки цьому вдалося значно підвищити чутливість [21]. Однак напівпровідникові терморезистори характеризуються нелінійною залежністю опору від температури. Тому досить перспективним є використання одновимірних наноструктур в сенсорах температури діодного типу, які характеризуються лінійністю термочутливої характеристики [20]. Крім того, в літературі бракує інформації щодо впливу технологічних режимів синтезу кремнієвих нанониток на термочутливі характеристики сенсорів температури, чому і присвячена дана робота.

Основне завдання та одержані результати роботи. **М**етою роботи є дослідження сенсорів температури резистивного та діодного типу на основі кремнієвих нанониток, одержаних методом метало-стимульованого хімічного травлення, залежно від технологічних параметрів їх синтезу. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання: синтезувати кремнієві нанонитки методом МАСЕ; виготовити на їх основі сенсори температури резистивного та діодного виду; дослідити електричні та термочутливі характеристики сенсорів температури на основі кремнієвих нанониток; встановити вплив технологічних параметрів синтезу кремнієвих нанониток на робочі характеристики сенсорів температури на їх основі.

Синтез дослідних зразків. Щоб синтезувати дослідні зразки, кремнієві підкладки КДБ-1 очищали шляхом трьохстадійного процесу очищення. Спочатку механічні та органічні забруднення видаляються за допомогою розчину $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ (1:1:3) при 80 °C протягом 10 хв. Після цього іони металів видаляються розчином $HCl/H_2O_2/H_2O$ (1:1:3) при 80°C протягом 10 хв. На останньому етапі пластини занурювали в розчин H_2O/HF (100:0,5) на 30 с для видалення поверхневого оксиду. Після кожної операції пластини промивали у трьохступінчатій ванні з деіонізованою водою ($60^oC/40°C/20°C$) протягом 20 хв, а потім сушили на центрифузі.

В даній роботі для синтезу SiNWs була використана двоступенева методика хімічного травлення з використанням металів. Технологічні параметри синтезу зразків наведені в табл.1. На першому етапі МАСЕ Ag-NPs були нанесені на кремнієву поверхню. Хімічна реакція, яка описує цей етап, виглядає наступним чином:

$$Ag^+ + 2H^+ + 3e^- \rightarrow Ag\downarrow + H_2 \qquad (1)$$

Розчин був приготовлений з використанням нанопорошку нітрату срібла: 68 мг $AgNO_3$ розчинили в 10 мл H_2O, додали 4,42 мл плавикової кислоти, а далі об'єм суміші збільшили до 20 мл за допомогою H_2O. Тривалість першого етапу МАСЕ становила від 20 до 60 с.

Хімічна реакція, яка описує другу стадію МАСЕ, наведена нижче:

$$Si + 4HF^{2-} \rightarrow SiF_6^{2-} + 2HF + H_2\uparrow + 2e^- \qquad (2)$$

Приготування розчину для другої стадії МАСЕ відбувалося на основі перекису водню: 11мл 40%-HF, 30 мл H_2O та 0,8 мл 60%-H_2O_2. Тривалість другої стадії МАСЕ становила від 30 до 90 хв.

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

Таблиця 1

Технологічні параметри синтезу зразків

№ зразку	Тривалість процесу MACE		Додаткові технологічні операції до або після процесу MACE		
	t_1, с	t_2, хв	Текстура	Додатковий травник	Видалення срібла
1-1	20	30	-	-	-
1-2	20	30	-	-	+
1-3	20	30	-	-	+
2-1	60	30	-	-	-
2-2	60	30	-	-	+
7	20	90	-	-	+
11-1	20	90	+	кислотний	+
11-2	20	90	+	лужний	+
11-3	20	90	+	-	+
12-1	20	90	-	кислотний	+
12-2	20	90	-	лужний	+
12	10	30	-	-	+
14	40	30	-	-	+

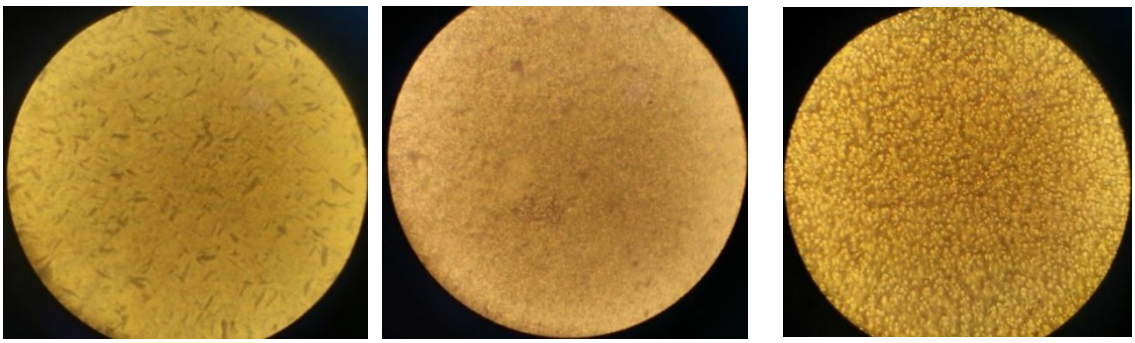
Для зміни структурних параметрів кремнієвих нанодротів використовувалися додаткові технологічні операції до та після стандартної операції MACE: текстурування кремнієвих пластин, видалення залишків наночастинок срібла, обробка в ізотропних/анізотропних травниках. Процес текстурування поверхні кремнієвої пластини відбувався перед процесом MACE на окремій групі зразків з метою одержання більш розвиненої поверхні за рахунок наявності пірамідок текстури. Зразки текстурували в розчині 970мл H_2O/ 30г KOH/ 70мл IPA протягом 15 хв за температури 75˚C. Процес обробки з додатковим травником було здійснено після процесу MACE для видалення пористого (порушеного) шару. В експериментах використовували два травники: кислотний травник $HF/HNO_3/CH_3COOH$ (1:4:4), який ізотропно протравлював поверхню, та лужний травник $NaOH/IPA/H_2O$ (2:10:88), в якому відбувається анізотропне травлення. Після операції MACE на поверхні структурованої кремнієвої підкладки залишилися наночастинки срібла, які були видалені шляхом занурення у концентрованій кислоті HNO_3 на 1 год. В іншому наборі зразків ці залишки не видаляли, щоб перевірити їх вплив на термочутливі властивості сенсорів.

Після синтезу SiNWs у підкладці p-типу формується p-n-перехід. Для цього фосфор впроваджували з боку SiNWs у два етапи в дифузійній печі. На першому етапі (загонка) домішки P вводили в приповерхневий шар кремнію при температурі 750°C протягом 5 хв. На наступному етапі відбувалася розгонка домішок P при температурі 830°C протягом 20 хв. У результаті утворився шар кремнію n-типу з питомим поверхневим опором 50 Ом/м.

З боку підкладки на досліджувані зразки наносили суцільні алюмінієві контакти за допомогою методу ВЧ магнетронного розпилення. Робочі параметри вакуумної установки під час процесу осадження були наступними: напруга 400 кВ, сила струму 4 А, тиск аргону 3×10^{-7} мм рт. ст., час осадження 40 хв. Потім алюмінієву плівку відпалювали в дифузійній печі при 650°C в атмосфері азоту. В результаті був отриманий тильний контакт товщиною 1,5 мкм. Далі відбувалося формування точкових фронтальних контактів Ti/Ni зі сторони SiNWs методом електронно-променевого осадження. Параметри осадження у вакуумній установці: тиск в камері 10^{-5}мм.рт.ст., напруга 13 кВ, струм 120 мА. Час осадження для титану та нікелю становив 3 та 20 хв відповідно.

Поверхнева морфологія дослідних зразків. Поверхневу морфологію досліджували за допомогою оптичного мікроскопу МКИ-2М Планар. На рис.1, а зображено знімок в оптичному мікроскопі кремнієвої поверхні після операції MACE, звідки видно, що зразок має поверхню типового пористого кремнію: темні риски на знімку відповідають порам. Після обробки зразку в лужному травнику, який призводить до анізотропного травлення, спостерігається вирівнювання поверхні зразку (рис.1, б), очевидно, завдяки різній швидкості травлення

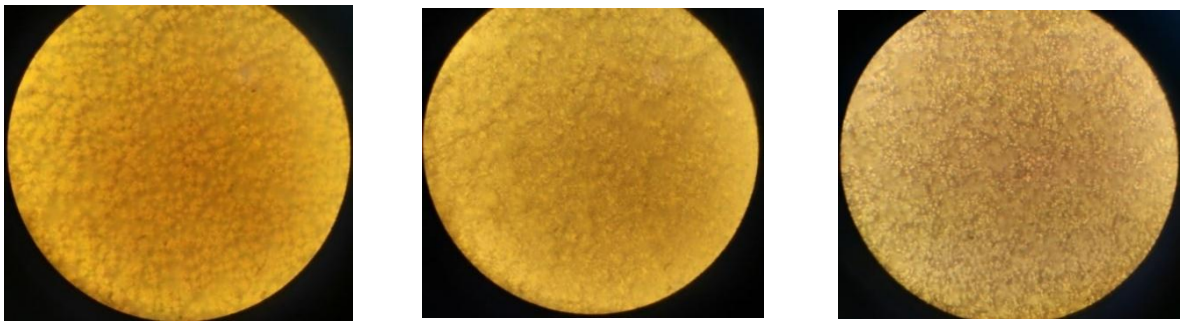
виступів та западин. З додаванням кислотного додаткового травника має місце ізотропне травлення, в результаті чого на поверхні формується розвинена мережа наноструктур (рис.1, в) за рахунок травлення з однаковою швидкістю виступів та западин.



а) б) в)

Рис. 1. Зображення в оптичному мікроскопі зразків SiNWs, синтезованих методом МАСЕ на полірованих підкладках: без додаткової обробки (а), з додаванням лужного травника (б), з додаванням кислотного травника (в)

Крім того, в роботі було досліджено поверхневу морфологію попередньо текстурованої кремнієвої поверхні з наступною операцією МАСЕ, обробці в лужному та кислотному травнику (рис.2). На рис.2, а зображено знімок в оптичному мікроскопі текстурованої кремнієвої поверхні після операції МАСЕ, звідки видно, що зразок має поверхню типового текстурованого кремнію: яскраві чотирикутні утворення на знімку відповідають зображенню пірамідок текстури. Відхилення від правильної чотирикутної форми, очевидно, пов'язані з утворенням на поверхні пірамідок витравлених нанониток після операції МАСЕ. Обробка зразку в лужному травнику призвела до вирівнювання поверхні зразку (рис.2, б), а в кислотному травнику – до формування розвиненої мережі наноструктур (рис.2, в).



а) б) в)

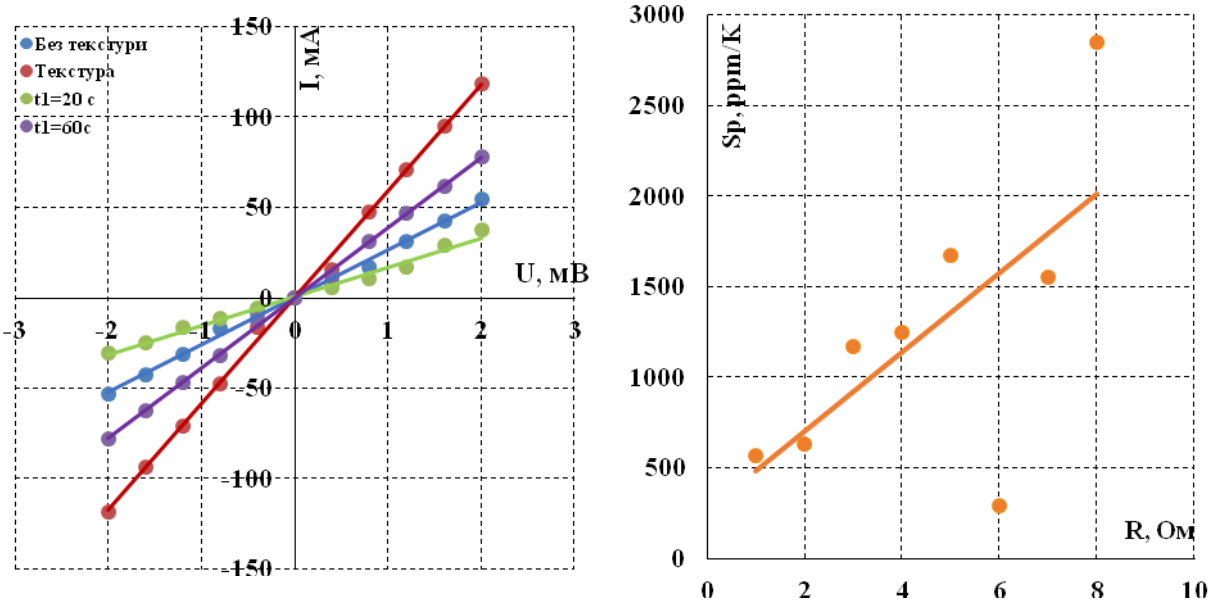
Рис. 2. Зображення в оптичному мікроскопі зразків SiNWs, синтезованих методом МАСЕ на текстурованих підкладках: без додаткової обробки (а), з додаванням лужного травника (б), з додаванням кислотного травника (в)

Резистивні сенсори температури. Принцип дії сенсорів температури резистивного типу полягає у зміні опору приладу зі зміною температури. Електричні та термочутливі властивості сенсорів температури резистивного типу на основі SiNWs вивчались на основі темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ), наведених на рис.3, а, та розрахованих коефіцієнтів (табл.2).

Синтезовані резистивні структури на основі SiNWs характеризуються лінійними та симетричними темновими ВАХ. Розрахований опір масиву кремнієвих нанониток знаходився в межах 22 – 917 Ом в залежності від параметрів їх синтезу. Зокрема текстурування поверхні

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

зразків перед операцією MACE призводить до зменшення опору сенсору більш, ніж удвічі: з 36 до 16 Ом.



а) б)

Рис. 3. ВАХ сенсорів температури резистивного типу (а) та залежність їх термочутливості від опору (б)

Зростання часу осадження наночастинок срібла в операції MACE з 20 до 60 с також призводить до зменшення опору сенсора з 53 до 26 Ом. Очевидно, це пов'язано з формуванням більш структурно розвиненої поверхні, яка забезпечує вищу провідність дослідним зразкам. Дійсно, відомо, що більший час осадження наночастинок срібла на під час першої стадії MACE відповідає за щільність їх розміщення на поверхні зразків. Також в роботі було показано, що використання додаткових травників призводить до зростання електричного опору масиву SiNWs. Зокрема використання кислотного травника призвело до збільшення опору сенсору з 15 до 917 Ом, а лужного з 15 до 16 Ом. Це пов'язано з тим, що додаткова хімічна обробка використовується для згладжування поверхні пластини, що й викликає погіршення умов протікання струму. Різниця у впливу кислотного і лужного травника пов'язана з механізмом їх травлення: в першому випадку має місце ізотропне, а в другому – анізотропне травлення поверхні.

Термочутливість сенсорів температури резистивного типу визначалася як відносна зміна опору при зміні температури від 20 до 80°C.

Як видно з розрахованих коефіцієнтів термочутливості в табл.2, зміна технологічних режимів синтезу SiNWs має значний вплив на їх величину. Зокрема було встановлено, що наявність текстури зменшує коефіцієнт термочутливості більш, ніж у 2 рази (з 1246 до 572 ppm/K). Однак обробка текстурованих зразків в додаткових травниках забезпечує зростання термочутливості.

Таблиця 2

Електричні та термочутливі параметри сенсорів температури резистивного типу

№ зразку	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	7	11-1	11-2	11-3	12-1	12-2	12	14
R, Ом	53	-	-	26	22	22	917	16	15	-	36	-	-
Sp, ppm/K	1553	-	-	1671	1170	1246	2851	630	572	-	290	-	-

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

Так, обробка в лужному травнику призвела до незначного збільшення термочутливості (з 572 до 630 ppm/K), а у випадку кислотного – до зростання більш, ніж у 5 разів (з 572 до 2851 ppm/K). Спостережувана залежність, очевидно, обумовлена тим, що обробка в додаткових травниках забезпечує видалення порушеного шару після MACE, який містить багато пасток для носіїв заряду, що покращує електричний відгук приладу. Відмінність у дії двох травників може бути пояснена тим, що використання кислотного травнику, як видно зі структурних досліджень (рис.1 та рис.2), призводить до збільшення площі чутливої поверхні на відміну від лужного травника.

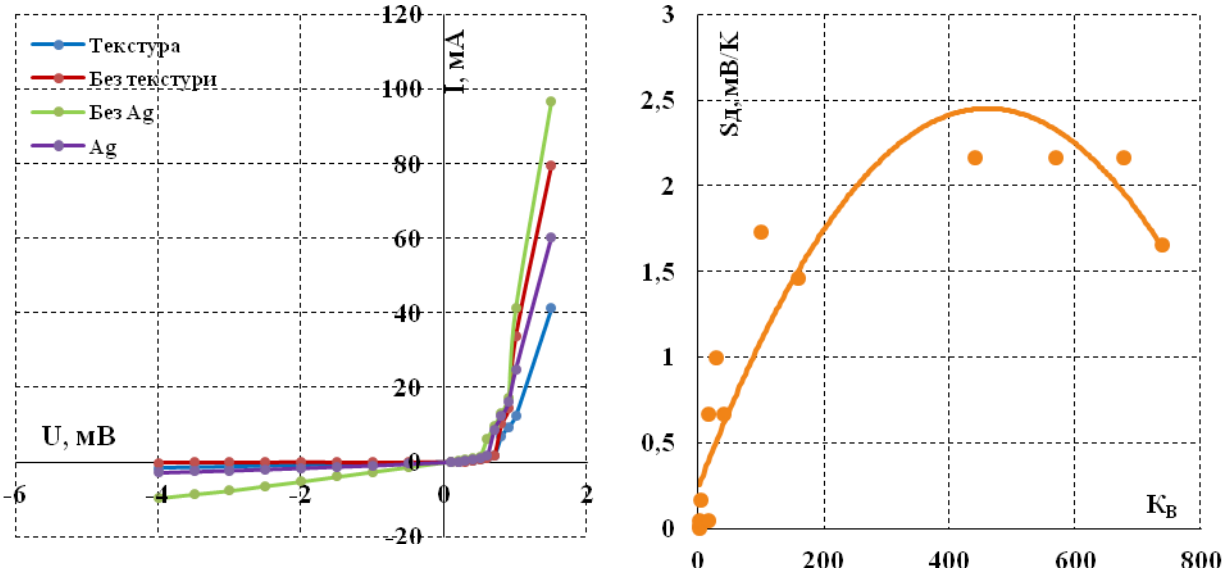
При цьому зростання часу осадження срібних частинок з 20 до 60 с призвело до незначного покращення термочутливості. Максимальний коефіцієнт термочутливості сенсора температури резистивного типу спостерігався для текстурованих зразків з обробкою в кислотному травнику та часом осадження НЧ срібла 20 с (2851 ppm/K). Крім того, було встановлено, що технологічні параметри синтезу SiNWs, які призводять до зростання опору, викликають покращення термочутливості сенсорів температури резистивного типу, як це видно з рис.3, б.

Діодні сенсори температури. Принцип дії термодіода полягає в зміні падіння прямої напруги на p-n переході при зміні температури за сталого струму. Електричні та термочутливі властивості сенсорів температури діодного типу на основі SiNWs вивчались на основі темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ), наведених на рис.4, а), та розрахованих відповідних коефіцієнтів випрямлення та термочутливості (табл.3).

Одержані сенсори температури діодного типу на основі SiNWs характеризуються випрямляючими властивостями, що видно з наведених темнових ВАХ рис.4, а). Коефіцієнти випрямлення розраховувалися як відношення прямого струму до зворотного за напруги 1 В. Максимальний коефіцієнт випрямлення становив 676. Величина термочутливості визначалась з рівності:

$$U(T) = U(T_0) - S \cdot (T - T_0)$$

де U(T) і $U(T_0)$ – прикладені зміщення при температурі T і T_0 відповідно, S – коефіцієнт термочутливості. Така характеристика вимірювалася при 100 мкА, тому що при більшій силі струму відбувався саморозігрів приладу, що вносить похибку в вимірюване значення температури.



а) б)

Рис.4. ВАХ сенсорів температури діодного типу (а) та залежність їх термочутливості від коефіцієнту випрямлення (б)

Як видно з табл.3, наявність текстури призводить до погіршення електричних характеристик, а саме: зменшення коефіцієнту випрямлення з 676 до 28. Це може бути обумовлене погіршенням якості межі поділу в p-n-переході, що викликає появу додаткових

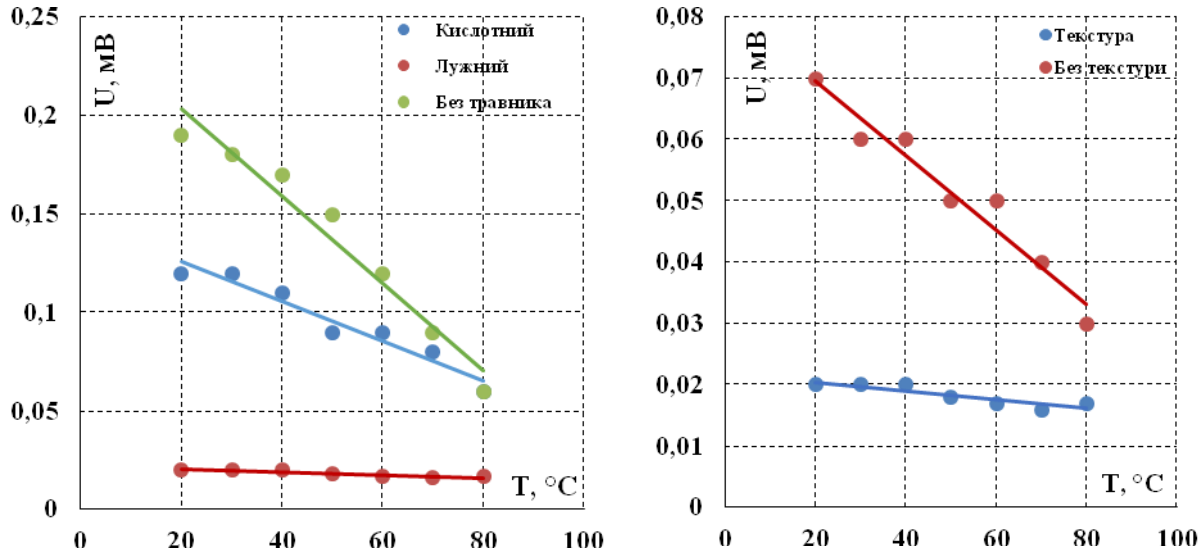
пасток для носіїв заряду. Також було встановлено, що збільшення тривалості обох стадій MACE позитивно впливає на електричні параметри сенсора, які відповідають за геометрію масиву кремнієвих нанониток.

Таблиця 3

Електричні та термочутливі параметри сенсорів температури діодного типу

№ зразку	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	7	11-1	11-2	11-3	12-1	12-2	12	14
Кв	2	3	5	41	16	569	28	3	441	676	16	100	159
Sд, мВ/К	0,02	0	0,17	0,67	0,05	2,17	1	0,05	2,17	2,17	0,67	1,73	1,46

Наприклад, зі збільшенням часу першого етапу MACE (осадження наночастинок срібла) з 20 до 60 с зростає коефіцієнт випрямлення з 3 до 16. Також зі збільшенням тривалості другого етапу MACE з 30 до 90 хв значно зростає коефіцієнт випрямлення з 3 до 569. Ці закономірності, можуть бути обумовлені, більш розвиненою структурою масиву SiNWs, тобто більшою площею p-n-переходу. На відмінну від резистивного типу сенсорів, додавання додаткового травника, як лужного, так і кислотного, призвели до значного погіршення електричних характеристик сенсора. Зокрема коефіцієнт випрямлення сенсора без використання додаткових травників становив 441 і зменшився до 28 після обробки в кислотному травнику і до 3 – в лужному травнику. В роботі також було показано, що наявність на поверхні кремнієвих нанониток залишків срібних наночастинок значно погіршило електричні характеристики, а саме: коефіцієнт випрямлення зменшився з 739 до 41. Було встановлено, що формування масиву кремнієвих нанониток лише з фронтальної сторони пластини (одностороння обробка) дещо покращує електричні характеристики приладів. Це вказує на те, що хімічне травлення тильної сторони пластини під час операції MACE погіршує умови протікання струму до тильного контакту приладу. Для порівняння діодних сенсорів температури без SiNWs можна використовувати наші попередні дослідження [22], які показали що сенсори без SiNWs мають гірші електричні характеристики: а саме $К_в$ менший більш, ніж в 2 рази (342).



а) б)

Рис.5. Вплив обробки в додаткових травниках після операції MACE (а) та наявності текстури (б) на термочутливі характеристики сенсорів температури діодного типу

Текстурування поверхні негативно впливає на термочутливі характеристики сенсора температури: термочутливість впала з 2,17 до 1 мВ/К. Використання обробки в додатковому травнику, як і в випадку електричних характеристик, погіршило термочутливі характеристики діодних сенсорів з текстурованою поверхнею з 2,17 до 0,05 мВ/К у випадку лужного травника і до 1 мВ/К у випадку кислотного травника. Для зразків без текстури додавання кислотного

травника збільшує термочутливість до максимального значення 2,17 мВ/К. Також збільшення тривалості обох стадій MACE позитивно впливає на термочутливі характеристики сенсора, особливо збільшення часу другого етапу MACE з 30 до 90 хв, що призводить до максимального коефіцієнту термочутливості 2,17 мВ/К. Наявність на поверхні кремнієвих нанониток залишків срібних наночастинок на порядок зменшило термочутливість діодних сенсорів. Крім того, було встановлено, що переважна більшість технологічних режимів синтезу SiNWs, які призводять до зростання Квипр, забезпечують покращення термочутливості сенсорів (рис.4, б). В порівнянні з діодними сенсорами без SiNWs, коефіцієнт термочутливості яких становив 1,86 мВ/К, розроблені сенсори мають на 17% вищу чутливість.

Висновок. У даній роботі були виготовлені сенсори температури резистивного та діодного виду на основі кремнієвих нанодротів, а також встановлено вплив параметрів їх синтезу на електричні і термочутливі характеристики пристроїв. Максимальна термочутливість сенсора температури резистивного типу (2851 ppm/K) спостерігалась для текстурованої підкладки з обробкою в кислотному травнику та видаленням частинок срібла з поверхні, часом осадження НЧ срібла 20 с і часом травлення в 90 хв. Співставлення електричних та термочутливих характеристик показало, що для сенсорів температури діодного типу оптимальними є наступні технологічні параметри синтезу кремнієвих нанониток: тривалості першого та другого етапу MACE 20 с та 90 хв відповідно, нетекстурована поверхня з обробкою в кислотному травнику, без залишків срібла. Це дає змогу одержати коефіцієнт випрямлення 676 та коефіцієнт термочутливості 2,17 мВ/К, що удвічі та на 17% перевищують аналогічні показники для термодіодів без нанониток, одержаних в тому ж технологічному режимі (342 та 1,86 мВ/К відповідно). Напрямком наступних досліджень є застосування різних видів модифікації поверхні кремнієвих нанониток з метою подальшого покращення термочутливості.

Інформаційні джерела

[1] Mrinmoy Kumar Chini, Vishal Kumar, Ariba Javed, Soumitra Satapathi, “Graphene quantum dots and carbon nano dots for the FRET based detection of heavy metal ions, ” Nano-Structures & Nano-Objects, vol. 19, 2019.

[2] V.Koval, Yu. Yakymenko, A. Ivashchuk, M. Dusheyko, M. Fadieiev, T. Borodinova, D. Didichenko. Application of Au Nanoparticles for Silicon Heterojunction Solar Cells // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings, 24-26 April, 2018. – Kyiv, Ukraine. – p. 186 – 190.

[3] Jinming Xu, Huangmei Zhou, Yixue Zhang, Yu Zhao, Hao Yuan, Xiaoxiao He, Ying Wu, Sanjun Zhang, “Copper nanoclusters-based fluorescent sensor array to identify metal ions and dissolved organic matter,” Journal of Hazardous Materials, vol.428, p. 128158, 2022.

[4] Nagaraj P. Shetti, Amit Mishra, Soumen Basu, Tejraj M. Aminabhavi, "Versatile fullerenes as sensor materials," Materials Today Chemistry, vol.20, p. 100454, 2021.

[5]. M.G. Dusheiko, V.M. Koval, T.Yu. Obukhova “Silicon nanowire arrays synthesized using the modified MACE process: Integration into chemical sensors and solar cells” // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2022. V. 25, No 1. P. 058-067.

[6] Torad, Nagy L., et al. "Gas sensing properties of polypyrrole/poly (N-vinylpyrrolidone) nanorods/nanotubes-coated quartz-crystal microbalance sensor." Synthetic Metals, p. 116935, vol. 282, p. 116935, 2021.

[7] Pradeep, Natarajan, et al. "Development and investigation of the flexible hydrogen sensor based on ZnO-decorated Sb2O3 nanobelts." Materials Today Chemistry, vol. 22, p. 116935, 2021.

[8]. Chen, Liang, et al. "The piezotronic effect in InGaN/GaN quantum-well based microwire for ultrasensitive strain sensor." Nano Energy, vol. 72, p,104660, 2020.

[9] V. Koval, M. Dusheyko, A. Ivashchuk, S. Mamykin, A. Ievtushenko, V. Barbash, M. Koliada, V. Lapshuda, R. Filov. Reactive Ion Beam Sputtered Molybdenum Oxide Thin Films for Optoelectronic Application // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings, 22-24 April, 2020. – Kyiv, Ukraine. – p. 246 – 250.

[10] He Bin, et al. "Vertical nanostructure arrays by plasma etching for applications in biology, energy, and electronics," Nano Today, vol. 8.3, pp. 265-289, June 2013.

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

[11] G.X. Zhang, "Porous silicon: morphology and formation mechanisms," J. Electrochem. Soc., vol. 39, pp. 65–133, November 2006.

[12] Leonardi, Antonio Alessio, Maria José Lo Faro, and Alessia Irrera. Silicon nanowires synthesis by metal-assisted chemical etching: a review. Nanomaterials 11,2 .2021. p. 383.

[13] Mohammed, Ahmed AS, Walied A. Moussa, and Edmond Lou. High sensitivity MEMS strain sensor: design and simulation. Sensors vol. 8.4. 2008. pp. 2642-2661.

[14] Yuxiang Qin, et al, Ultrasensitive ethanol sensor based on nano-Ag&ZIF-8 co-modified SiNWs with enhanced moisture resistance, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 340. 2021. p.129959.

[15] Yuxiang Qin, et al, Enhanced humidity resistance of porous SiNWs via OTS functionalization for rarefied NO2 detection, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 283. 2019. pp. 61-68.

[16] Krithikadevi Ramachandran, et al, Fabrication of highly oriented 1D SiNW arrays/Au for femto molar level detection of H1N1 protein, Materials Letters, vol. 300. 2021. p. 130184.

[17] De Santiago, Francisco, et al. Silicon nanowires as acetone-adsorptive media for diabetes diagnosis. Applied Surface Science vol. 547, 2021. p.149175, 2021.

[18] Jeribi, Mondher, et al. Response modulation of silicon nanowires-based sensor to carbon number in petroleum vapor detection. Fuel vol. 304, p. 121260. November 2021.

[19] Xinxin Xing, Xuechun Xiao, Lihong Wang, Yude Wang, Highly sensitive formaldehyde gas sensor based on hierarchically porous Ag-loaded ZnO heterojunction nanocomposites, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 247, 2017. pp 797-806.

[20] Mansoor, Mohtashim, et al. Silicon diode temperature sensors—A review of applications. Sensors and Actuators A: Physical vol. 232, 2015. pp. 63-74.

[21] Dinh, Toan, et al. "High thermosensitivity of silicon nanowires induced by amorphization." Materials Letters , vol. 177, pp. 80-84, 2016.

[22] Yaroslav Linevych, Viktoriia Koval, Mykhailo Dusheiko, Yuriy Yakymenko, Maryna Lakyda and Valerii Barbash, "Silicon Diode Structures Based on Nanowires for Temperature Sensing Application", 2022 42th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings, 2022. – Kyiv, Ukraine.

[1]Linevych Ya.O., [1]Koval V.M., [1]Dusheiko M.G., [2]Lakyda M.O.
[1] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
[2] National University of Llife and Environmental Sciences of Ukraine

TEMPERATURE SENSORS BASED ON SILICON NANOWIRES OBTAINED BY METAL-ASSISTED CHEMICAL ETCHING

In this work, temperature sensors based on silicon nanowires (SiNWs), which were synthesized by the method of metal-assisted chemical etching (MACE), were manufactured and investigated. Resistive and diode sensors were obtained on the basis of SiNWs. The sequence of technological operations for the manufacture of temperature sensors was as follows: three-stage cleaning of the surface of silicon plates; metal-assisted chemical etching for the synthesis of SiNWs; diffusion for the formation of a p-n junction in nanowires; application of frontal and rear metallization. Electrical and thermosensitive characteristics were calculated for the obtained sensors: specific resistance, rectification coefficient, thermosensitive coefficients. The influence of MACE synthesis parameters on the electrical and thermosensitive characteristics of the sensors was studied. In particular, the influence of the presence of a texture on the surface of the silicon wafer, the duration of the first and second stages of MACE, additional processing in an isotropic/anisotropic etching, and removal of silver nanoparticle residues on the device characteristics was established. It was found that the maximum values of the thermal sensitivity of the resistive temperature sensor were observed for the textured substrate with additional treatment in acid etching (2851 ppm/K). For the diode-type temperature sensor, the maximum value of rectification coefficient was 676 and the maximum thermal sensitivity was 2.17 mV/K, which were observed for the non-textured substrate with additional treatment in acid etching.

Key words: *temperature sensors, metal-assisted chemical etching, silicon nanowires, thermal sensitivity.*

© Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.

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

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

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об’ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11пт 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, російською 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 1см 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;
151 Автоматизація та комп′ютерно інтегровані технології;
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка;
153 Мікро-та наносистемна техніка;
163 Біомедична інженерія;
171 Електроніка;
172 Телекомунікації та радіотехніка.

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*, *польською* *або* *англійською* мовами. Вартість публікації становить **70 грн**. за 1 стор.

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

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, або за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**.

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Здано у виробн. 28.12.2022 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 12,5. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.

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